Bundesamt für Strahlenschutz

- Geschäftsstelle der Strahlenschutzkommission -

Veröffentlicht im BAnz. Nr. 147a vom 08.08.1995

Veröffentlicht in Heft 7 der Reihe „Berichte der Strahlenschutzkommission“

# Schutz vor niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern der Energieversorgung und -anwendung

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 129. Sitzung am 16./17. Februar 1995

## Inhalt

Schutz vor niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern der Energieversorgung und -anwendung

Inhalt

1. Einleitung

2. Felder in der Umgebung von Einrichtungen der elektrischen Energieversorgung und -anwendung

2.1 Hierarchie der elektrischen Energieversorgung

2.2 Physik des elektrischen und des magnetischen Feldes

2.3 Quantifizierung der Felder der Energieversorgung

2.4 Elektrische Felder im Alltag

2.5 Magnetfelder im Alltag

2.6 Magnetfeldmessung

3. Physikalische und biologische Wirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder und deren gesundheitliche Beurteilung

3.1 Mechanismen der physikalischen Wechselwirkung

3.2 Das biogene elektrische Feld als Basis für das Verständnis biologischer

Wirkungsmechanismen

3.3 Biologische Wirkungen

3.4 Funktionsbeeinflussung von Implantaten

4. Beurteilung epidemiologischer Studien

5. Forschungsbedarf

6. Internationale Empfehlungen zur Expositionsbegrenzung

7. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission

7.1 Grenzwerte

7.2 Zusätzliche Möglichkeiten zur Feldstärkeverringerung

8. Zusammenfassung

9. Literatur

Anhang A1

A1 Beispiele von Untersuchungen der Jahre 1989 - 1995 mit schwachen, sinusförmigen 50/60 Hz-Feldern (B ≤100 µT)

Anhang A2

A2 Darstellung einzelner epidemiologischer Studien und deren Bewertung

Anhang A3

A3 Möglichkeiten für die zusätzliche Verringerung von Feldstärken an Aufenthaltsorten von Personen

## 1. Einleitung

Niederfrequente elektrische und magnetische Felder gehören zu den vielfältigen physikalischen Energieformen, denen der menschliche Körper im Alltagsleben ausgesetzt ist. Wissenschaftliche Untersuchungen lassen erkennen, daß je nach Feldstärke mit dem völligen Fehlen biologischer Wirkungen, mit geringfügigen biologischen Effekten, mit Belästigungen oder mit Gesundheitsgefährdungen zu rechnen ist.

Die Strahlenschutzkommission hat zum Schutz vor niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern der Energieversorgung und -anwendung die folgende Empfehlung erarbeitet. In ihr wird ein Überblick über den Wissenstand zu den im Alltag vorkommenden Expositionswerten, zu den biologischen Wirkungen und biophysikalischen Wirkungsmechanismen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder und zu den Ergebnissen epidemiologischer Studien hinsichtlich gesundheitlicher Risiken sowie über die vorliegenden internationalen Empfehlungen zur Expositionsbegrenzung gegeben.

Das Ergebnis ist die Empfehlung von Feldstärkegrenzwerten für die Bevölkerung, die so festgelegt sind, daß gesundheitsschädigende Wirkungen bei ganztägigem Aufenthalt am Einwirkungsort nach heutiger wissenschaftlicher Kenntnis nicht eintreten können. Im Hinblick auf die künftige Entwicklung von Einrichtungen der elektrischen Energieversorgung und von elektrischen Haushaltsgeräten werden außerdem, im Sinne eines zweistufigen Schutzkonzepts, Hinweise auf zusätzliche Möglichkeiten zur Feldstärkeverminderung gegeben. Es wird aber auch gezeigt, daß es in Anbetracht der vom Körper selbst erzeugten zeitabhängigen elektrischen Felder sinnlos ist, den Aufwand hierfür weiter als bis etwa zu einem Zehntel der Grenzwerte zu treiben.

Die Strahlenschutzkommission stützt sich mit dieser Empfehlung auf die Ergebnisse der internationalen Forschung und an die international empfohlenen Schutzkonzepte nach dem heutigen Stand. Sie strebt an, hiermit eine zuverlässige wissenschaftliche Grundlage für angemessene rechtliche Regeln in der Bundesrepublik Deutschland zu geben.

## 2. Felder in der Umgebung von Einrichtungen der elektrischen Energieversorgung und -anwendung

### 2.1 Hierarchie der elektrischen Energieversorgung

Zwischen 1950 und 1990 hat sich der Verbrauch elektrischer Energie in den alten Bundesländern rund verzehnfacht. Er hat im Jahre 1990 bei 450 TWh (1012 Wh) gelegen. Als Folge dieser Zunahme mußte das Verteilungsnetz in den letzten 40 Jahren entsprechend ausgebaut werden, wobei sich unter dem Gesichtspunkt des Energieverbundes innerhalb von Europa eine Netzstruktur herausgebildet hat, die europaweit für die ständige Verfügbarkeit elektrischer Leistungen bei gleichzeitig kostengünstiger Gestaltung gesorgt hat.

Das 380/220 kV-Netz übernimmt die Aufgabe der weiträumigen Energieübertragung und des internationalen Verbundes. Dadurch wird unter anderem auch die Nutzung standortgebundener Energieerzeuger, wie beispielsweise der Braunkohlekraftwerke am Ort des Abbaus oder der Wasserkraftwerke, möglich gemacht. In dieses Netz speisen die großen Kraftwerke ein, und aus ihm werden die Großstädte und Ballungsräume, aber auch gelegentlich einzelne Industriebetriebe mit hohem Energiebedarf, versorgt.

Das 110 kV-Netz dient als regionales Verteilernetz der flächendeckenden Übertragung elektrischer Energie. In das 110 kV-Netz werden kleinere Kraftwerke eingebunden, wie zum Beispiel Laufwasserkraftwerke oder Windenergieparks. Versorgt werden aus diesem Netz die größeren Gemeinden oder Industrieabnehmer.

Die kommunalen Verteilernetze benutzen eine Spannungsversorgung auf 20 - bzw. 10 kV-Ebene. Aus diesen werden dann die Ortsnetze versorgt, die die Niederspannungsabnehmer mit Energie beliefern.

Mit abnehmender Spannung wird die Gesamtlänge aller Leistungen der einzelnen Netze zunehmend größer. So wird nach Angabe der deutschen Elektrizitätswirtschaft für die alten Bundesländer das 380/220 kV-Verbundnetz mit 30.000 km, das 110 kV-regionale Übertragungsnetz mit 50.000 km, das 20/10 kV-regionale Verteilernetz mit 350.000 km und das 380 V-Ortsnetz mit 700.000 km angegeben.

Während der Energieversorgung auf der untersten Ebene (380 V) zu 75 % über Erdkabel abgewickelt wird, wird dieser Anteil mit zunehmender Spannung immer geringer, er beträgt bei 380 kV nur noch 1,6 Promille. Den Befürwortern von Verkabelung auch der Hochspannungsversorgung muß entgegengestellt werden, daß dies aus physikalischen Gründen nur sehr begrenzt möglich ist. Wegen der dichten Nachbarschaft der Leiter in einem Kabel ergibt sich eine deutlich höhere Kapazität als dies bei Freileitungen der Fall ist. Dadurch entstehen kapazitive Ladeströme, die bei 40 bis 60 km Leitungslänge bereits die Grenzbelastung erreichen. Im Hochspannungsbereich sind Kabel nur als Einführungskabel in Umspannstationen und als kurze Verbindungsleitungen in Großstädten einsetzbar.

Vernetzt werden die einzelnen Ebenen durch Umspannwerke bzw. auf der unteren Ebene durch Niederspannungs-Transformationsstationen. In ihnen wird mit Hilfe von Transformatoren die elektrische Leistung auf das jeweils gewünschte niedrige Spannungsniveau gebracht, wobei der Erniedrigung der Spannung eine entsprechende Erhöhung des Stromes so gegenübersteht, daß ihrer beider Produkt konstant ist. Unter diesem Gesichtspunkt ist es richtig, festzustellen, daß auch im Niederspannungsnetz große Ströme fließen können. In Umspannwerken können innerhalb des meist für die Bevölkerung unzugänglichen Bereiches punktuell hohe Feldstärken entstehen.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß die in normaler Umgebung vorgesehene Abstände zu Hoch- und Niederspannleitungen ausschließlich unter dem Gesichtspunkt der elektrischen Sicherheit so festgelegt wurden (DIN VDE 0210), daß auch im Extremfall kein Schaden bei Menschen oder an Gebäuden und Bewuchs auftreten kann. Der Gedanke, die Feldstärke in allgemein zugänglichen Bereichen unter Hochspannungsleitungen darüber hinaus weiter zu begrenzen, ist erst jüngeren Datums. Daraus ergibt sich aber auch, daß ältere Netze höhere Feldstärkewerte aufweisen können als modernere Anlagen.

### 2.2 Physik des elektrischen und des magnetischen Feldes

#### 2.2.1 Das elektrische Feld

Wird an einem Leiter eine Spannung gelegt, bildet sich um diesem Leiter ein elektrisches Feld aus, das mit dem Abstand sehr stark abnimmt. Das elektrische Feld ist unabhängig von der Stromstärke in dem Leiter. Da in den hier betrachteten Übertragungsnetzen Energie nur in Form von 3-Phasen-Spannungen (Drehstrom) vorkommt und sich elektrische Felder von unterschiedlichen Leitern überlagern (vektoriell addieren), wird in einem Meßpunkt das Summenfeld aller Leiter gemessen. Bei einem 3-Phasen-Netz ist die Vektorsumme aller Spannungen stets 0; deshalb wird, bis auf ein Restfeld, das durch die unterschiedlichen Entfernungen des Meßpunktes zu den einzelnen Leitern und durch Unsymmetrien in der Last entsteht, das elektrische Feld sehr rasch mit der Entfernung abnehmen (s. Abb. 2.1). Hinzu kommt noch, daß die elektrischen Feldlinien auf allen elektrisch leitenden Ebenen oder Gegenständen senkrecht münden; diesen kommt damit, vor allem wenn sie geerdet sind, eine hohe Abschirmwirkung zu. Praktisch sind elektrische Felder von Hochspannungsleitungen in Häusern, unter Bäumen und unter Bauwerken nicht mehr nachweisbar, so daß sich der Einflußbereich im Grunde nur auf die flache, gering bewachsene Landschaft bezieht. Ein Mensch gerät nur dann in das elektrische Feld einer solchen Leitung, wenn er aus dem Bodenbewuchs hervorragt. Dann aber ist auch er ein im elektrischen Sinne leitendes Gebilde, auf dessen Oberfläche die Feldlinien, vor allem im Kopf- und Schulterbereich senkrecht münden.



Abb. 2.1: Elektrische Felder im Nahbereich von Freileitungen; die Feldstärkeangabe (nach DIN VDE 0848, Teil 1) gilt für einen Aufpunkt in 1 m Höhe über dem Erdboden

#### 2.2.2 Das magnetische Feld

Auch das magnetische Feld eines Leiters nimmt sehr stark mit zunehmendem Abstand ab. Es wird jedoch, wie schon beim elektrischen Feld in Kap. 2.2.1 ausgeführt, als 3-Phasen-Summenfeld sehr schnell reduziert (s. Abb. 2.2). Ursache für das magnetische Feld ist der fließende Strom, der in Abhängigkeit von Tageszeit und Jahreszeit großen Schwankungen unterliegt. Die Voraussagbarkeit des mittleren Magnetfeldes ist unter diesem Gesichtspunkt nicht ohne weiteres möglich, da man vor allem auch bei sich überlagernden Systemen zu unterschiedlichen Zeiten mit sehr unterschiedlichen Feldern rechnen muß, wobei noch nicht einmal immer zum Zeitpunkt des höchsten Energieverbrauchs das Magnetfeld an einer Meßstelle am größten sein muß. Dies liegt daran, daß durch die Mehrfachsysteme auf den Freileitungen, beispielsweise zwei 380 kV-Systeme und zwei 110 kV-Systeme, die Mischung aus den einzelnen Phasen ein kleineres Gesamtfeld ergeben kann, als wenn nur je ein Leitungssystem Strom führt.



Abb. 2.2: Magnetische Felder im Nahbereich von Freileitungen; die Feldstärkeangabe (nach DIN VDE 0848, Teil 1) gilt für einen Aufpunkt in 1 m Höhe über dem Erdboden)



Abb. 2.3: Verlauf des magnetischen Feldes in der Umgebung von gebräuchlichen Drehstrom-Erdkabeln bei 1 kA Betriebsstrom; lichter Abstand der Einleiterkabel: 0,07 m

 1 Abstand 0,7 m

 2 Abstand 1,0 m

 3 Abstand 1,7 m

 (in Anlehnung an DIN VDE 0228, Teil 6, Entwurf Dez. 1992)

Das Magnetfeld hat im Gegensatz zum elektrischen Feld, die Eigenschaft, daß es die meisten Materialien unverändert durchdringt. Es ist also gleichgültig, ob sich ein Meßpunkt innerhalb eines Gebäudes, oberhalb oder unterhalb der Erde befindet.

Vor allem im städtischen Bereich ist man dazu übergegangen, die Energie über Drehstromkabel zu verteilen. Derartige Kabel, die in etwa 0,7 m Tiefe verlegt werden, erzeugen kein elektrisches Feld, da sie mit einer Abschirmung umgeben sind. Da die Leiteranordnungen innerhalb des Kabels, verglichen mit Freileitungen, sehr dicht gepackt sind, sind die nach außen meßbaren magnetischen Felder sehr schnell reduziert. Lediglich in unmittelbarer Nähe des Kabels ist ein Magnetfeld feststellbar, das durchaus in die Größenordnung der höchsten Feldstärke bei Freileitungen kommen kann (s. Abb. 2.3).

### 2.3 Quantifizierung der Felder der Energieversorgung

Dort, wo die Seile der Hochspannungsleitungen dem Erdboden am nächsten sind, sind die Werte für die elektrische und magnetische Feldstärke für jedes Spannfeld (Abstand zwischen zwei Masten) am größten. Die maximale Feldintensität beschränkt sich in der Regel auf ein kleines Areal. Dies gilt um so mehr, je weiter die Hochspannungsmasten auseinanderstehen.

#### 2.3.1 Elektrische Felder

In Abb. 2.1 wird für eine einfache Leiteranordnung (nur 2 Systeme) der Verlauf der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit von der Entfernung zur Trassenmitte wiedergegeben. Die Form des „Feldstärkeprofils“ kann unterschiedlich sein, je nachdem, wie die Phasenverteilung vorgenommen wird. Üblich sind an der Stelle des tiefsten Durchhangs die in der Abb. 2.1 angegebenen Werte für 380 kV, 220 kV und 110 kV, die man etwa grob mit 6 kV/m, 4 kV/m und 2 kV/m ansetzen kann. Entsprechend weit reichen auch die Felder: Bei etwa 40 m für das 380 kV-System und 20 m für das 220 kV-System wird 1 kV/m (ein Sechstel des Maximalwertes), wie Abb. 2.1 zeigt, unterschritten. Werten mehr als 2 Hochspannungssysteme auf einer Freileitung geführt, wird die Feldverteilung im allgemeinen günstiger. Nach Angaben der Firma Rheinisch Westfälisches Elektrizitätswerk AG (RWE) dürften etwa 43 % aller 380 kV-Spannfelder an ihrem Tiefstpunkten Feldstärken von bis zu 5 kV/m erzeugen; zwischen 5 kV/m und 6 kV/m dürften s 28 %, zwischen 6 kV und 7 kV immer noch 17 % und oberhalb von 7 kV/m dürften es noch 12 % aller 380 kV-Spannfelder sein.

#### 2.3.2 Magnetische Felder

In Abb. 2.2 wird die magnetische Flußdichte des magnetischen Feldes im Nahbereich einer Hochspannungsleitung dargestellt. Auch hier gilt wiederum, daß durch andere Phasenverteilungen und durch Hinzunahme von weiteren Leitungssystemen das Magnetfeld deutlich geändert, meist geschwächt werden kann. Allerdings ist dies wegen der wechselnden Stromstärke nur schwer vorhersagbar. Eine sinnvolle Angabe ist nur zu machen, wenn man den im Mittel zu erwartenden Strom für die einzelnen Leitungssysteme angibt. Die in der Abb. 2.2 eingetragenen Werte entsprechen etwa der halben Maximallast, die ihrerseits durch die thermische Belastung der Seile vorgegeben wird und die nur ganz gelegentlich und kurzzeitig erreicht wird.

Weil das Magnetfeld von der Stromstärke eines jeden Systems, aber auch von der Anzahl der unterschiedlichen Systeme abhängig ist, wobei auch noch die Stromflußrichtung eine Rolle spielt, ist eine örtliche Festlegung, bei welcher Entfernung welches Magnetfeld herrschen könnte, nur sehr grob möglich. Wie Abb. 2.2 zeigt, ist die magnetische Flußdichte für die 380 kV-Leitung in etwa 50 m Abstand auf ein Sechstel des Maximalwertes gefallen; für die 220 kV-Leitung beträgt dieser Abstand ca. 30 m und für die 110 kV-Leitung ca. 10 m. Empirisch hat man gefunden, daß magnetische Felder oberhalb einer Flußdichte von 0,3 µT in der Regel in einem Abstand von weniger als 30 m auftreten, Flußdichten von weniger als 0,1 µT im Abstand von mehr als 100 m.

