

6 Anhang

Deutsche Übersetzung
der

**“Guidelines for Limiting Exposure to
Time-Varying Electric, Magnetic, and
Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)”**

der
**International Commission on
Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)**

**RICHTLINIEN FÜR DIE BEGRENZUNG DER EXPOSITION DURCH
ZEITLICH VERÄNDERLICHE ELEKTRISCHE, MAGNETISCHE UND
ELEKTROMAGNETISCHE FELDER (BIS 300 GHz) ***

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

Übersetzung aus dem Englischen

von

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

und

Bundesamt für Strahlenschutz

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

ICNIRP-Richtlinien

RICHTLINIEN FÜR DIE BEGRENZUNG DER EXPOSITION DURCH ZEITLICH VERÄNDERLICHE ELEKTRISCHE, MAGNETISCHE UND ELEKTROMAGNETISCHE FELDER (BIS 300 GHz)

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection^{*†}

VORWORT

Die Internationale Strahlenschutz-Vereinigung (IRPA - International Radiation Protection Association) hat 1974 eine Arbeitsgruppe über nichtionisierende Strahlung (NIR) eingerichtet, die sich mit Problemen des Schutzes gegen verschiedene Formen nichtionisierender Strahlung befaßte. Beim Pariser IRPA-Kongreß 1977 wurde aus dieser Arbeitsgruppe der Internationale Ausschuß über nichtionisierende Strahlung (INIRC - International Non-Ionizing Radiation Committee) gebildet.

In Zusammenarbeit mit der Abteilung für Umweltgesundheit der Weltgesundheitsorganisation (WHO - World Health Organization) arbeitete die IRPA/INIRC eine Reihe von Dokumenten über Gesundheitskriterien für nichtionisierende Strahlung als Teil des WHO-Programms für Umweltschutzkriterien aus, das vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP - United Nations Environment Programme) gefördert wurde. Jedes dieser Dokumente umfaßt einen Überblick über die physikalischen Merkmale, über Messung und Meßeinrichtungen, Quellen und Anwendungen nichtionisierender Strahlung, eine umfassende Literaturübersicht über die biologischen Wirkungen sowie eine Bewertung der Gesundheitsgefährdung durch die Exposition mit nichtionisierender Strahlung. Diese Gesundheitskriterien lieferten den wissenschaftlichen Datenbestand für die nachfolgende Entwicklung von

* ICNIRP-Sekretariat, c/o Dipl.-Ing. Rüdiger Matthes, Bundesamt für Strahlenschutz, Institut für Strahlenschutz, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 Oberschleißheim, Deutschland.

† Bei der Ausarbeitung dieser Richtlinien war die Kommission folgendermaßen zusammengesetzt:

A. Ahlbom (Schweden), U. Bergqvist (Schweden), J. H. Bernhardt, Vorsitzender seit Mai 1996 (Deutschland), J. P. Césari (Frankreich), L. A. Court, bis Mai 1996 (Frankreich), M. Grandolfo, stellvertretender Vorsitzender bis April 1996 (Italien), M. Hietanen, seit Mai 1996 (Finnland), A. F. McKinlay, stellvertretender Vorsitzender seit Mai 1996 (UK), M. H. Repacholi, Vorsitzender bis April 1996, Vorsitzender emeritus seit Mai 1996 (Australien), D. H. Sliney (USA), J. A. J. Stolwijk (USA), M. L. Swicord, bis Mai 1996 (USA), L. D. Szabo (Ungarn), M. Taki (Japan), T. S. Tenforde (USA), H. P. Jammet (Mitglied emeritus, verstorben) (Frankreich), R. Matthes, wissenschaftlicher Sekretär (Deutschland).

Bei der Ausarbeitung dieser Veröffentlichung wurde ICNIRP von folgenden externen Fachleuten unterstützt: S. Allen (UK), J. Brix (Deutschland), S. Eggert (Deutschland), H. Garn (Österreich), K. Jokela (Finnland), H. Korniewicz (Polen), G. F. Mariutti (Italien), R. Saunders (UK), S. Tofani (Italien), P. Vecchia (Italien),

Expositionsgrenzen sowie von technischen Anleitungen im Zusammenhang mit nichtionisierender Strahlung.