Für ein Drehstromkabel ergibt sich bei einem Abstand von einem Meter und einer Strombelastung von 333 A eine magnetische Flußdichte von 11,5 µT. In einer Entfernung von 5 m wird für diesen Fall bereits die Flußdichte von 1 µT unterschritten. Ist die Strombelastung dreifach höher und ist der dichteste Abstand 0,7 m, kann das Magnetfeld direkt über dem Leiter eine Flußdichte bis zu 70 µT annehmen. Aber auch für diesen Fall gilt, daß in 5 m Entfernung die Flußdichte unter 1 µT liegt.

Die Felder an Umspannwerken und Transformatorstationen zu beschreiben, ist insofern schwierig, als dies im Wesentlichen davon abhängt, wie weiträumig der Komplex eingezäunt wird. Für eine Niederspannungstrafostation von etwa 100 kVA-Leistung können Werte der Flußdichte bis zu 40 µT gemessen werden. Dies hängt ganz davon ab, wie dicht man an die meist flächig ausgeführten Stromleiter auf der Niederspannungsseite herankommt. Erfahrungsgemäß ist jedoch in einem Abstand von 1 bis 2 Metern die Flußdichte auf 1 µT und weniger abgefallen. Hierzu muß noch bemerkt werden, daß die Transformatoren selber nicht die Quelle des magnetischen Feldes darstellen; sie sind im Allgemeinen so gut konstruiert, daß ihr Streufeld vernachlässigbar klein ist. Für das Magnetfeld entscheidend ist der Niederspannungsausgang und die Art und Weise, wie von dort die Kabel geführt werden.

### 2.4 Elektrische Felder im Alltag

Da die Geräte des Alltags nur mit 220 V bzw. 380 V betrieben werden, ist das in ihrer Umgebung erzeugte elektrische Feld meistens deutlich kleiner als bei Hochspannungsleitungen. Unmittelbar an der Geräteoberfläche kann die elektrische Feldstärke zwischen 10 V/m und 100 V/m liegen. Lediglich bei der Heizdecke können sich Werte bis 500 V/m ergeben.

### 2.5 Magnetfelder im Alltag

Die Geräte des Alltags erzeugen nahe der Geräteoberfläche beachtliche Magnetfelder. In Tab. 2.1 sind die magnetischen Flußdichten einiger Geräte des Alltags zusammengestellt.

Tab. 2.1: Bereiche magnetischer Flußdichten in µT (bei 50 Hz) für verschiedene netzbetriebene Geräte des Alltags in unterschiedlichen Abständen

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Gerät/Abstand | 3 cm | 30 cm | 100 cm |
| Bohrmaschine | 400 - 800 | 2 - 3,5 | 0,08 - 0,2 |
| Bügeleisen | 8 - 30 | 0,12 - 0,3 | 0,01 - 0,03 |
| Computer (PC) | 0,5 - 3,0 | 0,01 | < 0,01 |
| Diaprojektor | 240 | 4,5 | < 0,15 |
| Dosenöffner | 1000 - 2000 | 3,5 - 30 | 0,07 - 1 |
| Fernsehgerät | 2,5 - 50 | 0,04 - 2 | < 0,01 - 0,15 |
| Gasentladungslampe | 40 - 400 | 0,5 - 2 | 0,02 - 0,25 |
| Geschirrspüler | 3,5 - 20 | 0,6 - 3 | 0,07 - 0,3 |
| Haarfön | 6 - 2000 | < 0,01 - 7 | < 0,01 - 0,3 |
| Halogenlampe 7A | 25 - 80 | 0,6 - 1,7 | < 0,06 - 0,14 |
| Heizofen | 10 - 180 | 0,15 - 5 | 0,01 - 0,25 |
| Kaffeemaschine | 1 - 2 | 0,1 - 0,2 | < 0,01 |
| Klein-Transformator | 135 - 150 | 0,6 - 1,1 | < 0,01 - 0,05 |
| Küchenherd | 1 - 50 | 0,15 - 0,5 | 0,01 - 0,04 |
| Kühlschrank | 0,5 - 1,7 | 0,01 - 0,25 | < 0,01 |
| Lötkolben | 105 - 200 | 0,3 - 0,6 | < 0,01 |
| Mikrowellengerät | 73 - 200 | 4 - 8 | 0,25 - 0,6 |
| Mixer | 60 - 700 | 0,6 - 10 | 0,02 - 0,25 |
| Monitor (Farbe) | 5,6 - 10 | 0,45 - 1,0 | < 0,01 - 0,03 |
| Radio (tragbar) | 16 - 56 | 1 | < 0,01 |
| Staubsauger | 200 - 800 | 2 - 20 | 0,13 - 2 |
| Tauchsieder 1 kW | 12 | 0,1 | < 0,01 |
| Tischlampe 60 W | 0,1 - 0,2 | < 0,01 | < 0,01 |
| Toaster | 7 - 18 | 0,06 - 0,7 | < 0,01 |
| Trockenrasierer | 15 - 1500 | 0,08 - 9 | < 0,01 - 0,3 |
| Uhr | 300 | 2,25 | < 0,01 |
| Videorecorder | 1,5 | < 0,01 | < 0,01 |
| Waschmaschine | 0,8 - 50 | 0,15 - 3 | 0,01 - 0,15 |
| Wäschetrockner | 0,3 - 8 | 0,08 - 03 | 0,02 - 0,06 |
| Wasserkocher 1 kW | 5 - 7 | 0,08 | < 0,01 - 0,04 |

Bereits in 30 cm Entfernung weist keines der dort aufgeführten Geräte eine Flußdichte von mehr als 30 µT auf.

Im industriellen und gewerblichen Bereich existieren Verfahren, bei denen aufgrund des hohen Energiebedarfs deutlich höhere Magnetfelder auftreten. Überall da, wo Energie der Frequenz 50 Hz in großen Mengen gebraucht wird, können magnetische Flußdichten bis zu 10 mT erreicht werden (z. B. Elektrostahlofen). Auch bei den einfachen, transformatorbetriebenen Schweißgeräten können unmittelbar am Kabel magnetische Flußdichten bis 1 mT erzeugt werden. Das Magnetfeld des 110 kV-Netzes der Eisenbahn, das mit 16 2/3 Hz betrieben wird, kann in einem Abstand von 8 m zur Leitung Flußdichten bis zu 6 µT aufweisen. Ist der Abstand 30 m, reduziert sich die Flußdichte auf etwa 1 µT. Bei den Bahnoberleitungen wurden im horizontalen Abstand von 5 m Flußdichten von etwa 10 µT, bei 10 m etwa 1 µT gemessen. Das elektrische Feld liegt in 5 m Abstand bei knapp 600 V/m.

### 2.6 Magnetfeldmessung

Die in Tabelle 2.1 angegebenen Meßwerte wurden durch Messungen mit Hall-Sonden (punktförmig (p)) oder mit Induktionsspulen (flächig (f)) gemessen. Ein mit punktförmigem Sensor gemessener Feldstärkewert ist nur in homogenen Feldern mit einem mit flächigem Sensor ermittelten wert vergleichbar. In inhomogenen Feldern können beträchtliche Abweichungen zwischen beiden Werten auftreten. Je nachdem, ob man den Maximalwert oder den über eine Fläche gemittelten Wert des Feldes ermitteln möchte, wird man daher mit punktförmigem oder flächigem Sensor gemessen. Wird mit der Normspule nach VDE 0107 mit einer Fläche von 100 cm² gemessen, so werden in inhomogenen Feldern deutlich verringerte Werte ermittelt. Tabelle 2.2 vergleicht einige Geräte des Alltags punktförmige und über 100 cm² gemittelte Flußdichten. Je größer die Entfernung vom Objekt ist, um so mehr nähern sich beide Werte einander an. Leider fehlen in der Literatur oftmals genaue Angaben über die Meßmethode. Zum Teil erklärt sich daraus die enorme Schwankungsbreite.

Tab. 2.2: Beispiele magnetischer Flußdichten in µT (bei 50 Hz) verschiedener netzbetriebener Geräte in Abhängigkeit vom Abstand. Es wurde sowohl punktförmig (p) als auch über eine Fläche von 100 cm² gemittelt (f) gemessen.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Gerät/Abstand | 3 cm(p) (f) | 30 cm(p) (f) | 100 cm(p) (f) |
| Bügeleisen | 33 26 | 0,45 0,35 | < 0,01 < 0,01 |
| Computer (PC) | 2,4 0,55 | < 0,01 < 0,01 | < 0,01 < 0,01 |
| Diaprojektor | 225 170 | 4,5 4,5 | 0,15 0,15 |
| Fön | 18 18 | 0,25 0,25 | < 0,01 < 0,01 |
| Klein-Trafo1) | 150 75 | 1,1 1,0 | < 0,05 < 0,05 |
| Lötkolben | 105 37 | 0,7 0,7 | < 0,01 < 0,01 |
| Monitor | 10 9,7 | 0,9 0,9 | 0,03 0,03 |
| Radio (tragbar)2) | 56 30 | 1 1 | < 0,01 < 0,01 |
| Rasierapparat | 600 300 | 2 2 | 0,1 0,1 |
| Tauchsieder 1 kW | 12 0,6 | 0,1 0,04 | < 0,01 < 0,01 |
| Wasserkocher 1 kW | 5,4 1,5 | 0,09 0,09 | < 0,04 0,04 |

1) auch ohne Belastung

2) mit Netzteil, sowohl ein- als auch ausgeschaltet

Ebenfalls interpretationsbedürftig ist die Messung in einem magnetischen Drehfeld, wie es beispielsweise unter Hochspannungsleitungen oder in der Nähe von dreiphasigen Transformatoren, elektrischen Maschinen, Induktions- oder Lichtbogenöfen usw. auftritt. Ein Drehfeld ist dadurch charakterisiert, daß die Vertikalkomponente des Magnetfeldes eine andere Phasenlage besitzt als die Horizontalkomponente. Bei Hochspannungsleitungen dreht sich der Magnetfeld-Vektor mit der Netzfrequenz in einer Ebene senkrecht zu den Leitern, wobei die Spitze des Vektors im Allgemeinen eine elliptische Bahn beschreibt.

Auch in diesem Falle ist zu klären, wie man das magnetische Feld bewerten soll, d. h., ob man den Maximalwert in Richtung der großen Halbachse der Ellipse betrachtet oder einen wie auch immer bewerteten Mittelwert, der sich aus den beiden Werte in Richtung der Halbachsen ergibt. Dieses Problem ist bisher noch nicht diskutiert worden. Bei vektorieller Messung eines magnetischen Drehfeldes (drei Sensorspulen stehen orthogonal zueinander) wird die Flußdichte in der Regel zu groß gemessen, wenn ihr Betrag aus den drei Einzelkomponenten zusammengesetzt wird, weil der Magnetfeld-Vektor als Funktion der Zeit jede Lage in der Ebene der Ellipse annimmt. Zum Beispiel ist bei einem kreisförmigen Drehfeld der horizontale Vektor gegenüber dem vertikalen um 5 ms zeitversetzt, entsprechend einem Phasenverschiebungswinkel von 90°. Beide Vektoren geometrisch zu addieren, ergäbe eine Amplitude, die um einen Faktor (2 größer berechnet würde als der Vektor tatsächlich ist.

## 3. Physikalische und biologische Wirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder und deren gesundheitliche Beurteilung

### 3.1 Mechanismen der physikalischen Wechselwirkung

#### 3.1.1 Elektrische Felder

Die Exposition lebender Organismen im elektrischen Feld wird normalerweise durch die ungestörte elektrische Feldstärke charakterisiert oder berechnete Feldstärke ohne Anwesenheit des Objekts. Da biologische Körper sich im Vergleich zu Luft wie gute elektrische Leiter verhalten, kommt es beim Einbringen des Objekts in das Feld zu einer Veränderung des äußeren Feldes durch das Objekt. Dies wird durch eine Umverteilung der elektrischen Ladungsträger verursacht, die als „Influenz“ bezeichnet wird. Dabei kommt es lokal an der Oberfläche des Objekts teils zu einem Überschuß an positiven, teils an negativen Ladungen, wobei insgesamt die Summe der elektrischen Ladungen 0 ergibt. Die Ladungsumverteilung erfolgt solange, bis im Inneren des Körpers kein elektrisches Feld mehr auftritt. Bei zeitlich veränderlichen Feldern wechselt dieser Zustand entsprechend der Frequenz und führt damit zu frequenzproportionalen Stromdichten im Inneren des Objekts.

Im Außenraum hat die Anwesenheit eines leitenden Körpers eine Verzerrung des ungestörten Feldes zur Folge. Diese ist um so größer, je spitzer der leitende Körper ist. Steht ein Mensch unter einer Hochspannungsfreileitung, so ist die Feldstärke in Kopfnähe deutlich größer als im ungestörten Feld (vgl. Abb. 3.1). Werden die Hände nach oben gehoben, ist die Feldstärkeüberhöhung noch größer. Die elektrische Feldstärke an der Körperoberfläche bewirkt eine mit der Frequenz wechselnde Aufladung der relativ hochohmigen Behaarung des Körpers. Zwischen den Haaren und der Hautoberfläche werden Kräfte wirksam, die eine Vibration des Haarschaftes anregen und die über Berührungsrezeptoren in der Haut registriert werden können. Durch die starke Feldüberhöhung an der Körperoberfläche kann es auch zu einem wahrnehmen „Kribbeln“ zwischen Kleidung und Haut sowie zur direkten Stimulation von peripheren Rezeptoren in der Haut kommen. Die Wahrnehmung elektrischer Felder durch Oberflächenreizungen, wie Haarvibration und Kribbeln der Haut, hängt von vielen Faktoren ab, wie Orientierung des Körpers zum Feld, Stellung der Extremitäten, Kleidung, Erdungsverhältnissen usw. Die Schwellenwerte der Wahrnehmung sind von Person zu Person verschieden. Eine Feldstärke von 1 kV/m wird von etwa 1 % der Versuchspersonen in Folge von Vibrationen der Körperhaare wahrgenommen, 10 kV/m von etwa 20 % und 20 kV/m von etwa 50 % der Versuchspersonen. Die Wahrnehmung elektrischer Felder durch Oberflächeneffekte wird gelegentlich als Belästigung und Beeinträchtigung des Wohlbefindens empfunden. Durch die von der Strahlenschutzkommission in Anlehnung an die Richtwerte des International Non-Ionizing Radiation Committee der International Radiation Protection Association (INIRC/IRPA) empfohlenen Grenzwerte für die Bevölkerung werden jedoch erhebliche Belästigungen infolge von Oberflächeneffekten vermieden (vgl. Kap. 3.3.2). Natürliche oder künstlich erzeugte elektrostatische Felder können ebenfalls solche Oberflächeneffekte erzeugen. Wenn im Verhaltensexperiment nachgewiesen wurde, daß Ratten 50 Hz-Felder von 80 kV/m (nicht aber 42 kV/m) meiden. dann ist dies mit Sicherheit auf derartige Effekte zurückzuführen [Sak 93]. Die von geometrischen Besonderheiten abhängigen Unterschiede von Oberflächenfeldstärken bei Mensch und Tier müssen allerdings bei der Extrapolation der Ergebnisse von Tierversuchen auf den Menschen berücksichtigt werden (vgl. Abb. 3.1).

Zusätzlich zu den Oberflächeneffekten kommt es im Körperinneren aufgrund der Ladungsumverteilung zu elektrischen Stromdichten, die berechnet oder in Modellen (sog. Phantomen) gemessen werden können. Die Berechnungen beginnen mit dem Problem, die Körperform des Menschen in seinen verschiedenen Positionen zur Feldrichtung einigermaßen geometrisch zu erfassen. Die Leitfähigkeit verschiedener Organe, Gewebe und zellularer Bestandteile ist unterschiedlich. Es können größere Bereiche mit Strecken relativ hoher Leitfähigkeit (z. B. Blut, Zellplasma, Lymphe) mit stärker isolierenden Geweben oder Membranen abschließen, so daß im Körper Orte geringerer mit solchen höherer Feldstärke wechseln. Diese elektrischen Inhomogenitäten setzen sich bis in den molekularen Bereich der biologischen Struktur fort.

Entscheidend für einen möglichen Effekt ist das elektrische Feld bzw. die elektrische Stromdichte unmittelbar am Ort des Wirkens, d. h. an der Zelle, der Membran und in dem Molekül. Diese Berechnungen sind kompliziert und setzen voraus, daß dieser Wirkungsort und die elektrischen Eigenschaften seiner Umgebung bekannt sind.



Abb. 3.1: Elektrische Oberflächenfeldstärke und influenzierte Stromdichten für Mensch, Schwein und Ratte in einem vertikalen elektrischen 60 Hz-Feld der ungestörten Feldstärke 10 kV/m bei idealer Erdung [Kau 80] (Größenverhältnisse nicht maßstäblich).

Steht ein Mensch in einem senkrecht orientierten elektrischen Wechselfeld einer Frequenz von 50 Hz und einer Feldstärke von 10 kV/m, so treten im Körper elektrische Felder auf, die für verschiedene Körperteile unterschiedlich sind und im Bereich von 5 mV/m bis 25 mV/m (in den Fußgelenken bis 200 mV/m) liegen können. Häufig werden in der Literatur die Werte auch als elektrische Stromdichte angegeben, wobei die Umrechnung aus der elektrischen Feldstärke durch Multiplikation mit der elektrischen Leitfähigkeit erfolgt; vereinfachend wird häufig eine homogene Leitfähigkeit des Gewebes von 0,2 Siemens/m (S/m) angenommen. Beispielsweise zeigt der obere Teil der Tab. 3.1, welche elektrischen Feldstärken erforderlich sind, um in verschiedenen Körperteilen eine Stromdichte von 1 mA/m² (entsprechend einer inneren Feldstärke von 5 mV/m) zu erzeugen.

Tab. 3.1: Elektrische Feldstärken bzw. magnetische Flußdichten eines 50 Hz-Feldes in der Umgebung eines senkrecht stehenden Menschen, die in verschiedenen Körperteilen eine Stromdichte von etwa 1 mA/m² erzeugen. (Die für das magnetische Feld angegebenen Werte gelten für periphere Bereiche der angegebenen verschiedenen Körperteile. Für weiter im Körperinneren gelegene Gewebebereiche - mit Ausnahme des Herzens - sind die erforderlichen magnetischen Flußdichten zur Induktion derselben Stromdichte größer; vereinfachend ist eine homogene Leitfähigkeit von 0,2 S/m angenommen.)

|  |  |
| --- | --- |
| **Elektrisches Feld** | **Elektrische Feldstärke in kV/m** |
| Kopf | 8,5 - 12,5 |
| Halsbereich | 2 - 3,5 |
| Thorax, Herzbereich, Rumpf | 2,5 - 10 |
| Fußgelenke, wenn beide Füße geerdet sind | 0,25 - 0,5 |
| **Magnetisches Feld** | **Magnetische Flußdichte in µT** |
| Kopf | 300 - 600 |
| peripherer Bereich des Rumpfes, Herzbereich | 100 - 200 |

#### 3.1.2 Magnetische Felder

Im Gegensatz zum elektrischen Feld kann beim magnetischen Feld eine Feldverzerrung durch biologische Objekte vernachlässigt werden. Da die magnetischen Materialkonstanten für Luft und für die meisten biologischen Substanzen gleich sind, werden Größe und Verteilung der magnetischen Felder innerhalb des biologischen Objekts vom Objekt selbst kaum beeinflußt. Der wichtigste Wirkungsmechanismus beruht auf elektrischen Feldern, die durch magnetische Induktion im Körper entstehen. Zeitlich veränderliche Magnetfelder induzieren in biologischen Objekten elektrische Wirbelfelder, die z. B. Nerven- und Muskelzellen erregen können, wenn bestimmten Schwellenwerte überschritten werden.

Statische Magnetfelder, wie das geomagnetische Feld, können bei Bewegungen des Körpers zur Induktion von Stromdichten im Körper führen. Das magnetische Feld der Erde weist in unseren Breiten in seiner horizontalen Komponente eine Flußdichte von 16 µT bis 18 µT und in seiner vertikalen eine solche von 45 µT bis 47 µT auf. Die durch das geomagnetische Feld z. B. beim Aufstehen des Menschen oder bei schnellen Bewegungen des Kopfes induzierten Feldstärken bzw. Stromdichten liegen in der Größenordnung von 50 µV/m bzw. von 10 µA/m².

Bei zeitlich veränderlichen Magnetfeldern überwiegen die Effekte, die auf die Induktion elektrischer Wirbelfelder zurückgeführt werden können, gegenüber anderen Wirkungsmechanismen. Als physikalische Basisgröße, die mit dem Auftreten biologischer Effekte auf zellulärer Ebene verknüpft ist, kann die im Körper induzierte elektrische Feldstärke oder Stromdichte angesehen werden.

Die induzierte elektrische Feldstärke bzw. die Stromdichte hängen von der Frequenz des Magnetfeldes, von der magnetischen Flußdichte sowie von der Leitfähigkeit des Gewebes und von der Fläche des vom Magnetfeld durchsetzenden Querschnitts ab; letztere entspricht maximal der Querschnittsfläche des Körpers, senkrecht zur Richtung der einfallenden Magnetfeldlinien. Die induzierte elektrische Feldstärke ist folglich in peripheren Bereichen des Körpers größer und nimmt dann zum Körperinneren hin ab, wobei die Inhomogenität des Gewebes zu beachten ist.

Nimmt man vereinfachend eine homogene Leitfähigkeit von 0,2 S/m an, so erzeugt ein 50 H6-Magnetfeld mit einer magnetischen Flußdichte von 100 µT im peripheren Bereich des Körpers Stromdichten im Bereich von 0,2 mA/m² bis 2 mA/m². Der untere Teil von Tab. 3.1 zeigt Werte für die magnetische Flußdichte, welche in peripheren Bereichen verschiedener Körperteile die Stromdichte von 1 mA/m² erzeugen. Für weiter im Körperkern gelegene Gewebebereiche sind die induzierten Stromdichten kleiner bzw. die erforderlichen magnetischen Flußdichten zur Induktion derselben Stromdichte von 1 mA/m² größer. In inhomogenen Magnetfeldern werden diese induzierten Stromdichten bei weitem nicht erreicht.

### 3.2 Das biogene elektrische Feld als Basis für das Verständnis biologischer

### Wirkungsmechanismen

Biogene elektrische Felder im Körper basieren auf elektrischen Potentialdifferenzen über der Membran der Zellen und deren Veränderung, wie sie bei Erregungen von Nerven- und Muskelzellen als „Aktionspotentiale“ auftreten. Membranpotentialdifferenzen entstehen direkt oder indirekt durch Ionenpumpen. Obwohl die Potentialdifferenz zwischen Zellinnerem und Umgebungsmilieu nur 10 mV bis 100 mV beträgt, kommt es in der nur 8 mm dicken Membran zu extrem hohen Feldstärken von 106 V/m.

Es gibt im lebenden Organismus auch biogene elektrische Felder und Ströme außerhalb der Zellen. Auch diese haben ihren Ursprung letztlich in den Ionenpumpen der Membranen, entstehen aber auch durch Aktionspotentiale erregbarer Zellen oder durch Zell-Verletzungen. Extrazelluläre elektrische Felder sind um viele Größenordnungen schwächer als die Felder in der Membran und fallen mit steigender Entfernung von ihrem Entstehungsort stark ab. In unmittelbarer Nähe elektrisch erregbarer Zellen können Feldstärken bis 200 V/m auftreten. Die schwachen, zeitlich variablen elektrischen Felder, die als EKG, EMG, EEG usw. zum Zwecke ärztlicher Diagnose gemessen werden, sind die Folge von zellulären Depolarisationen. Die vom Herzen oder Gehirn erzeugten Feldstärken an der Peripherie liegen in der Größenordnung von 1 mV/m bis 50 mV/m, entsprechend etwa 0,2 mA/m² bis 10 mA/m². Die biogenen magnetischen Felder, die als MKG gemessen werden können, sind extrem schwach und liegen an der Körperoberfläche in der Größenordnung von 10 pT bis 200 pT [Man 91].

Bei einer weiteren Art biogener elektrischer Felder handelt es sich um statische, durch Zeitverläufe biologischer Prozesse modulierte Felder. Die physiologische Bedeutung dieser Felder ist noch unklar, wird jedoch im Sinne der Regulation und Kommunikation von Zellen untereinander diskutiert.

Ist ein von außen appliziertes Feld so stark, daß sich das Membranpotential signifikant ändert, so kann es in Muskel- oder Nervenzellen Erregungen auslösen. Dies führt unmittelbar zu einer biologischen Antwortreaktion - bei Muskelzellen z.B. zu Kontraktionen und Krämpfen. Die dazu erforderliche extremzelluläre Feldstärke hängt von der effektiven Ausdehnung der Zelle in Feldrichtung ab. Eine erregbare Zelle beispielsweise ist mit geringeren äußeren Feldern reizbar, wenn sie mit ihrer Längsachse in Feldrichtung orientiert ist, als wenn sie senkrecht dazu steht. Für 50 Hz-Felder liegen die Schwellenwerte für die Feldstärke beispielsweise für periphere Nerven oberhalb von 2 V/m, für Myocardzellen oberhalb von etwa 30 V/m. Sind mehrere Zellen miteinander durch Kanäle hoher Leitfähigkeit verbunden, so ist ihre effektive Länge und damit die Wirksamkeit elektrischer Felder der Umgebung bzw. im Körper entsprechend größer.

Während die Kenntnisse über die Elektrophysiologie von Nerven und Muskeln und deren Reizung durch elektrische Ströme und Felder recht gut sind, liegen bisher nur wenige Erkenntnisse über die Bedeutung und die möglichen Wirkungsmechanismen extrazellulärer Felder im Körper vor, soweit diese wesentlich schwächer als die für Reizwirkungen relevanten Felder sind. Zur Zeit wird von der Hypothese ausgegangen, daß die im extrazellulären Medium influenzierten oder induzierten elektrischen Felder über elektrische und elektrochemische Vorgänge an der Zelloberfläche wirken.

### 3.3 Biologische Wirkungen

Eine Übersicht über den Stand der biologischen Forschung auf diesem Gebiet gibt Cridland [Cri 93]. Danach deuten bisher vorliegende Ergebnisse auf einen möglichen Promotor-Effekt der Felder für die Karzinogenese hin - allerdings bei sehr starken Feldern. Es ist festzustellen, daß die Schwellenwerte für in der Literatur berichtete biologische Wirkungen um mehrere Größenordnungen höher liegen als die Feldstärken, bei denen epidemiologische Studien durchgeführt wurden (vgl. Kap. 4). Magnetfelder mit Flußdichten von etwa 0,2 µT bis 0,5 µT führen zu elektrischen Feldern und Stromdichten im Körper, die etwa um 2 bis 3 Größenordnungen unterhalb der natürlicherweise vorkommenden Stromdichten in den meisten, elektrisch nicht aktiven Organen des Körpers liegen.

Die durch Influenz oder Induktion in oder am Körper erzeugten Felder stellen eine direkte Wirkung dar. Indirekte Wirkungen von elektrischen oder magnetischen Feldern können dagegen nur durch Vermittlung von Objekten und Geräten, wie z. B. Metallteilen, Fahrzeugen oder Herzschrittmachern, zustande kommen.

#### 3.3.1 Direkte Feldwirkungen

Bisher sind die Wirkungen diskutiert worden, die zu elektrischen Erregungsvorgängen führen. Es werden aber auch Phänomene vermutet, die unterhalb der Schwelle der elektrischen Erregung liegen.

Die Beurteilung direkter elektrischer und magnetischer Feldwirkungen auf den Körper folgt einem Stufensystem der Wirksamkeit unterschiedlicher Stromdichtebereiche, welches zum ersten Mal in einem Dokument der Weltgesundheitsorganisation WHO eingeführt wurde [WHO 87]. Mit zunehmender Stromdichte werden die biologischen Wirkungen immer ausgeprägter.

Unterhalb von 5 mV/m oder 1 mA/m² sind keine wissenschaftlich abgesicherten biologischen Wirkungen bekannt. Solche Feldstärken oder Stromdichten können im Organismus des Menschen durch elektrische Felder von mehr als etwa 2 kV/m oder durch magnetische Flußdichten von über etwa 100 µT erzeugt werden (vgl. Kap. 3.1.2). Die Stromdichte von 1 mA/m² entspricht im allgemeinen der natürlicherweise vorhandenen Stromdichte in elektrisch nicht aktiven Organen und Geweben des Körpers; die vom Herzen oder im Gehirn erzeugten Felder liegen in der Größenanordnung bis zu 50 mV/m. entsprechend 10 mA/m².

Bei Laborversuchen an Zellkulturen - wie auch mit Nagetieren - mit Stromdichten von 1 mA/m² bis 10 mA/m² sind vorübergehende biologische Effekte beobachtet worden. Entsprechende Beobachtungen beziehen sich zumeist auf Auswirkungen auf die Melatoninproduktion der Zirbeldrüse sowie Veränderungen der Kalziumverteilungen. Häufig werden Effekte nur bei bestimmten Frequenz- oder bestimmten Feldstärkebereichen beobachtet (Fendereffekte) [Pos. 86]. Diese Befunde müssen jedoch weiter im Hinblick auf ihre pathogene Bedeutung der Effekte für die Auslösung von Spätwirkungen überprüft werden.

Ab Feldstärken oberhalb entsprechend 10 mA/m² werden Veränderungen von Enzymaktivitäten, Änderungen der Protein- und DNS-Synthese, Verschiebungen von Ionen, Metaboliten und Wirkstoffen, Beeinflussung der Zellteilung und -differenzierung sowie mögliche Effekte auf das Nervensystem beobachtet. Diese Befunde wurden von mehreren Untersuchern verifiziert und können daher als bestätigt gelten.

Aus Untersuchungen, bei denen man elektrische Gewebefeldstärken mit Hilfe von Elektroden erzeugt hat, kennt man die Gefahrenschwellen (vergl. Tab. 3.2). Bei Körperstromdichten in Bereichen von 100 mA/m² bis 1000 mA/m² können die Reizschwellen im erregbaren Gewebe erreicht werden und Veränderungen in der Erregbarkeit des zentralen Nervensystems beobachtet werden; hier sind Gesundheitsgefahren möglich. Bei Stromdichten oberhalb von 1000 mA/m² können Extrasystolen und Herzkammerflimmern auftreten [WHO 87].

Tab. 3.2: Stromdichtebereiche, die zwischen 3 und 300 Hz zu den angegebenen biologischen Wirkungen führen (nach [WHO 87])

|  |  |
| --- | --- |
| **Wirkungen** | **Stromdichte in mA/m²** |
| Extrasystolen und Herzkammerflimmern möglich, deutliche Gesundheitsgefahren | > 1000 |
| Veränderungen in der Erregbarkeit des zentralen Nervensystems bestätigt; Reizschwellen; Gesundheitsgefahren möglich | 100 - 1000 |
| Gut bestätigte Effekte, visuelle (Magnetophosphene) und mögliche Nervensystemeffekte; Berichte über beschleunigte Knochenbruchheilungen | 10 - 100 |
| Berichte über subtile biologische Wirkungen | 1 - 10 |
| Abwesenheit gut gesicherter Effekte | < 1 |

Die strahlenhygienische Bewertung der Wirkungen auf zellulärer Ebene hat heute zu der international akzeptierten Empfehlung geführt, daß die felderzeugte Körperstromdichte einen Wert von 10 mA/m² nicht wesentlich überschreiten sollte.

In letzter Zeit mehren sich experimentelle Untersuchungsergebnisse, die bei magnetischen Flußdichten unterhalb des Grenzwertes von 100 µT bis herab zu etwa 10 µT Effekte nachweisen. Diese Effekte, die bei Untersuchungen auf zellulärer Ebene, an Zellsystemen und an Säuretieren festgestellt wurden, können prinzipiell folgenden Kategorien zugeordnet werden:

- Einwirkung auf Regulations- und Boten-Systeme der Zellen (Signaltransduktion), insbesondere auf den Kalzium-Stoffwechsel;

- Veränderungen der Proteinexpression;

- Beeinflussung der Zellteilung und -differenzierung;

- komplexe physiologische Phänomene.

Die angesprochenen Untersuchungen unterscheiden sich durch Konkretheit der Versuchsbedingungen und Sorgfalt der Auswertung von vielen früheren Arbeiten. Die Bewertung der derzeitigen Befunde von Untersuchungen in Feldern unterhalb des von der Internationalen Strahlenschutzvereinigung (INIRC/IRPA) [IRPA 90] festgesetzten Grenzwertes von 100 µT führt zu dem Schluß, daß sie derzeit nicht als Begründung für eine Korrektur dieses Grenzwertes dienen können. Konkret lassen sich die Gründe wie folgt zusammenfassen:

- Keiner dieser Befunde wurde von mehreren, unabhängig voneinander arbeitenden Labors verifiziert (eine in der Wissenschaft unabdingbare Forderung).

- Es fehlt der Nachweis der pathogenetischen Rolle der Effekte (Irreversibilität oder Ursache für pathogene Veränderungen) bzw. ihre Einbindung in eindeutig pathogene Verlaufsprozesse.

Diese Schlußfolgerung unterstreicht die im Kapitel 5 ausgeführte Notwendigkeit weiterer Grundlagenforschung auf diesem Gebiet.

Im Anhang A1 sind die Ergebnisse von Experimenten der Jahre 1989 - 1995 mit sinusförmigen Feldern im 50- bzw. 60 Hz-Bereich erläutert, die sich auf Veränderungen bei Flußdichten von bzw. unterhalb von 100 µT beziehen.

#### 3.3.2 Indirekte Feldwirkungen

Nicht nur beim Menschen, sondern auch bei anderen leitfähigen Objekten, wie z. B. bei Kraftfahrzeugen, können in starken elektrischen Feldern Oberflächenladungen erzeugt werden. Diese sind um so größer, je stärker das elektrische Feld und je größer das (gegenüber Erde isolierte) Objekt ist. Bei Annäherung an solche aufgeladenen leitfähigen Objekte können Funkenentladungen zwischen Person und Objekt entstehen, oder es kann bei anschließender Berührung ein elektrischer Schlag über den Körper zur Erde abfließen. Solche Effekte, die auch durch statische Aufladung ohne eine Einwirkung elektrischer Felder auftreten können, sind aus dem Alltagsleben durchaus bekannt. Beispiele hierfür sind Entladungsströme an Kraftfahrzeugen oder an Türgriffen nach dem Begehen isolierender Bodenbeläge, deren Auswirkung von einer Wahrnehmung bis hin zu einem schmerzhaften Funkenüberschlag reichen kann. Man bezeichnet diese Vorgänge als „elektrischer Schlag“.

Tab. 3.3: Schwellenwerte für die Wirkung elektrischer Ströme, die durch den Körper fließen (aufgrund experimenteller Daten für 50 % aller Männer [Ber 88]. Zu beachten ist, daß die Stromschwellenwerte für Frauen etwa 2/3, die für Kinder nur etwa die Hälfte der angegebenen Werte für Männer betragen. Bei einem geringen Prozentsatz aller Personen liegen die Schwellenwerte deutlich niedriger

|  |  |
| --- | --- |
| Wirkung | Schwellenwerte der Stromstärke in mA |
|  | 50/60 Hz |
| Herzkammerflimmern (Einwirkdauer länger als 1 Sekunde) für 0,5 % der PersonenSchwerer elektrischer Schlag (Loslassen unmöglich)1)Schmerzhafter elektrischer Schlag, unwillkürliche Muskelkontraktion (Griffkontakt; Stromstärke, die bei 50 % aller Männer das Loslassen nicht mehr gestatten)1)Schmerzhafter elektrischer Schlag (Fingerkontakt)Elektrischer Schlag, nicht schmerzhaft (Griffkontakt)Wahrnehmung (Griffkontakt)Berührungswahrnehmung (Fingerkontakt) | 10023161,81,81,10,36 |

1) Loslaßstrom: Erfolgt der Kontakt durch das Ergreifen eines Gegenstandes, so gibt der Loslaßstrom die Stromstärke an, die bei x% einer Personengruppe ein Loslassen nicht mehr gestattet bzw. bei der (100-x)% der Personengruppe diesen Gegenstand trotz des entstehenden Muskelkrampfes gerade noch loslassen kann.

Die biologischen Auswirkungen solcher Entladungen können von der Wahrnehmung und der unwillkürlichen Muskelkontraktion bis zur Schädigung des Organismus reichen. Die Schwere der Auswirkung hängt von Faktoren ab wie dem Ableitwiderstand zur Erde, der Stärke und Dauer des Kontaktstromes sowie der Größe und Anordnung des Gegenstandes sowie der elektrischen Feldstärke. Über die Wirkungen elektrischer Ströme und die Schwellenwerte für die Auswirkungen gibt es umfangreiche Untersuchungen (siehe Übersichten [Ber. 88; WHO 84]). Einige Wirkungen elektrischer Ströme sind in Tab. 3.3 zusammengestellt. Die Stromschwellenwerte für die Wahrnehmung sind für Männer, Frauen und Kinder unterschiedlich. Die Schwellenwerte für Frauen und für Kinder liegen bei 2/3 bzw. ½ der Werte für Männer. Die Stärke der Empfindung ist um so größer, je größer das leitfähige Objekt und die herrschende Feldstärke ist. Die bei Feldstärken unterhalb von 10 kV/m durch indirekte Wirkungen hervorgerufenen Stromdichten im Körper werden als nicht gesundheitsgefährdend angesehen, können aber als Schmerz bzw. als erhebliche Belästigung empfunden werden.

Beispiele direkter und indirekter Wirkungen beim Menschen, die durch Felder von 50 Hz oder 60 Hz hervorgerufen werden, sind in Tab. 3.4 aufgeführt. Diese Tabelle ist einerseits ein Auszug aus einer umfangreicheren Übersicht [WHO 93], in der die Frequenzabhängigkeit der erwähnten Wirkungen angegeben ist; andererseits enthält Tab. 3.4 neben Daten aus Originaluntersuchungen Umrechnungen der in Tab. 3.3 angegebenen Schwellenwerte für Wirkungen elektrischer Ströme unter Berücksichtigung des Körperableitungswiderstandes des Menschen gegenüber Erde, der Eigenkapazitäten der erwähnten Fahrzeuge sowie der unterschiedlichen Stromschwellenwerte für Männer, Frauen und Kinder.

Die in Tab. 3.4 genannten Schwellenwerte für Wirkungen elektrischer Ströme konnten durch Untersuchungen in einem Hochspannungsprüffeld bestätigt werden [Hau 90]. Bei diesen Prüffeldmessungen wurden influenzierte Berührungsspannungen und -ströme an Pkw, Lkw und Bussen über einen Körperwiderstand von 1 k( gemessen. Ein wichtiges Ergebnis war dabei , daß die Ableitströme durch niedrige Reifenwiderstände bzw. bei isolierter oder nicht isolierter Fahrzeugaufstellung nicht nennenswert reduziert waren. Die Meßwerte der Ableit- oder Berührungsströme können unter Berücksichtigung der in Tab. 3.3 genannten Schwellenwerte für die Wirkungen elektrischer Ströme auf die in Tab. 3.4 genannten Schwellenwerte für Feldstärken umgerechnet werden. Diese Schwellenwerte der Tab. 3.4 sind eine wertvolle Hilfe zur Beurteilung von im Alltag gemessenen oder berechneten Feldstärken im Hinblick auf die dort genannten Wirkungen sowie auch zur Beurteilung des Grenzwertes 5 kV m für 50 Hz-Wechselfelder.

Tab. 3.4 Beispiele direkter und indirekter Wirkungen beim Menschen, die durch elektrische 50- oder 60 Hz-Felder hervorgerufen werden.

| **Wirkung (Reaktion/Schwelle)** | **Schwellenwert der Feldstärke in kV/m** |
| --- | --- |
| Schmerzhafter elektrischer Schlagbei Fingerkontakt mit einem Auto1)\* Männer: 50 % aller Männer [Cha 86, Zaf 78, IEC 87, Hau 90]\* Frauen [Cha 86, IEC 87, Dal 72, IEEE 78]\* Kinder [Cha 86, IEC 87, Dal 72, IEEE 78] | 20 - 2414 - 1610 - 12 |
| Schmerzhafter elektrischer Schlag, aber Muskelkontrollebei Griffkontakt mit einem großen Lastwagen1) (bei den angegebenen Feldstärken wird der Loslaßstrom erreicht, der bei 0,5 % der Personengruppe ein Loslassen nicht mehr gestattet)2)\* Männer [Dal 72, Zaf 78, Hau 90]\* Frauen [Dal 72, Zaf 78]\* Kinder [Dal 72, Zaf 78, IEEE 78] | 16 - 2011 - 138 - 10 |
| Belästigung\* Mittlere Belästigungsschwelle durch Funkenentladung zwischen Finger und kleinen Gegenständen durch Aufladen der Person (170 pF) [Zaf 78, WHO 84]\* Belästigungsschwelle bei 10 % aller Erwachsenen durch Funkenentladung zwischen Finger und kleinen Gegenständen durch Aufladungen der Person [Zaf 78, WHO 84] | 72 - 3,5 |
| Wahrnehmung\* Direkte Wahrnehmung des Körperableitstromes bei geerdeten Füßen [Cha 86, IEC 87, WHO 84]\* Mittlere Wahrnehmungsschwelle für Empfindungen am Kopf oder Kopfhaar bzw. Kribbeln zwischen Körper und Kleidung (Männer) [Zaf 78]\* Mittlere Wahrnehmungsschwelle bei Fingerkontakt mit einem Auto (Männer)1) [Zaf 78, Hau 90]\* Mittlere Wahrnehmungsschwelle von Funkenentladungen zwischen Finger und kleinen Gegenständen durch Aufladen der Person (170 pF) [Zaf 78, WHO 84]\* Mittlere Wahrnehmungsschwelle bei Fingerkontakt mit einem Auto (Kinder) [Dal 72, IEEE 78, Cha 86, IEC 87, Hau 90]\* Wahrnehmungsschwelle bei 10 % aller Erwachsenen durch Funkenentladung zwischen Finger und kleinen Gegenständen durch Aufladen der Person [Dal 72, Zaf 78] | > 50204 - 532 - 2,50,6 - 1,5 |

1) Auto/großer Lastwagen im elektrischen Feld einer Freileitung; die Schwellenwerte der Feldstärken, die zu den angegebenen Wirkungen führen, sind bei Berührung eines großen Lastwagens etwa um den Faktor 6 niedriger als für das Auto

2) Loslaßstrom: Vgl. S. 22

### 3.4 Funktionsbeeinflussung von Implantaten

Einflüsse elektrischer oder magnetischer Felder auf elektrische oder elektronisch betriebene Implantate können eine Funktionsstörung zur Folge haben. Beispiele für solche Implantate sind Herzschrittmacher, Defibrillatoren, Nervenstimulatoren. Cochlea-Implantate und Insulinpumpen. Als empfindlichstes medizinisches Implantat gilt der unipolare Herzschrittmacher, bei dem nur eine Elektrode vom Schrittmacher zum Herzen führt und das Körpergewebe als zweite Elektrode wirkt. Die elektromagnetische Beeinflussung eines Herzschrittmachers führt häufig zu einem Umschalten auf einen festen Rhythmus, sie reicht weiter von einer unbedeutenden einmaligen Intervallverlängerung bis hin zu „Stolperrhythmen“, wenn zum Eigenrhythmus des Patienten noch der des Herzschrittmachers hinzukommt. Eine Lebensgefährdung durch diese Störbeeinflussung ist extrem selten, sie wurde bisher nur beim Zusammentreffen von mehreren ungünstigen Konstellationen beobachtet. Wenn die Störbeeinflussung in einem physiologischen Rhythmus erfolgt und den Schrittmacher zu einem Zeitpunkt inhibiert, in dem der Patient auf den Impuls des Schrittmachers angewiesen ist, kann es zu Kreislaufbeeinträchtigungen bis hin zur Bewußtlosigkeit kommen.

Eine Störbeeinflussung von unipolaren Herzschrittmachern kann durch magneto-statische Felder mit einer Flußdichte von mehr als 300 µT oder durch 50 Hz-Wechselfelder von mehr als 20 µT bzw. 2,5 kV/m hervorgerufen werden. Auch wenn diese Werte im Nahbereich von Geräten überschritten werden können, erwächst daraus für den Herzschrittmacherpatienten bei den im Alltag üblichen Tätigkeiten keine Gefahr. Als Regel kann gelten, daß ein Abstand zwischen felderzeugendem Alltagsgerät (einschl. Mikrowellengerät) und Herzschrittmacher von 30 cm und mehr eine Funktionsbeeinflussung ausschließt. Beim Aufenthalt unter 380 kV-Freileitungen kann der Schrittmacher auf „Störbetrieb“ umschalten, deswegen ist für Herzschrittmacher-Patienten hier Vorsicht angezeigt.

## 4. Beurteilung epidemiologischer Studien

Seit 1979, als Werteheimer und Leeper [Wer 79] zum ersten Mal über einen möglichen Zusammenhang zwischen der Exposition durch elektromagnetische Felder mit Netzfrequenz und der Entstehung kindlicher Leukämie berichteten, sind mehr als 35 epidemiologische Untersuchungen durchgeführt worden, um die Vermutung zu prüfen, ob eine lang andauernde Exposition mit schwachen Magnetfeldern die Krebsentstehung fördern könnte. Die Untersuchungen über Spätwirkungen befassen sich mit Expositionen durch Felder in der Wohnumgebung, durch „Elektrogeräte“ sowie durch Felder am Arbeitsplatz. Das untersuchte Gesundheitsrisiko ist Krebs, insbesondere Leukämie, Gehirnkrebs sowie Brustkrebs. Die Ergebnisse werden als Werte des „relativen Risikos“ angegeben, das (bei Fall-Kontroll-Studien) durch Vergleich des Anteils der exponierten Personen unter den Erkrankten mit dem Anteil der exponierten Personen unter den Kontrollen berechnet wird. Die Breite der Konfidenz-Intervalle ist ein Zeichen der statistischen Unsicherheit. Eine Übersicht über die Ergebnisse einiger Studien findet sich im Anhang A2.

In den letzten Jahren sind mehrere Wissenschaftler (z. B. [Lei 93, Irn 94, Mic 93]) sowie nationale und internationale Gremien bei der Beurteilung epidemiologischer Studien im Hinblick auf ihre Aussagekraft zu dem Ergebnis gekommen, daß ein Zusammenhang zwischen einer Exposition durch magnetische Felder, wie sie im Alltag vorkommen, und einem vermehrten Auftreten von Krebs nicht erwiesen ist. Die Kritik betrifft Mängel der statistischen Auswertung, unzureichende Ermittlung der bei der Exposition vorkommenden Feldstärken (Dosis-Wirkungs-Beziehungen). Unzulänglichkeiten bei der Abgrenzung von Begleitfaktoren sowie das Fehlen von Untersuchungsergebnissen zur Erkennung eines Wirkungsmechanismus, der für die behaupteten Spätwirkungen verantwortlich sein könnte. Auch die Weltgesundheitsorganisation [WHO 87], die Internationale Strahlenschutzvereinigung [IRPA 90] und das britische nationale Strahlenschutzamt (NRPB) [Den 91] sehen einen Zusammenhang als nicht erwiesen an. Übereinstimmend wird jedoch darauf hingewiesen, daß zur endgültigen Abklärung der Frage nach Spätwirkungen weitere Forschungsarbeiten sowohl auf dem Gebiet der Epidemiologie als auch im Bereich der biologischen Wirkungsmechanismen notwendig sind.

Im Mai 1993 hat die Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierenden Strahlen (ICNIRP) die Daten über eine mögliche krebserzeugende Wirkung von magnetischen Feldern geprüft [ICNIRP 93]. Die kritische Beurteilung umfaßte alle wissenschaftliche Daten, die seit der Veröffentlichung der Grenzwerte der INIRC/IRPA [IRPA 90] veröffentlicht oder öffentlich vorgetragen wurden. Die Kommission erkannte an, daß die neuesten Daten einige Verbesserungen in der Methodik der Laborstudien und der epidemiologischen Studien sowohl bei Berufstätigen als auch bei der Bevölkerung zeigten. Nach sorgfältiger Überprüfung der Hinweise kam die Kommission zu dem Schluß, daß die auf Krebs bezogenen Daten keine Grundlage für die Bewertung des Gesundheitsrisikos bei der Exposition des Menschen durch magnetische Felder mit Netzfrequenzen darstellen. Die Kommission bestätigte die 1990 veröffentlichten vorläufigen Richtlinien der IRPA/INIRC.

## 5. Forschungsbedarf

Obgleich in den letzten Jahren eine steigende Anzahl qualifizierter wissenschaftlicher Untersuchungen zur Wirkung niederfrequenter elektromagnetischer Felder unterhalb der elektrischen Reizschwelle publiziert worden ist, unterstreicht die in Kap. 3.3 dargestellte Situation die dringende Notwendigkeit, die Grundlagenforschung auf diesem Gebiet zu fördern. Nur die Kenntnis der vielfältigen möglichen Mechanismen elektromagnetischer Felder erlaubt es, potentielle Wirkungen richtig abzuschätzen.

Bei Feldern unterhalb der Reizschwelle besteht auf folgenden Teilgebieten besonderer Forschungsbedarf:

(1) Aufklärung von Ort und Mechanismen primärer Einwirkung der magnetischen und elektrischen Komponente des niederfrequenten Feldes

 Dabei ist beispielsweise zu klären:

 - Wirkt die magnetische Komponente des Feldes unmittelbar oder aber über induzierte elektrische Felder, wie bisher angenommen wird?

 - Lassen sich „Fenster-Effekte“ bezüglich Frequenz und Feldstärke erklären, die von verschiedenen Autoren aufgrund experimenteller Befunde postuliert wurden? Wo liegen diese „Fenster“?

(2) Aufklärung intrazellulärer und physiologischer Reaktionen (Kaskaden), die zur Verstärkung der Primärreaktionen führen.

 - Welche zellphysiologischen Zustände und Funktionen begünstigen die Wirkungsmechanismen (z. B.: Mitosestadien, Sekretionsaktivitäten, synaptische Transmissionen etc.), welche Zellen sind folglich besonders empfindlich?

 - Lassen sich durch Feldeinwirkungen körperliche Veränderungen, basierend auf Beeinflussung des Immunsystems, des Kreislaufsystems, der Embryonalentwicklung oder des Nervensystems, hervorrufen?

(3) Wertung der nachgewiesenen Veränderung entsprechend ihrer potentiellen Pathogenität.

(4) Aufklärung der Feldverteilung im Inneren des Körpers bei vorgegebener elektromagnetischen Feldern der Umgebung auf anatomischer und zytologischer Ebene.

 Dabei ist beispielsweise zu klären:

 - Welche lokalen Felder sind an den Membranen einzelner Zellen zu erwarten?

 - Wie können in-vitro-Ergebnisse an Zellkulturen auf die in-vivo-Situation übertragen werden?

(5) Meta-Analyse epidemiologischer Studien.

(6) Weitere wissenschaftliche Absicherung der Begründung von Feldstärkewerten

## 6. Internationale Empfehlungen zur Expositionsbegrenzung

Im internationalen Bereich kommt der im Mai 1992 gegründeten unabhängigen Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierenden Strahlen (ICNIRP; International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) besondere Bedeutung zu. Die ICNIRP setzt die Arbeit von INIRC/IRPA fort. ICNIRP befaßt sich mit verschiedenen Aspekten des Schutzes vor nichtionisierender Strahlung, z. B. an Arbeitsplätzen oder allgemein im Alltag, und arbeitet dabei mit internationalen Gremien wie der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO) zusammen. ICNIRP hat im Mai 1993 die von INIRC/IRPA 1990 veröffentlichten Grenzwerte erneut bestätigt [ICNIRP 93].

Die verschiedenen Bereiche des Schutzes vor nichtionisierenden Strahlen werden von ICNIRP nach folgenden Gesichtspunkten bearbeitet:

- Sammlung aller verfügbaren wissenschaftlichen Informationen,

- Beurteilung gesundheitlicher Risiken,

- Aufstellung von Richtlinien für geeignete Expositionsgrenzwerte für Berufstätige und für die Bevölkerung,

- Erarbeitung von Leitfäden für praktische Maßnahmen, die zur sicheren Anwendung der verschiedenen nichtionisierenden Strahlenarten getroffen werden müssen.

Gemeinsame Arbeitsgruppen der WHO/INIRC/IRPA [WHO 84, 87] haben bei der Bewertung der gesundheitlichen Wirkungen die nachstehenden Schlußfolgerungen gezogen, die bei der Erarbeitung der Grenzwerteempfehlungen berücksichtigt wurden:

- Aus Tierversuchen geht hervor, daß die Exposition durch starke niederfrequente Felder zelluläre, physiologische und Verhaltensabläufe verändern kann. Obgleich es gegenwärtig nicht möglich ist, diese Ergebnisse auf den Menschen zu übertragen, sind diese Studien als Warnung zu verstehen, daß unnötige Expositionen durch starke Felder zu vermeiden sind.

- Nachteilige gesundheitliche Wirkungen beim Menschen im Zusammenhang mit Expositionen durch extrem niederfrequente Felder bei den normalerweise in der Umgebung oder am Arbeitsplatz anzutreffenden Feldstärken sind nicht festgestellt worden.

- Der Schwellenwert der Feldstärke, für die manche Menschen die Wahrnehmung einer Funkenentladung bei elektrischen Feldern fühlen, beträgt 3 kV/m; für die Wahrnehmung des Feldes liegt der entsprechende Wert zwischen 2 und 20 kV/m. Es gibt zur Zeit keine wissenschaftlichen Daten, aus denen hervorginge, daß die Wahrnehmung eines Feldes an sich schon eine pathologische Wirkung hervorruft.

- Trotz der Einschränkungen bei den epidemiologischen Studien, die nahelegen, daß eine erhöhte Krebsinzidenz bei Kindern und Erwachsenen besteht, die 50/60 Hz-Feldern ausgesetzt waren, können die Daten nicht außer acht gelassen werden. Bevor diese Daten als Grundlage für eine Risikoabschätzung dienen können, werden weitere Studien erforderlich sein.

- Beim gegenwärtigen Kenntnisstand ist es nicht möglich, eine definierte Stellungnahme über die Sicherheit oder die Gefahr, die mit einer Langzeitexposition durch sinusförmige elektrische Felder im Bereich von 1 bis 10 kV/m verbunden sind, abzugeben. In Ermangelung spezifischer Nachweise über bestimmte Risiken angesichts der experimentellen Ergebnisse über die biologischen Wirkungen der Exposition ist es ratsam, die Exposition, besonders für Personen der allgemeinen Bevölkerung, zu begrenzen.

Bei den Expositionsgrenzwerten wird nach INIRC/IRPA aus folgenden Gründen eine Unterscheidung zwischen den Werten für die Arbeitskräfte und für die Bevölkerung gemacht [IRPA 90]:

 Die beruflich exponierte Personengruppe besteht aus Erwachsenen, die unter kontrollierten Bedingungen während ihrer Tätigkeit exponiert werden, die dazu ausgebildet sind, eventuelle Gefährdungen wahrzunehmen, und die die entsprechenden Schutzmaßnahmen ergreifen können. Die beruflich bedingte Exposition ist begrenzt auf die Dauer des Arbeitstages oder der Arbeitsschicht und auf die Dauer der Lebensarbeitszeit.

 Die Bevölkerung enthält Individuen allen Alters und mit unterschiedlichem Gesundheitsstatus. Individuen oder Gruppen besonderer Empfindlichkeit können in der Bevölkerung eingeschlossen sein. Ihnen ist in vielen Fällen nicht bewußt, daß eine Exposition stattfindet, oder sie sind nicht bereit, irgendwelche Gefährdungen auf sich zu nehmen, die mit der Exposition in Verbindung stehen. Die Bevölkerung kann 24 Stunden pro Tag und über die ganze Lebenszeit exponiert sein. Ferner kann nicht erwartet werden, daß die Bevölkerung Wirkungen wie Belästigung Wirkungen wie Belästigungen und Schmerz akzeptiert, die von kurzzeitigen Entladungen oder durch Konktaktströme entstehen können.

Die Überlegungen waren für INIRC/IRPA die Begründung, für die Bevölkerung niedrigere Expositionsgrenzwerte als für die beruflich exponierte Population zu empfehlen.

Die strahlenhygienische Bewertung der Wirkungen auf zellulärer Ebene hat zu der international akzeptierten Empfehlung geführt, daß die felderzeugte Körperstromdichte bei beruflich Exponierten einen Wert von 10 mA/m² nicht wesentlich überschreiten sollte (vgl. Kap. 3.3.1). Für die Dauerexposition der Bevölkerung empfiehlt ICNIRP bzw. INIRC/IRPA [IRPA 90] einen Grenzwert der Stromdichte von 2 mA/m² (Sicherheitsfaktor 5 auf 10 mA/m²). Zum Auffangen räumlicher Spitzenwerte ist eine Mittelung der Körperstromdichte über Flächenelemente von 1 cm² im Gewebe ausreichend.

Die für die Beurteilung relevanten Stromdichten im Gewebe entziehen sich der einfachen meßtechnischen Erfassung. Deshalb sind für die Praxis leichter meßbare operative Meßgrößen notwendig. Im niederfrequenten Bereich sind dies die elektrische oder die magnetische Feldstärke. Die entsprechenden Grenzwerte dieser Feldstärken, die sog. „abgeleiteten Grenzwerte“, werden aus den Basis-Grenzwerten der Stromdichte so berechnet, daß sie auch unter den ungünstigsten Expositionsbedingungen (worst case) das Schutzziel gewährleisten. In Tab. 6.1 sind die abgeleiteten Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke für 50- und 60 Hz-Wechselfelder zusammengefaßt.

Bei der Ermittlung der abgeleiteten Grenzwerte muß man sich bisher noch auf einfache, elektrisch homogene, geometrische Körper beziehen (vgl. auch Kap. 3.1.2). Moderne numerische Techniken ermöglichen eine immer detailliertere Approximation des menschlichen Körpers unter Berücksichtigung einzelner Organe mit realitätsnahen, inhomogenen verteilten elektrischen Parametern. Je nach Modell können sich dabei unterschiedliche abgeleitete Grenzwerte ergeben. Die Umrechnung von Magnetfeldern in elektrische Feldstärken oder Stromdichten nimmt als worst case eine große Person an. Bei einem zur Körperachse senkrecht orientierten Magnetfeld von 50 Hz wird ein elektrisches Feld induziert, dessen Betrag bis zu 50 µV/m je µT betragen kann. Die abgeleiteten Grenzwerte sind im Einzelfall meist restriktiver als dies durch die Basis-Grenzwerte gefordert ist.

Die Annahme des homogenen Feldes ist jedoch nicht bei allen Magnetfeldquellen des Alltags erfüllt, die induzierten elektrischen Felder sind daher meistens deutlich niedriger und erstrecken sich nicht über den ganzen Körper. Für die physiologische Wirkung ist nicht das punktförmig ermittelte Magnetfeld, sondern die über eine Fläche gemittelte Magnetfeldstärke relevant. Die Beurteilung eines starken inhomogenen Magnetfeldes ist in der Weise möglich, daß die Feldstärke in einem gewissen Abstand an Punkten über einer vorgegebenen Fläche gemessen und aus den Meßwerten der Mittelwert gebildet wird. Dies kann beispielsweise wie in Tab. 2.2 im Abstand von 30 cm über einer Fläche von 100 cm² geschehen.

Tab. 6.1: Internationale Grenzwertempfehlungen für die Exposition durch elektrische und magnetische Felder von 50 und 60 Hz [IRPA 90]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Expositionscharakteristika** | **Elektrische Feldstärke in kV/m, Effektivwerte** | **Magnetische Flußdichte in mT, Effektivwerte** |
| Berufliche ExponierteGanzer ArbeitstagkurzzeitigFüße, Hände | 1030a)- (keine Angabe) | 0,55b)25 |
| BevölkerungBis zu 24 h pro Tagc)Wenige Stunden pro Tagd) | 510 | 0,11 |

a) Dieser Grenzwert gilt für eine Exposition durch elektrische Felder zwischen 10 und 30 kV/m, wenn die Expositionsdauer den Wert t≤80/E nicht überschreitet, wobei t die Expositionsdauer in Stunden pro Arbeitstag und E die elektrische Feldstärke in kV/m ist.

b) Dieser Grenzwert gilt für eine Exposition durch Magnetfelder, wenn die Expositionsdauer 2 h pro Arbeitstag nicht überschreitet.

c) Die Beschränkung gilt auch für Gebiete, bei denen erwartet werden kann, daß sich Mitglieder der Bevölkerung einen beträchtlichen Teil des Tages dort aufhalten, wie Erholungsgebiete, Versammlungsstätten und dergleichen.

d) Diese Werte können für ein paar Minuten pro Tag überschritten werden, vorausgesetzt, daß Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, um indirekte Feldeinkopplung zu vermeiden.

Diese Grenzwerte werden durch zahlreiche Versuchsergebnisse gestützt, die bei kontrollierten Laborversuchen an Freiwilligen mit Expositionszeiten zwischen 3 Stunden und 1 Woche gewonnen wurden: Es konnten keine akuten Veränderungen signifikanter Art festgestellt werden. Untersucht wurden Reaktionszeiten auf akustische und optische Reize, psychologische Faktoren, EEG, EKG, Blutdruck, Pulsfrequenz, Körpertemperatur, hämatologische Parameter, biochemische Eigenschaften des Harns sowie Enzymfunktionen und Stoffwechselfaktoren.

INIRC/IRPA weist darauf hin, daß der Grenzwert von 5 kV/m bei 50 Hz-Wechselfeldern einen wesentlichen Schutz gegen Belästigungen, verursacht durch kurzzeitige Entladungen oder fortdauernde Kontaktströme, bietet. Der Grenzwert kann allerdings die Wahrnehmung der Wirkungen elektrischer Felder nicht völlig eliminieren, da die Wahrnehmungsschwelle für einige Personen unter 5 kV/m liegt. In solchen Fällen können zusätzliche technische Maßnahmen (z. B. Erdung) eingeführt werden, um indirekte Kopplungseffekte durch Berührung geladener, nicht geerdeter Gegenstände zu vermeiden.

Für die Frequenz von 16 2/3 Hz muß die Berechnung der abgeleiteten Feldstärken aus den Basis-Grenzwerten der Stromdichte die Frequenzabhängigkeit der Feldeinkopplung berücksichtigen. Bei 16 2/3 Hz sind zur Erzeugung von 2 mA/m² im Körper dreifach höhere elektrische Feldstärken bzw. magnetische Flußdichten erforderlich wie bei 50 Hz (d. h. 15 kV/m bzw. 300 µT). Eine elektrische Feldstärke von 15 kV/m kann bei 16 2/3 Hz jedoch bereits zu Wirkungen aufgrund kurzzeitiger Entladungsströme oder fortdauernder Kontaktströme führen (vgl. auch Tab. 3.4), die für Personen der Bevölkerung nicht mehr toleriert werden können. ICNIRP empfiehlt bei der derzeitigen Überarbeitung der Grenzwertempfehlungen von INIRC/IRPA für Magnetfelder von 16 2/3 Hz daher den Grenzwert von 300 µT, für elektrische Felder aus oben genannten Gründen jedoch eine Reduktion von 15 kV/m auf 10 kV/m.

## 7. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission

### 7.1 Grenzwerte

Die Strahlenschutzkommission empfiehlt, für die Exposition der Bevölkerung durch elektrische und magnetische Felder der Frequenz 50 Hz die Grenzwertempfehlungen der ICNIRP [ICNIRP 93] anzuwenden, d. h. bei Expositionen bis zu 24 Stunden pro Tag die abgeleiteten Grenzwerte 3 kV/m bzw. 100 µT einzuhalten (vgl. Tab. 6.1). Für 16 2/3 Hz werden die derzeit bei ICNIRP diskutierten Grenzwerte von 10 kV/m bzw. 300 µT empfohlen. Bei Einhaltung dieser Grenzwerte kann davon ausgegangen werden, daß eine felderzeugte Körperstromdichte von 2 mA/m-2 nicht überschritten wird (vgl. Tab. 3.1).

Diese Grenzwerte basieren auf dem gesicherten Wissen über akute Wirkungen niederfrequenter elektromagnetischer Felder. Bei Einhaltung dieser Grenzwerte sprechen alle bisher vorliegenden Kenntnisse und Erfahrungen gegen gesundheitsschädigende Wirkungen. Zweck dieser in der internationalen Fachwelt anerkannten Grenzwerte ist es, den Gesundheits- und Belästigungsschutz sicher zu gewährleisten und damit das Schutzbedürfnis der betroffenen Bevölkerung, eingeschlossen Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit, zu berücksichtigen.

Die empfohlenen Grenzwerte bilden die Basis für die strahlenhygienische Bewertung von Anlagen, die elektrische oder magnetische Felder erzeugen. Bei der Ermittlung der Immissionen ist zu beachten, daß die Summe aller Immissionen die Grenzwerte nicht überschreiten darf. Eine kurzzeitige Überschreitung der Grenzwerte ist zulässig, vorausgesetzt, daß durch geeignete Maßnahmen gefährliche Berührungsspannungen bzw. Körperströme vermieden werden können. Bei stark inhomogenen Magnetfeldern, wie sie z. B. bei Kleingeräten auftragen (s. Tab. 2.2), bezieht sich der Grenzwert auf den im Expositionsabstand über eine Fläche von 100 cm² gemittelten Wert der magnetischen Flußdichte.

### 7.2 Zusätzliche Möglichkeiten zur Feldstärkeverringerung

Die Feldstärkegrenzwerte nach Kap. 7.1 sind so festgelegt, daß gesundheitsschädigende Wirkungen auf Personen der Bevölkerung bei ganztägigem Aufenthalt am Einwirkungsort nach heutiger wissenschaftlicher Kenntnis nicht eintreten können. Da Feldstärken unterhalb dieser Grenzwerte nach dem Stand der Wissenschaft und der Erfahrung den Menschen nicht gefährden, sind zusätzliche Maßnahmen zur Feldstärkereduktion an Anlagen und Geräten aus strahlenhygienischen Gründen nicht erforderlich.

Jedoch sollte die Tatsache nicht unberücksichtigt bleiben, daß technische Möglichkeiten zur Feldstärkeverringerung auch unterhalb der angegebenen Grenzwerte bestehen. Der Gedanke einer zusätzlichen Feldstärkeverringerung kommt Befürchtungen entgegen, durch spätere Forschungsergebnisse könnten bei kleinen Feldstärke auftretende Bioeffekte (s. Anhang A1) die bisher als gesundheitlich unbedenklich erachtet wurden, doch größere Bedeutung erlangen. Besorgnisse, daß Fehlfunktionen am Körper getragener oder implantierter medizinischer Geräte hervorgerufen werden könnten, spielen im Bereich unterhalb der Grenzwerte ebenfalls eine Rolle.

Eine zusätzliche Feldstärkereduktion kommt in erster Linie für neue Anlagen und Produkte in Frage. Für einfach anwendbare Reduktionsmaßnahmen gibt die Strahlenschutzkommission im Anhang A3 einige Hinweise.

Im Interesse des angemessenen Einsatzes von Mitteln wird häufig die Frage gestellt, welches Feldstärkeniveau das Ziel von zusätzlichen Maßnahmen zur Feldstärkeverminderung sein sollte. Für den Bereich der Bevölkerung liegen allgemein verbindliche Zahlen hierzu bisher nicht vor: internationale Organisationen haben noch keine endgültige Empfehlung abgegeben. Für die Bevölkerung ist eine untere Grenze für eine sinnvolle Feldstärkeverminderung sicher dann erreicht, wenn die durch die normalen Körperfunktionen bedingten biogenen Feldverstärkeniveaus um ein Mehrfaches unterschritten werden; noch weitergehende Feldstärkeverminderungen würden zu einem nutzlosen Aufwand führen. Für zusätzliche Maßnahmen ergibt sich nach diesem Grundsatz daher ein Ermessensspielraum, der für magnetische und elektrische Felder unterschiedlich ist.

Für magnetische Felder stellt eine Feldstärkeverminderung um eine Größenordnung unterhalb des Grenzwertes von 100 µT einen sinnvollen Ermessensspielraum dar. Die bei 50 Hz durch 10 µT induzierten Stromdichten liegen im unteren Bereich der körpereigenen Stromdichten. Fehlfunktionen am Körper getragener oder implantierter medizinischer Geräte werden erst für Stromdichten oberhalb von 20 µT (für 50 Hz) berichtet.

Für elektrische Felder kann der Ermessensspielraum kleiner angesetzt werden. Bei einer Feldstärkereduktion um etwa den Faktor 3 unterhalb des Grenzwertes können Störbeeinflussungen von unipolaren Herzschrittmachern zuverlässig ausgeschlossen werden. Die im Kopf und Rumpf des Körpers bei einer elektrischen Feldstärke von 1,5 kV/m - 2 kV/m noch erzeugten Stromdichten liegen im unteren Bereich der körpereigenen Stromdichten. Die Wahrnehmungsschwellen werden hierbei nur noch bei ca. 10 % aller Personen überschritten. Aus den genannten Gründen wird ein Ermessensspielraum bis zu einem Faktor 3 unterhalb des Expositionsgrenzwertes von 5 kV/m als ausreichend für zusätzliche Feldstärkeverminderungen angesehen.

Des öfteren erhobene weitergehende Forderungen zur Feldstärkeverminderung wie

- Einhaltung eines Mindestabstandes von Geräten im Haushalt und Büro,

- Einbau von Netzfreischaltern,

- Einbau von aktiven Kompensationseinrichtungen,

- Änderung von Hausverteilungen

sind in diesem Sinne nicht als sinnvoll anzusehen.

## 8. Zusammenfassung

Eine Exposition der Bevölkerung durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder erfolgt im wesentlichen durch die von Versorgungsleitungen ausgehenden Felder sowie durch elektrische Geräte und Versorgungsleitungen im Bereich der Wohnungen. Elektrische Feldstärken im Nahbereich von Freileitungen können mit 6 kV/m, 4 kV/m und 2 kV/m für 380 kV-, 220 kV- und 110 kV-Leitungen angesetzt werden. Mit zunehmender Entfernung von der Trassenmitte nehmen die Feldstärken stark ab: Eine Feldstärke von 1 kV/m wird für das 380 kV/-System bei etwa 40 m, für das 220 kV-System bei etwa 20 m und für das 110 kV/-System bei etwa 10 m Abstand unterschritten. Da die Geräte des Alltags nur mit 220 V bzw. 380 V betrieben werden, ist das in ihrer Umgebung erzeugte elektrische Feld meistens deutlich kleiner als bei Hochspannungsleitungen. Unmittelbar an der Geräteoberfläche kann die elektrische Feldstärke zwischen 10 V/m und 100 V/m liegen.

Die magnetischen Flußdichten im Nahbereich von Freileitungen betragen bei halber Maximallast der Leitungen etwa 15 µT bei 380 kV-, etwa 8 µT bis 10 µT bei 220 kV- und etwa 6 µT bei 110 kV-Leitungen. In seitlicher Entfernung zur Leitungstrasse fallen die magnetischen Flußdichten stark ab: 2 µT bis 3 µT werden für 380 kV-Systeme bei etwa 50 m, für 220 kV-Systeme bei etwa 30 m und für 110 kV-Systeme bei etwa 15 m Abstand unterschritten. Bei Erdkabeln liegen die magnetischen Flußdichten direkt über dem Kabel im Abstand von 1 m etwa zwischen 10 µT und 35 µT je nach Strombelastung. Im Abstand von 5 m ist die Flußdichte unter 1 µT abgefallen. Die magnetische Flußdichte in der Nähe von Transformatoren hängt stark von der Leistung und von der Konstruktion der Stromleiter ab. Erfahrungsgemäß ist die Flußdichte in einem Abstand von 1 m bis 2 m auf 1 µT und weniger abgefallen. Die magnetischen Flußdichten in der Umgebung von Geräten des Alltags können direkt an deren Oberfläche beachtliche Werte annehmen, insbesondere in 30 cm Entfernung weist kein Gerät eine Feldstärke mit einer Flußdichte von mehr als 30 µT auf, im Mittel liegen die Flußdichten unter 1 µT. Im Abstand von 1 m liegen die magnetischen Flußdichten im Mittel etwa 3 Größenordnungen unterhalb der Grenzwerte.

Zu den biologischen Wirkungen elektrischer Felder gehören Aufladungseffekte an der Körperoberfläche, die über Berührungsrezeptoren in der Haut wahrgenommen werden können. Eine Feldstärke von 1 kV/m wird von etwa 1 % der Versuchspersonen, 10 kV/m von etwa 20 % und 20 kV/m von etwa 50 % der Versuchspersonen wahrgenommen. Die Wahrnehmung elektrischer Felder durch Oberflächeneffekte wird gelegentlich als Belästigung und Beeinträchtigung des Wohlbefindens empfunden. Bei leitfähigen Objekten, wie z. B. Autos, können in starken elektrischen Feldern Oberflächenladungen erzeugt werden. Bei Annäherung an solche aufgeladenen leitfähigen Objekte können Entladungen zwischen Personen und Objekten entstehen; es kann bei Berührung ein elektrischer Strom durch den Körper zur Erde abfließen. Die biologischen Auswirkungen solcher Entladungen können von der Wahrnehmung und der unwillkürlichen Muskelkontraktion bis zur Schädigung des Organismus reichen. Die Stromschwellenwerte für die Wahrnehmung sind für Männer, Frauen und Kinder unterschiedlich; die Schwellenwerte für Frauen und Kinder liegen bei 2/3 bzw. ½ der Werte für Männer. Die bei Feldstärken unterhalb von 10 kV/m durch solche indirekten Wirkungen hervorgerufenen Stromdichten im Körper werden als nicht gesundheitsgefährdend angesehen, können aber als Schmerz bzw. als erhebliche Belästigung empfunden werden. Die Belästigungsschwelle bei 10 % aller Personen für Stromentladungen zwischen Finger und kleinen Gegenständen infolge Aufladungen der Person liegt bei 2 kV/m bis 3 kV/m, die Wahrnehmungsschwelle liegt etwa um den Faktor 2 bis 3 niedriger.

Zeitlich veränderliche Magnetfelder erzeugen in biologischen Objekten elektrische Wirbelfelder, die vergleichbar den mit Elektroden applizierten elektrischen Feldern wirken und z. B. Nerven- und Muskelzellen erregen können, wenn bestimmte Schwellenwerte überschritten werden. Zur Erzeugung von Stromdichten von etwa 1 mA/m² für den Kopf sind etwa 300 µT bis 600 µT erforderlich: für periphere Bereiche des Rumpfes oder für den Herzbereich genügen bereits 100 µT bis 200 µT, um diese Stromdichte zu erzeugen. Zum Vergleich: die vom Herzen und Gehirn erzeugten elektrischen Stromdichten bzw. Feldstärken an der Peripherie des Körpers liegen in der Größenordnung von etwa 0,2 mA/m² bis 10 mA/m² bzw. 1 mV/m bis 50 mV/m. Ist ein von außen appliziertes Feld so stark, daß sich das Membranpotential signifikant ändert, so kann es in Muskel- oder Nervenzellen Erregungen auslösen. Dies führt unmittelbar zu einer biologischen Antwortreaktion - bei Muskelzellen z. B. zu Kontraktionen und Krämpfen.

Die Beurteilung direkter elektrischer und magnetischer Feldwirkungen auf den Körper folgt einem Stufensystem der Wirksamkeit unterschiedlicher Stromdichtebereiche. Die Gefahrenschwellen liegen bei Körperstromdichten in Bereichen oberhalb von 100 mA/m². Im Bereich von 100 mA/m² bis 1000 mA/m² können die Reizschwellen im erregbaren Gewebe erreicht werden. Die Strahlenhygienische Bewertung der Wirkungen auf zellulärer Ebene und einer Reihe gut bestätigter Effekte - visuelle Effekte und mögliche Nervensystemeffekte - hat heute zu der international akzeptierten Empfehlung geführt, daß die felderzeugte Körperstromdichte einen Wert von 10 mA/m² nicht signifikant überschreiten sollte. In letzter Zeit mehren sich experimentelle Untersuchungen auf zellulärer Ebene, die dem Stromdichtebereich von 1 mA/m² bis 10 mA/m² zuzuordnen sind. Bei den dabei festgestellten Effekten handelt es sich beispielsweise um Einwirkungen auf Regulations- und Boten-Systeme der Zelle (Signaltransduktion), Beeinflussung der Zellteilung und Zelldifferenzierung und um komplexe physiologische Phänomene. Es liegen jedoch widersprüchliche Befunde unterschiedlicher Labors vor, und es fehlt der Nachweis der pathogenen Rolle dieser Effekte. Weitere Grundlagenforschung auf diesem Gebiet ist notwendig. Die elektromagnetische Beeinflussung eines Herzschrittmachers führt häufig zu einem Umschalten auf einen festen Rhythmus; eine Lebensgefährdung durch eine Störbeeinflussung ist extrem selten. Eine Störbeeinflussung von unipolaren Herzschrittmachern kann durch 50 Hz-Wechselfelder von mehr als 20 µT bzw. 2,5 kV/m hervorgerufen werden. Als Regel kann gelten, daß ein Abstand zwischen felderzeugendem Alltagsgerät und Herzschrittmacher von 30 cm und mehr eine Funktionsbeeinflussung ausschließt. Beim Aufenthalt unter 380 kV-Freileitungen kann der Schrittmacher auf Störbetrieb umschalten, deswegen ist für Herzschrittmacherpatienten hier Vorsicht angezeigt.

1979 wurde zum ersten Mal über einen möglichen Zusammenhang zwischen der Exposition durch elektromagnetische Felder mit Netzfrequenz und der Entstehung kindlicher Leukämie berichtet. Seither sind mehr als 35 epidemiologische Untersuchungen durchgeführt worden, um die Vermutung zu prüfen, ob eine langandauernde Exposition mit schwachen Magnetfeldern die Krebsentstehung fördern könnte. In den letzten Jahren sind mehrere Wissenschaftler sowie nationale und internationale Strahlenschutzgremien bei der Beurteilung epidemiologischer Studien im Hinblick auf ihre Aussagekraft zu dem Ergebnis gekommen, daß ein Zusammenhang zwischen einer Exposition durch magnetische Felder, wie sie im Alltag vorkommt, und einem vermehrten Auftreten von Krebs nicht erwiesen ist.

Internationale Empfehlungen sind durch die unabhängige Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierenden Strahlen (ICNIRP) abgegeben worden. ICNIRP empfiehlt, daß die durch Exposition mit elektrischen oder magnetischen Feldern mit Netzfrequenz erzeugten Körperstromdichten bei beruflich Exponierten einen Grenzwert von 10 mA/m² nicht wesentlich überschreiten sollten. Für die Dauerexposition der Bevölkerung wird ein Grenzwert der Stromdichte von 2 mA/m² (Sicherheitsfaktor 5 auf 10 mA/m²) empfohlen. Für die Praxis werden Grenzwerte leichter meßbarer Größen angegeben. Im niederfrequenten Bereich sind dies die elektrische und die magnetische Feldstärke. Für die Dauerexposition durch elektrische und magnetische Felder gelten folgende Grenzwertempfehlungen: 5 kV/m für die elektrische Feldstärke und 100 µT für die magnetische Belästigungen, verursacht durch kurzzeitige oder andauernde Kontaktströme, eliminiert jedoch nicht die Wahrnehmung elektrischer Felder, da die Wahrnehmungsschwelle unterhalb von 5 kV/m liegen kann.

Die Strahlenschutzkommission empfiehlt, bei Exposition der Bevölkerung durch elektrische und magnetische Felder der Energieversorgung und -anwendung die international empfohlenen Grenzwerte der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierenden Strahlen (ICNIRP) anzuwenden. Diese Grenzwerte von 5 kV/m bzw. 100 µT für die Frequenz 50 Hz basieren auf dem gesicherten Wissen über akute Wirkungen niederfrequenter elektromagnetischer Felder. Bei Einhaltung dieser Grenzwerte sprechen alle bisher vorliegenden Kenntnisse und Erfahrungen dafür, daß keine gesundheitsschädigenden Wirkungen auftreten. Da Immissionen unterhalb der Grenzwerte nach dem Stand der Wissenschaft und der Erfahrung den Menschen nicht gefährden, sind aus strahlenhygienischer Sicht keine zusätzlichen Feldstärkeverminderungen an Anlagen und Geräten erforderlich. Jedoch sollte die Tatsache nicht unberücksichtigt bleiben, daß technische Möglichkeiten zur Feldstärkeverminderung auch unterhalb der angegebenen Grenzwerte bestehen. Dem Gedanken einer zusätzlichen Feldstärkeverminderung liegt u. a. die Berücksichtigung von Befürchtungen zugrunde, durch spätere Forschungsergebnisse könnten bei kleinen Feldstärken auftretende Bioeffekte, die bisher als gesundheitlich unbedenklich erachtet wurden, größere Bedeutung erlangen. Für einfache Reduktionsmaßnahmen gibt die Strahlenschutzkommission einige Hinweise.

## 9. Literatur

[Ber 88] Bernhardt, J. H.:

 The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects: Rad. Environ, Biophys. 27: 1 - 27, 1988

[Cha 86] Chatterjee, I., Wu, D., Ghandi, O. P.:

 Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazard analysis in the VLF-MF band: IEEE Trans. Biomed 33 (5): 487 - 495, 1986

[Cri 93] Cridland, N. A.:

 Electromagnetic fields and cancer. A review of relevant cellular studies; NRPB R-256, Chilton 1993

[Del 72] Dalziel, C. F.:

 Electric shock hazard, IEEE Spectrum 2: 41 - 50, 1972

[Den 91] Dennis, J. A., Muirhead, C. R., Ennis, J. R.:

 Epidemiological studies of exposures to electromagnetic fields: I. General health and birth outcome, II. Cancer, J. Radiol. Prot. 11: 3 - 12 and 13 - 25, 1991

[Hau 90] Haubrich, H.-J., Dickers, K., Lange, G.:

 Influenzwirkung auf Personen und Fahrzeuge im elektrischen 50-Hz-Feld; Elektritzitätswirtschaft 89 [6]: 280 - 286, 1990

[ICNIRP 93] Pressemitteilung vom 12. Mai 1993

 (zu erhalten bei Dipl.-Ing. R. Matthes, Wissenschaftlicher Sekretär ICNIRP, Institut für Strahlenhygiene, Bundesamt für Strahlenschutz, Postfach 11 08, 85758 Oberschleißheim).

[IEC 87] International Electrotechnical Commission (IEC):

 Effects of currents passing through the human body; IEC-Report 479-2, Genf, 1987

[IEEE 78] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE):

 Electric and magnetic fielt coupling from high voltage power transmission lines - Classification of short-term effects of people: IEEE Trans. Power App. Sys. 97: 2243-2252, 1978

[Irn 94] Irnich, W.:

 Kinderkrebs und Magnetfelder - Erkenntnisse aus der Feychting-Ahlbom-Studie, in: Kinderarzt und Umwelt, Jahrbuch 1993/1994, Hrsgbr: K. E. v. Mühlendahl, M. Otto, Alete Wissenschaftlicher Dienst: 167 - 177, 1994

[IRPA 90] International non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association (INIRC/IRPA):

 Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields; Health Phys. 58: 113 - 122, 1990

[Kau 80] Kaune, W. T., Phillips; R. D.:

 Comparison of the coupling of grounded humans, swine and rats to vertical 60 Hz-electric fields, Bioelectromagnetics 1: 117 - 129, 1980

[Lei 93] N. Leitgeb:

 Analyse epidemiologischer Studien über magnetfeldbedingte Krebsrisiken, in:

 Biomedizinische Technik 38: 111 - 116, 1993

[Man 91] Maniewski, R.:

 Magnetic studies on mechanical activity of the heart, Critical Reviews;

 Biomedical Engineering 19: 203 - 229, 1991

[Mic 93] Michaelis, J.:

 Die Studie von M. Feychting und A. Ahlbom „Magnetic fields and cancer in people residing near Swedish high voltage power lines“ in epidemiologischer Bewertung: ÖZE, Jahrg. 46, Heft 4, April 1993

[Pos 86] Postow, E., Swicord, M. L.:

 Modulated fields and „window“ effects; in: CRC-Handbook of Biological effects of Electromagnetic Radiation, ed. Polk, C. and Postow, E.; Boca Raton, Florida, Chemical Rubber Company-Press: 425 - 460, 1986

[Sak 93] Sakamoto, S.; Hagino, N., Winters, W. D.:

 Invivo studies of the effect of magnetic fielt exposure on ontogeny of choline acetyltransferase in the rat brain; Bioelectromagnetics 14: 373 - 381, 1993

[Wer 79] Wertheimer, N.; Leeper, E.:

 Electrical wiring configuration and childhood cancer; Am J EP 109, 273, 1979

[WHO 84] World Health Organization (WHO):

 Environmental health criteria 35: Extremely low frequency (ELF) fields; WHO Geneva 1984

[WHO 87] World Health Organization (WHO):

 Environmental health criteria 69: Magnetic fields: WHO, Geneva 1987

[WHO 93] World Health Organization (WHO):

 Environmentl health criteria 137: Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). WHO, Geneva 1993

[Zaf 78] Zaffanella, L. E., Deno, D. W.:

 Electrostatic and electromagnetic effects of ultra-high-voltage transmission lines; Electric Power Research Institute, Palo Alto/Florida, Final Report EPRI EL-802: 1978

## Anhang A1

### A1 Beispiele von Untersuchungen der Jahre 1989 - 1995 mit schwachen, sinusförmigen 50/60 Hz-Feldern (B ≤100 µT)

Die magnetischen Flußdichten, bei denen die Auslösung der Reaktionen

- Einwirkungen auf Regulations- und Boten-Systeme der Zellen, insbesondere auf den Kalzium-Stoffwechsel,

- Veränderungen der Proteinexpression,

- Beeinflussung der Zellteilung und -differenzierung und

- komplexe physiologische Phänomene

beobachtet wurde, liegen weit über denen, die für die Umgebung des menschlichen Alltags typisch sind (0,1 - 0,3 µT).

So fand Blackman Differenzierungseffekte an Zellkulturen bereits ab 10 µT [Bla 93.1/Bla 93.2] wobei jedoch, den in Tab. A1.1 zitierten Arbeiten zufolge, die Ergebnisse durchaus differenziert zu betrachten sind. Liburdy glaubt nachweisen zu können, daß bereits ab Flußdichten über 1,2 µT der vermutete kanzerostatische Einfluss des Melatonins aufgehoben wird [Lib 93]. Dieser Befund ist im Zusammenhang mit anderen Experimenten [Mat 93, Kat 93] zu sehen, die einen Einfluß von Feldern einer Flußdichte von 5 µT auf das Pinealocyten-Volumen und den Melatonin-Spiegel nach Langzeitbeeinflussung von Ratten befanden. Noch ist die Rolle des Melatonins bei der Kanzerogenese allerdings unklar.

Einige Autoren vertreten die Meinung, daß das elektromagnetische Feld selbst nicht in der Lage ist, Krebs zu erzeugen, jedoch als Promotor und/oder Copromotor der Kanzerogenese wirken könnte. Einwirkungen schwacher elektromagnetischer Felder auf die natürlichen Reparaturprozesse sind denkbar, die die Wirkung verschiedener kanzerogener Agentien unserer Umgebung kompensieren. Cain konnte z. B. eine Steigerung der Wirkung des Kanzerogens TPA (12 O-tetra decanoylphorbol-13-acetat) bei Fibroblasten nachweisen, allerdings erst bei Feldern um 100 µT [Cai 93]. Rannug fand auch bei Dauerbestrahlung von Ratten über 12 Wochen bei Flußdichten bis 50 µT keinen Einfluß auf die Effektivität von Kanzerostatika [Ran 93]. Löscher stellte fest, daß nach Induktion von Mammatumoren bei weiblichen Ratten durch das chemische Karzinogen DMBA (7,12-Dimethylbenzanthracen) bei der Gruppe der magnetfeldexponierten Ratten (B O 100 µT die Inzidenz palpierbaren und bei der Sektion makroskopisch erkennbarer Tumoren nach 3 Monaten um 50 % höher lag als bei der nicht magnetfeldexponierten Kontrollgruppe; weiterhin zeigte die erste Gruppe ein beschleunigtes Tumorwachstum und eine höhere Zahl bösartiger Tumoren [Lös. 93, 95].

Die Felder wirken offensichtlich sehr differenziert auf das Stoffwechselgeschehen. Dies zeigen die gefundenen Enzymänderungen in Zellen von langzeitbehandelten Hühnerembryonen ab 4µT [Mos 92, 93] einerseits und der fehlende Nachweis von Effekten bei der Untersuchung der glykolytischen Enzyme menschlicher Erythrozyten [Dac 93] bis in den Bereich von 200 µT andererseits. Immer wieder wird über Einflüsse auf den Ca-Transport berichtet, der jedoch zuvor durch Mitogene aktiviert sein muß [Lin 93]. Die Beeinflussung des zellulären Stoffwechsels dieses Ions, das als „sekundär Botenstoff („second messenger“) zur Übertragung von Rezeptor-Informationen an den Apparat der Proteinsynthese bekannt ist, wird besondere Aufmerksamkeit beschenkt.

Sehr heterogen und widersprüchlich sind Messungen verschiedener physiologischer Parameter. Geringfügige reversible Änderungen des Elektroencephalogrammes (EEG) wurden beim Menschen bei 60 Hz-Feldern mit Flußdichten um 1250 µT beobachtet, jedoch ist die physiologische oder gar pathogene Wertigkeit dieser Befunde sehr umstritten. Widersprüchlich und schwer bewertbar sind auch die Untersuchungen der Cerebrospinal-Flüssigkeit und das Auftreten von Herzarrhythmien [Sak 93, See 89, Kor 93].

Tab. A1.1 Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung schwacher 50/60 Hz-Felder auf Zellen und Organismen

| **Erstautor** | **Flußdichte [µT]** | **Expositionsdauer** | **Untersuchungsobjekt** | **beobachteter Effekt** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Blackman et al.[Bla 93.1] | 5-45 | 10 h | Nervenzellen (Zellinie: PC-12) | Ab 10 µT wird chemisch induzierte Neuritenbildung gehemmt. |
| Blackman et al.[Bla 93.2] | 0,4-40 | 22 h | Nervenzellen (Zellinie: PC 12) | Ab 22 µT induziert das Feld direkt die Neuritenbildung |
| Cain et al.[Cai 93] | 100 | 28 d (je: 4 x 1 h) | Fibroblasten (Zellinie: C3H/10T1/2) | Cancerogene Wirkung von TPA wird gesteigert (Copromotor-Wirkung) |
| Dache et al.[Dac 93] | 0,2-200 | bis 4 h | menschliche Erythrozyten | Kein signifikanter Einfluß auf glykolytische Enzym-Aktivitäten |
| Dowman et al.[Dow 89] | 10-90 | 3 Wochen (10h/d) | Affen (Macaca nemenstrina) | Vermindert die Amplitude später somatosens. evozierter Potentiale |
| D’Agruma et al.[D’Ag 93] | 0,2-200 | permanent | Plasmide mit humanen v-ras Onkogenen in E.coli | Kein genotoxischer Effekt nachweisbar |
| Kato et al.[Kat 93] | 1-250 | 6 Wochen | Ratten | Ab 5 µT signifikant geringerer Melatoninspiegel |
| Korpinen et al.[Kor 93] | 1-15 | Arbeitszeit | „transmission line workers“ | Im Vergleich mit Kontrollpersonen häufiger Extrasystolen und Arrhythmen während des Feldeinflusses |
| Liburdy et al.[Lib 93] | 1,2 | 6d | Mama-Carcinom-Zellen (MCF-7) | Hebt Melatonin-bedingte Wachstumshemmung auf, 0,24 µT ist ohne Wirkung |
| Lindström et al.[Lin 93] | 100 | Sofort-Wirkung | T-Lymphozyten (Zellinie Jurkat), Macrophagen | Löst Calzium-Peaks aus, ähnlich wie CD3-Antikörper |
| Matsushima et al.[Mat 93 | 5 | 6 Wochen | Ratten | Das Feld beeinflußt die natürliche Tag-Nacht-Größen-Variation der Pinealocyten |
| Moses et al.[Mos 92, Mos 93] | 4 | 4-15 d | Hühner-Embryonen | Veränderung von Nucleosidasen, Achesterase und alk. Phosphatasen |
| Nafziger et al.[Naf 93] | 1-10 | 7d | embryon. Lungen-Fibroblasten des chines. Hamsters | Keine Veränderungen und DNA-Mutationen nachweisbar |
| Novelli et al.[Nov 91 | 2-200 | permanent | Saccharomyces cerevisae | Keine Genom-Veränderung beobachtet |
| Rannug et al.[Ran 93] | 0,5-50 | 12 Wochen | Ratten | Kein Einfluß auf cancerogene Wirkung von Diethylnitrosamid |
| Sakamoto et al.[Sak 93] | 50 | 12-20d permanent | trächtige Ratten | Kein Einfluß auf Acetylchol.-Transferase im Gehirn der Embryonen und Neugeborenen |
| Seegal et al.[See 89] | 10-90 | 21d | Affen (Macaca nemenstrina) | Ab 30µT verminderter Homovalin-Säure- und Serotonin-Gehalt in Cerebrospinal-Flüssigkeit nachgewiesen |
| Löscher et al[Lös 93, 95] | 100 | 91d | weibliche Ratten  | Kanzerogene Wirkung von DMBA wird signifikant gesteigert (Promotor- und /oder Copromotor der Kanzerogenese) |

Literatur

[Bla 93.1] Blackman, C. F., Benane, S. G., House, D. E., Pollock, M. M.:

 Action of 50 Hz magnetic fields on neurite outgrowth in pheochromecytoma cells; Bioelectromagnetics 14: 273 - 286, 1993

[Bla 93.2] Blackman, C. F., Benane, S. G., House, D. E.:

 Evidence for direct effect of magnetic fields on neurite outgrowth; FASEB Journal 7: 801 - 806, 1993

[Cai 93] Cain, C. D., Thomas, D. L., Adey, W. R.:

 60 Hz magnetic field acts as co-promoter in focus formation of C3H/10T1/2 cells; Carcinogenesis 14: 955 - 960, 1993

[Dac 93] Dacha, M., Accorsi, A., Pierotti, C., Vetrano, F., Mantovani, R., Guidi, G., Conti, R., Nicolini, P.:

 Studies on the possible biological effects of 50 Hz electric and or magnetic fields - evaluation of some glycolytic enzymes, glycolytic flux, energy and oxido-reductive potentials in human erythrocytes exposed invitro to power frequency fields; Bioelectromagnetics 14: 383 - 391, 1993

[D’Ag 93] D’Agruma, L., Colosimo, A., Angeloni, U., Novelli, G., Dallapiccola, B.:

 Plasmid DNA and low-frequency eletromagnetic fields, Biomedicine & Pharmacotherapy 47: 101 - 105, 1993

[Dow 89] Dowman, R., Seegal, R. F., Wolpaw, J. R.:

 Chronic exposure of primates to 60 Hz electric and magnetic fields (I, II, III), Bioelectromagnetics 10: 227, 289, 303, 1989

[Kat 93] Kato, M., Honma, K., Shigemitsu, T., Shiga, Y.:

 Effects of exposure to a circularly polarized 50 Hz magnetic field on plasma and pineal melatonin levels in rats; Bioelectromagnetics 14: 97 - 106, 1993

[Kor 93] Korpinen, L., Partanen, J., Uusitalo, A.:

 Influence of 50 Hz electric and magnetic fields on the human heart; Bioelectromagnetics 14: 329 - 340, 1993

[Lib 93] Liburdy, R. P., Sloma, T. R., Sokolic., R., Yaswen., P.:

 ELF magnetic fields, breast cancer, and melatonin - 60 Hz fields block melatonin’s oncostatic action on ER+ breast cancer cell proliferation; Journal of Pineal Research 14: 89 - 97, 1993

[Lin 93] Lindström, E., Lindström, P., Berglund, A., Hansson, K., Lundgren, E.:

 Intracellular calcium by a weak 50 Hz magnetic field: J. Cell Physiol. 156: 395 - 398, 1993

[Lös 93] Löscher, W., Mevissen, M., Lehmacher, W., Stamm, A.:

 Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field: Cancer Letters 71: 75 - 81, 1993

[Lös 95] Löscher, W., Baum, A., Mevissen, M., Kamino, K., Mohr, U.:

 A histopathological study on alterations in DMBA - induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 µT magnetic field exposure; Carcinogenesis 16(1): 119 - 125, 1995

[Mat 93] Matsushima, S., Sakai, Y., Hira, Y., Kato, M., Shigemitsu, T., Shiga, Y.:

 Effect of magnetic field on pineal gland volume and pinealocyte size in the rat; Journal of Pineal Research 14: 145 - 150, 1993

[Mos 92] Moses, G. C., Martin, A. H.:

 Effects of extremely low-frequency electromagnetic fields on 3 plasma membrane-associated enzymes in early chicken embryos; Biochemistry International 28: 659 - 664, 1992

[Mos 93] Moses, G. C., Martin, A. H.:

 Effect of magnetic fields on membrane associated enzymes in chicken embryos, permanent or transient?; Biochemistry and Molecular Biology International 29: 757 - 762, 1993

[Naf 93] Nafziger, J., Desjobert, H.; Benamar, B., Guilosson, H. H., Adolphe, M.:

 DNA mutations and 50 H z electromagnetic fields; Bioelectrochemistry and Bioenergetics 30: 133 - 141, 1993

[Nov 91] Novelli, G., Gennarelli, M., Potenza, L., Angeloni, P., Dallapiccola, B.:

 Study of the effects on DNA of electromagnetic fields using clamped homogeneous electric field gel electrophoresis; Biomedicine & Pharmacotherapy 45: 451 - 454, 1991

[Ran 93] Rannug, A., Holmberg, B., Mild, K. H.:

 A rat liver foci promotion study with 50 Hz magnetic fields; Environmental Research 62: 223 - 229, 1993

[Sak 93] Sakamoto, S., Hagino, N., Winters, W. D.:

 Invivo studies of the effect of magnetic field exposure on ontogeny of choline acetyltransferase in the rat brain; Bioelectromagnetics 14, 373 - 381, 1993

[See 89] Seegal, R. F., Wolpaw, J. R., Dowman, R.:

 Chronic exposure of primates to 60 Hz electric and magnetic fields. II. Neurochemical effects; Bioelectromagnetics 10: 289 - 301, 1989

## Anhang A2

### A2 Darstellung einzelner epidemiologischer Studien und deren Bewertung

In diesem Bericht werden elf epidemiologische Studien berücksichtigt, deren Charakteristika in Tab. A 2.1 aufgeführt sind. Angeregt durch die Studie von Wertheimer und Leeper aus dem Jahre 1979 [Wer 79] haben verschiedene Gruppen versucht, ebenfalls der Fragestellung nach dem Zusammenhang zwischen Magnetfeldern und Krebs im Kindesalter nachzugehen. Aus der gleichen Region (Denver, Colorado) stammt die Studie von Savitz et. al. [Sav 88]. Zwei Arbeiten weisen Besonderheiten auf: Myers et. al. [Mye 90] haben Leukämien und Lymphome nur gemeinsam betrachtet, Coleman et. al. [Col 89] untersuchten den Einfluß des Vorhandenseins von Transformatoren in der Nähe der Wohnung. Die Arbeit von Lin und Lu liegt nur als Kurzfassung vor [Lin 90]. Die finnische Studie [Ver 93] ist die erste Kohortenstudie zur Frage eines Zusammenhangs zwischen der Exposition durch Freileitungen und einem veränderten Erkrankungsrisiko. Neben anderen Autorengruppen [OTA 89], [Gor 90], [EPA 90] hat das National Radiological Protection Board von Großbritannien eine gemeinsame Bewertung der ersten acht hier betrachteten Studien vorgenommen [NRPB 92]; die neueren Arbeiten von Feychting und Ahlbom [Fey 92] sowie von Olsen et. al. [Ols 93] konnten in der NRPB-Arbeit noch nicht berücksichtigt werden. Die Feldstärken, bei denen die epidemiologischen Studien durchgeführt wurden, liegen um mehrere Größenordnungen unter den Schwellenwerten für die in der Literatur berichteten biologischen Wirkungen in vitro und im Tierversuch.

Die Ergebnisse dieser epidemiologischen Studien (Tab. A 2.2) sind im Hinblick auf einen möglichen kausalen Zusammenhang zwischen Magnetfeldern und Krebs im Kindesalter vor dem Hintergrund folgender Fragestellungen zu bewerten:

- Sind die Ergebnisse reproduzierbar?

- Sind die Ergebnisse konsistent?

- Liegt eine Dosis-Wirkungs-Beziehung vor?

- Sind die Ergebnisse biologisch plausibel?

Reproduzierbar ist das Ergebnis, daß keine dieser Studien außer der ersten [Wer 89] ein signifikant von 1 abweichendes relatives Risiko ergeben hat. Arbeiten, die eine nicht signifikante Risikoerhöhung ergeben, sind jedoch in der Mehrheit. Leitgeb [Lei 93] stellte fest, daß die Ergebnisse zu Widersprüchen führen. In den schwedischen Studien fanden Feychting und Ahlbom [Fey 92] eine nicht signifikante Risikoerhöhung für Leukämie, während Tomenius [Tom 86] eine nicht-signifikante inverse Beziehung feststellte. Umgekehrt war es bei den Hirntumoren, die nach Feychting und Ahlbom seltener als nach Tomenius, jedoch häufiger als beim Referenzkollektiv auftraten. Bemerkenswert ist auch der Gegensatz, daß Savitz und Mitarbeiter [Sav 88] ein vermehrtes Auftreten von Kinderkrebs bevorzugt in Nicht-Einfamilien-Häusern und bei sozial Schwächeren fanden, während Feychting und Ahlbom berichteten, daß das Kinderkrebsrisiko in Einfamilienhäusern dreifach höher, das Leukämierisiko fünffach höher als in Appartementhäusern war. Auffällig ist bei den Studien, die sich nicht nur auf eine spezielle Krebsart beschränken, daß das gesamte Krebsrisiko stets deutlich niedriger bzw. normal ist, während ein spezielles Risiko höher liegt [Irn 94].

Bis heute gibt es keinen signifikanten Beleg für die Manifestation einer Dosis-Wirkungs-Beziehung. Allgemein wird als Hypothese angenommen, daß nicht Magnetfeldspitzen, denen der Körper kurzfristig ausgesetzt ist, sondern Langzeitexpositionen durch solche Felder schädigend wirken. In einer jüngst erschienenen Arbeit von Olsen und Mitarbeitern [Ols 93] wird jedoch berichtet, daß für das Magnetfeld-Zeit-Produkt geringere Korrelationen existieren als für die Magnetfeldamplitude allein ohne Berücksichtigung der Aufenthaltsdauer. Einen Hinweis auf demographische Einflüsse gibt die Feychting-Ahlbom-Studie [Fey 92], nach der die an Leukämie erkrankten Kinder, die von Geburt bis zur Diagnosestellung im untersuchten Korridor gewohnt hatten, kein erhöhtes Leukämierisiko besaßen im Gegensatz zu den Kindern, die nach Geburt zugezogen oder vor Diagnosestellung weggezogen waren. Dies deckt sich mit den Befunden von Kinlen und Mitarbeitern [Kin 90, 91a, 91b, 93], die in Studien an verschiedenen Bevölkerungsgruppen reproduzierbar eine Korrelation des kindlichen Leukämierisikos mit demographischen Faktoren fanden.

Es bleibt abzuwarten, ob die weitere biologische Forschung Hinweise darauf geben kann, ob ein zur Krebserzeugung beitragender Wirkungsmechanismus vorstellbar wäre. Eine Übersicht hierzu gibt Cridland [Cri 93]. Danach deuten vorliegende Ergebnisse auf einen möglichen Promotor-Effekt hin - allerdings bei wesentlich höheren Feldstärken. Diese Ergebnisse sind noch vage und nicht belastbar.

Nach den genannten Kriterien stellen die vorliegenden epidemiologischen Daten keine ausreichende Grundlage für die Annahme eines Krebsrisikos durch Magnetfelder von Netzfrequenz bei Feldstärken in der Größenordnung kleiner 1 µT dar.

Tab. A 2.1: Charakteristika von 11 epidemiologischen Studien zur kindlichen Leukämie in der Umgebung von Freileitungen bzw. Transformatorenhäusern

| Literaturstelle | Region | Studiengegenstand | Alter | Fälle:Kontrollen | Matchingkriterien (Auswahlbasis für die Kontrollen) | Interview | Expositionsmaß | andere Einflußgrößen |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Wertheimer,Leeper[Wer 79] | Denver Standard Metropolitan Area, Col., USA | Mort. 1950-73 alle bös. Nbb. | 0-18 | 344:344 | Geburtsjahr, Geburtsregister | nein | Art und Entfernung der Leitung (Wiring Codes) | Alter, Geschlecht, Wohngegend, Verkehrsdichte, Sozialstatus, Familiengröße |
| Fulton et al.[Ful 80] | Rhode Island, USA | Inzidenz 1964-78 Leukämien | 0-20 | 119:240 | Geburtsjahr, Geburtsregister | nein | Art und Entfernung der Leitung (Wiring Codes) | Sozialstatus des Vaters (oder der Mutter) |
| Myers et al.[Mye 90] | Yorkshire, UK | Inzidenz 1970-79 alle bös. Nbb. | 0-14 | 374:588 | Geburtsjahr, geogr. Nähe (Geburtsregister) | nein | Entfernung, errechnete Feldstärke (bis ca. 1µT) | Haustyp |
| Tomenius[Tom 86] | Stockholm, Schweden | Inzidenz 1958-73 | 0-18 | 716:716 | Geburtsjahr, Geschlecht, Kirchendistrikt (Geburtsregister) | nein | Nähe zu sichtb. elektr. Einrichtungen, Spotmessungen (bis ca. 0,3µT) | Dauer des Wohnortes |
| Savitz et al.[Sav 88] | Denver Standard Metropolitan Area, Col., USA | Inzidenz 1976-83 alle bös. Nbb. | 0-14 | 356:278 | Geburtsjahr, Geschlecht, Vorwahl [Random Digit Dialing (RDD)] | ja | Spotmessungen (bis ca. 0,3µT), Wiring Codes | Alter Mutter, Bildung Vater, Einkommen, Rauchen d. Mutter i. d. Schwangerschaft, Verkehrsdichte |
| Coleman et al.[Col 89] | Süd-Ost-England (London-Area) | Inzidenz 1965-80 Leukämien | alle0-18 | 771: 1432 23184:141 | Alter, Geschlecht, Diagnosejahr, Wohndistrikt, Diagnosejahr | nein | winterliche Spitzenbelastung, Entfernung zum Transformator | ? |
| Lin/Lu[Lin 89] | Taipei/Taiwan | Inzidenz „past 5 Years“ alle bös. Nbb. | Kinder | 216:422 | Alter, Geschlecht, Aufnahmedatum ins Krankenhaus | ? | Entfernung zu Freileitungen (≥ 22 kV), Transformator | ? |
| London et al.[Lon 91] | Los Angeles County, Cal., USA | Inzidenz 1980-87 Leukämien | 0-10 | 232:232 | Alter, Geschlecht, ethnische Gruppe, lokale Nähe (Freunde, RDD) | ja | 24-Std-Messung, Spot-Messung, Wiring Codes | Pestizide (innen), Haarfärbemittel, s/w-TV, berufl. Exp. Vater m. Sprühfarben, and. Chemikalien |
| FeychtingAhlbom[Fey 92] | Schweden | Inzidenz 1960-85 alle bös. Nbb. | 0-16 | 142:558 | Alter, Geschlecht, Gemeinde, Art d. Ltg. (Einwohnerregister) | nein | Spotmessung, 24-Std.-Messung (Dosimeter), Berechnung | Sozialstatus, Verkehrsdichte |
| Olsen et al.[Ols 93] | Dänemark | Inzidenz 1968-86 Leukämie, ZNS, Lymphom | 0-14 | 1707:4788 | Alter, Geschlecht (Einwohnerregister) | nein | Entfernung “view distance“, Berechnung | Bevölkerungsdichte, Sozialstatus (Beruf), Mobilität) |
| Verkasalo et al.[Ver 93] | Finnland | Inzidenz 1974-90Tumoren Kohortenstudie | 0-19 | 134800Pers. (978100) PY | Alter, Geschlecht (Rate in Finnland insg.) | nein | berechnete Exposition |  |

Tab. A 2.2: Relatives Leukämierisiko für Kinder in 11 epidemiologischen Studien

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Studie** | **Expositionsgruppe****Relatives Risiko und Konfidenzintervall** | **Referenzgruppe** |
| WertheimerLeeper[Wer 79] | Kontr. entspr. Sterbe-Wohnort 2,98(2,3:3,8) Kontr. entspr. Geb.-Wohnort2,28(1,7:3,0 |  |  |  | niedriger Durchschnitt und extrem niedrig exponiert |
| Fulton et al.[Ful 80] | sehr hoch exp. 1,04(0,8:1,6) | hoch exp. 1,22(0,8:1,8) | niedrig exp.1,09(0,7:1,6) |  | sehr niedrig exponiert |
| Tomenius[Tom 86] | 220 kV≥0,3µT:0< 0,3µT:2,2 | sonst. Leitungen≥ 03,µT:0,4 |  |  | sonst. Leitungen < 0,3µT |
| Savitz et al.[Sav 88] | hoch exp. gegenüber Exp. durch Erdkabel2,75(0,9:8,0) | hoch exp. gegenüber niedrig exp. 1,54(0,9:2,6) |  |  | s. Felder links |
| Coleman et al.[Col 89] | 0-50 m1,52(0,7:2,4) | 51-100 m0,93(0,5:1,6) |  |  | > 100 m |
| Lin, Lu [Lin 89] | 0-50 m1,31(0,7:2,4) |  |  |  | > 50 m |
| Myers et al.[Mye 90] | 0-24 m1,3(0,4:4,8) | 25-49 m0,8(0,2:2,6) | 50-74 m1,3(0,4:4,8) | 75-99 m0.7(0,1:3,9) | ≥ 100 m |
| London et al.[Lon 91] | ≥ 0,125µT1,69(0,7:4,0) | 0,068-0,124µT0,84(0,5:1,9) | 0,032-0,067µT0,66(0,4:1,2 |  | ≤ 0,031µT |
| Feychting,Ahlbom[Fey 92] | ≥ 0,2µT1,69(0,7:4.0) | 0,1-0,19µT4,3(0,1:4,9) |  |  | < 0,09µT |
| Olsen et al.[Ols 93] | ≥ 0,40µT6,0(0,8:44) | ≥ 0,25µT1,5(0,3:6,7) | ≥ 0,1µT1,0(0,3:3,3) |  | < 0,10µT |
| Verkasalo et al.[Vers 93] | ≥ 0,2µT1,6(0,3:4,5) | 0,01-0,19µT0,89(0,6:1,3) | Kumulierte Exp.0,01-0,390,9(0,6:1,4) | (µT x Jahre)≥ 0,41,2(0,3:1,3) | mittlere Rate in Finnland |

Literatur

[Cri 93] Cridland, N. A.:

 Electromagnetic fields and cancer. A review of relevant cellular studies; NRPB R-256, Chilton, 1993

[Col 89] Coleman, M. P., Bell, C. M., Taylor, H. L., Primic-Zakelij, M.:

 Leukaemia and residence near electricity transmission equipment. A casecontrol study; Br. J. Cancer 90: 793, 1989

[EPA 90] EPA (U. S. Environmental Protection Agency):

 Evaluation of the potential carcinogenicity of electromagnetic fields, Review draft; Washington, 1990

[Fey 92] Feychting, M., Ahlbom, A.:

 Magnetic fields and cancer in people residing near Swedish high voltage power lines; Stockholm: Institutet för miljömedicin, Karolinska Institutet (IMM-rapport 6/92), 1992

[Ful 80] Fulton, J. P., Copp, S., Preble, L., Leone, L., Forman, E.:

 Electrical wiring configuration and childhood leukaemia in Rhode Island;

 Am J Ep 111: 292, 1980

[Gor 90] Gordon, I., Motika, M., Nolan, T.:

 Epidemiological studies of cancer and powerline frequency electromagnetic fields. A meta-analysis; Melboune: University (Statistical Consulting Center, report No. 242), 1990

[Irn 94] Irnich, W.:

 Kinderkrebs und Magnetfelder - Erkenntnisse aus der Feychtin-Ahlbom-Studie, in: Kinderarzt und Umwelt, Jahrbuch 1993/1994, Hrsgr.: K. E. v. Mühlendahl, M. Otto; Alete Wissenschaftlicher Dienst 167 - 177, 1994

[Kin 90] Kinlen, L.:

 Evidence from population mixing in British New Towns 1964 - 85 of an infective basis for childhood leukaemia: Lancet 336: 577 - 582, 1990

[Kin 91a] Kinlen, L., Hudson, C., Stiller, L. A.:

 Contacts between adults as evidence for an infective origin of childhood leukaemia: an explanation for the excess near nuclear establishments in West Berkshire? Br. J. Cancer 64, 549 - 554, 1991

[Kin 91b] Kinlen, L., Hudson, C.:

 Childhood leukaemia and poliomyelitis in relation to military encampments in England and Wales in the period of national military service, 1950-63; Brit. Med. Journal 303, 1357 - 1362, 1991

[Kin 93] Kinlen, L., Clarke, K., Balkwill, A., Matthews, F.:

 Rural population mixing and childhood leukaemia: effects of the North Sea oil industry in Scotland, including the area near Dounreay nuclear site; Brit. Med. Journal 306, 743 - 748, 1993

[Lei 93] N. Leitgeb:

 Analyse epidemiologischer Studien über magnetfeldbedingte Krebsrisiken,

 in: Biomedizinische Technik 38: 111 - 116, 1993

[Lin 90] Lin, R. S., Lu, P. Y.

 An epidemiological study of childhood cancer in relation to residential exposure to electromagnetic fields; in: Gordon, I.; Motika, M.; Nolan, T.: Epidemiological studies of cancer and powerline frequency electromagnetic fields. A meta-analysis; Melbourne: University (Statistical Consulting Center, report No. 242). 1990

[Lon 91] London, S. J., Thomas, D. C., Bowman, J. D., Sobel, E., Peters, J. M.:

 Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukaemia; Am J Ep 134: 923, 1991

[Mye 90] Myers, A., Clayden, A. D., Cartwright, R. A., Cartwright, S. C.:

 Childhood cancer and overhead power lines. A case-control study; Br. J. Cancer 92: 1008, 1990

[NRPB 92] National Radiological Protection Board (NRPB):

 Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an Advisory Group on non-ionizing radiation: Documents of the NRPB, Vol. 3, No. 1, Chilton, 1992

[Ols 93] Olsen, J. H., Nielsen, A., Schulgen, G.:

 Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children;

 Brit. Med. Journal 307: 1891, 1993

[OTA 89] U. S. Congress, Office of Technology Assessment (OTA):

 Biological effects of power frequency electric and magnetic fields. Background paper; U. S. Government Printing Office (OTA-BP-E-53) Washington, 1989

[Sav 88] Savitz, D. A., Wachtel, H., Barnes, F. A., John, E. M., Tvrdick, J. G.:

 Case-control study of childhood cancer and exposure to 60 Hz magnetic fields; Am J Ep 128: 21, 1988

[Tom 86] Tomenius, L.:

 50 Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm County; Bioelectromagnetics 7: 191, 1986

[Ver 93] Verkasalo, P., Pukkala, E., Hongisto, M., Valjus, J., Järvinen, P., Heikilü, K., Koskenvuo, M.:

 Risk of cancer in Finnish children living close to power lines; Brit. Med.

 Journal 307: 895-899, October 1993

[Wer 79] Wertheimer, N., Leeper, E.:

 Electrical wiring configuration and childhood cancer; Am J Ep 109: 273, 1979

## Anhang A3

### A3 Möglichkeiten für die zusätzliche Verringerung von Feldstärken an Aufenthaltsorten von Personen

Für die zusätzliche Feldstärkeverminderung gemäß Kap. 7.2 kommen z. B. folgende Maßnahmen in Frage:

Elektrische Felder: Die elektrischen Felder einer Hochspannungsfreileitung werden innerhalb von Gebäuden in der Regel ausreichend durch die Wände abgeschirmt, so daß hier keine weiteren Maßnahmen sinnvoll sind. Die elektrische Feldstärke einer Dreiphasenleitung im Freien fällt außerhalb der Leitungstrasse mit zunehmenden Abstand sehr stark ab; eine Möglichkeit zur Feldstärkeverringerung ist daher durch den Abstand, der beim Bau von Gebäuden mit Zugangswegen im Freien bzw. beim Bau von Freileitungen eingehalten wird, möglich.

In elektrischen Feldern kann es auch unterhalb des Grenzwertes von 5 kV/m zu wahrnehmbaren Oberflächeneffekten (Bewegung von Körperhaaren, Bildung kleiner Funken zwischen Haut und Kleidung) sowie zu wahrnehmbaren Funkentladungen und Körperströmen bei Annäherung oder Berührung elektrisch leitfähiger Gegenstände, wie z. B. Autos, Metallzäunen oder Metallgegenständen auf Spielplätzen usw. kommen. Die einfachste Maßnahme besteht in der Regel in der geeigneten Erdung der leitfähigen Gegenstände.

Magnetfelder: Bei elektrischen Leitungen und Transformatoren ist die optimierte Phasenbelegung der einzelnen Leiter in einem Dreiphasensystem zur teilweisen Feldkompensation geeignet; wirksam ist auch die Fernhaltung neuer Leitungen und Transformatoren von Gebäuden und Grundstücken, wo sich Personen längere Zeit aufhalten. Bei elektrischen Hausinstallationen eignen sich zur Feldstärkeverminderung die Führung der Hin- und Rückströme von Einphasensystemen über den gleichen Weg. Bei elektrischen Geräten kommen zur Feldstärkeverminderung die feldkompensierende Leiterführung in Geräten, die Abschaltmöglichkeit auf der Primärseite bei Geräten mit Transformatoren sowie die Einschränkung der körpernahen Nutzung von Geräten in Frage.

Systeme der Energieversorgung und -verteilung: Mögliche Maßnahmen zur Feldstärkeverringerung betreffen die Planung von Freileitungen und Erdkabeln, die Errichtung von Transformatoren und Schaltstationen sowie die Neuplanung von Wohngebieten in der Nähe bestehender Einrichtungen der elektrischen Energieversorgung. Die vorgenannten Gründe können es nahelegen, neue Leitungen von Gebäuden oder Grundstücken, wo sich Personen längere Zeit aufhalten können, z. B. Kindergärten, Schulen und Krankenhäusern, fernzuhalten.

Herzschrittmacher: Im Wohn- und Arbeitsbereich von Herzschrittmacherträgern können gezielte Maßnahmen zur Herabsetzung von Störfeldstärken durchgeführt werden. Bei magnetischen Flußdichten unter ca. 20 µT und elektrischen Feldstärken unter ca. 2,5 kV/m sind Störungen von Schrittmachern nach dem heutigen Stand der Technik ausgeschlossen. Die Hersteller von Herzschrittmachern sollten die Störschwellen ihrer Produkte spezifizieren und die Störfestigkeit weiter verbessern. Die technischen Möglichkeiten hierzu sind vorhanden.