Beim Achten Internationalen Kongreß der IRPA (18.-22. Mai 1992 in Montreal) wurde eine neue, unabhängige wissenschaftliche Organisation - die Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) - als Nachfolgerin der IRPA/INIRC geschaffen. Die Funktion dieses Gremiums besteht in der Untersuchung der Gefährdung, die mit verschiedenen Formen nichtionisierender Strahlung in Zusammenhang gebracht werden können, in der Entwicklung internationaler Richtlinien für Expositionsgrenzen und der Behandlung aller Aspekte des Schutzes vor nichtionisierender Strahlung.

Als Ergebnis einer Exposition durch statische und extrem niederfrequente (ELF) elektrische und magnetische Felder beschriebene biologische Wirkungen, wurden von UNEP/WHO/IRPA überprüft (1984, 1987). Diese Publikationen sowie eine Reihe anderer, darunter UNEP/WHO/IRPA (1993) und Allen et al. (1991), bilden die wissenschaftliche Grundlage für die vorliegenden Richtlinien.

Ein Glossar von Fachbegriffen befindet sich im Anhang.

ZWECK UND GELTUNGSBEREICH

Das Hauptziel der vorliegenden Veröffentlichung besteht darin, Richtlinien für die Begrenzung der Exposition durch EMF festzulegen, die einen Schutz gegen bekannte schädliche Gesundheitsfolgen bieten. Eine schädliche Gesundheitsfolge verursacht nachweisbare Beeinträchtigungen der Gesundheit der exponierten Person oder ihrer Nachkommenschaft; andererseits muß eine biologische Wirkung nicht notwendigerweise zu einer schädlichen Gesundheitsfolge führen.

Es werden Untersuchungen sowohl über die direkten als auch indirekten Wirkungen von EMF beschrieben; direkte Wirkungen ergeben sich aus der direkten Wechselwirkung zwischen Feldern und dem Körper, bei indirekten Wirkungen sind Objekte mit vom Körper verschiedenen elektrischen Potentialen beteiligt. Es werden ferner die Ergebnisse von Labor- und epidemiologischen Untersuchungen, grundlegende Kriterien der Exposition sowie Referenzwerte für die praktische Risikoabschätzung erörtert, wobei sich die vorgestellten Richtlinien auf die Exposition am Arbeitsplatz und die Exposition der Bevölkerung beziehen.

Richtlinien für hochfrequente elektromagnetische Felder sowie für 50/60-Hz-Felder wurden 1988 bzw. 1990 von IRPA/INIRC herausgegeben, werden jedoch durch diese

Richtlinien abgelöst, die den gesamten Frequenzbereich zeitlich veränderlicher EMF (bis 300 GHz) umfassen. Statische Magnetfelder werden in den ICNIRP-Richtlinien von 1994 behandelt (ICNIRP 1994).

Bei der Festlegung von Immissionsgrenzwerten geht die Kommission von der Notwendigkeit aus, eine Reihe unterschiedlicher Expertenauffassungen miteinander in Einklang zu bringen. Die Gültigkeit von Forschungsberichten muß geprüft und Wirkungen auf den Menschen müssen aus Tierversuchen abgeleitet werden. Die Beschränkungen in diesen Richtlinien sind einzig auf wissenschaftliche Daten begründet; die derzeit verfügbaren Kenntnisse lassen jedoch darauf schließen, daß diese Beschränkungen einen geeigneten Schutz vor der Exposition durch zeitlich veränderliche EMF darstellen. Es werden zwei Kategorien von Empfehlungen vorgestellt:

- *Basisgrenzwerte*: Beschränkungen der Exposition durch zeitlich veränderliche EMF, die unmittelbar auf gesicherten Gesundheitsfolgen basieren, werden als *Basisgrenzwerte* bezeichnet. Je nach der Frequenz des Feldes sind die zur Spezifizierung dieser Grenzwerte herangezogenen physikalischen Größen die Stromdichte (**J**), die spezifische Energieabsorptionsrate (SAR) und die Leistungsdichte (S). Nur die Leistungsdichte in Luft, außerhalb des Körpers, kann bei exponierten Personen ohne weiteres gemessen werden.
- *Referenzwerte*: Diese Werte dienen der Expositionsbeurteilung in der Praxis, um festzustellen, ob die Basisgrenzwerte möglicherweise überschritten werden. Einige Referenzwerte sind aus den entsprechenden Basisgrenzwerten unter Nutzung von Meß- und/oder Berechnungsverfahren abgeleitet worden, andere beziehen sich auf die Wahrnehmung und schädliche indirekte Wirkungen der Exposition durch EMF. Die abgeleiteten Größen sind elektrische Feldstärke (**E**), magnetische Feldstärke (**H**), magnetische Flußdichte (**B**), Leistungsdichte (S) und durch Gliedmaßen fließende Ströme (I_L). Größen, die sich auf die Wahrnehmung und andere indirekte Wirkungen beziehen, sind der Kontaktstrom (I_C) und bei gepulsten Feldern die spezifische Energieabsorption (SA). In einer bestimmten Expositionssituation können gemessene oder berechnete Werte einer dieser Größen mit dem entsprechenden Referenzwert verglichen werden. Einhaltung des Referenzwertes bedeutet immer Einhaltung des entsprechenden Basisgrenzwertes. Übersteigt der gemessene oder berechnete Wert den Referenzwert, so folgt daraus nicht unbedingt, daß auch der Basisgrenzwert überschritten wird. Allerdings ist es immer dann, wenn ein Referenzwert überschritten wird, erforderlich, die Übereinstimmung mit dem relevanten Basisgrenzwert zu prüfen und festzustellen, ob zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Diese Richtlinien beziehen sich weder direkt auf Produktstandards, die dazu dienen, EMF-Emissionen unter festgelegten Testbedingungen zu begrenzen, noch behandeln sie Techniken

zur Messung physikalischer Größen, die elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder charakterisieren. Eingehende Beschreibungen meßtechnischer Ausrüstungen und Meßverfahren zur genauen Bestimmung solcher physikalischer Größen findet man andernorts (NCRP 1981; IEEE 1992; NCRP 1993; DIN VDE 1995).

Die Übereinstimmung mit den vorliegenden Richtlinien schließt Störungen von oder Wirkungen auf medizinische Geräte wie Metallprothesen, Herzschrittmacher, Defibrillatoren und Cochlea-Implantate nicht unbedingt aus. Störungen von Herzschrittmachern können bei Werten auftreten, die unterhalb der empfohlenen Referenzwerte liegen. Ratschläge zur Vermeidung solcher Probleme liegen außerhalb des Aufgabenbereichs dieser Veröffentlichung, sind jedoch anderweitig verfügbar (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Diese Richtlinien werden entsprechend den Fortschritten bei der Identifizierung schädlicher Gesundheitsfolgen von zeitlich veränderlichen elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern in regelmäßigen Abständen überarbeitet und aktualisiert.

GRÖSSEN UND EINHEITEN

Während elektrische Felder nur an das Vorhandensein elektrischer Ladungen gebunden sind, stellen Magnetfelder das Ergebnis der physikalischen Bewegung elektrischer Ladungen (elektrischer Strom) dar. Ein elektrisches Feld \mathbf{E} übt Kräfte auf eine elektrische Ladung aus und wird in Volt pro Meter (V m^{-1}) angegeben. In ähnlicher Weise können Magnetfelder physikalische Kräfte auf elektrische Ladungen ausüben, jedoch nur dann, wenn sich diese Ladungen in Bewegung befinden. Elektrische und magnetische Felder besitzen sowohl Betrag als auch Richtung (d. h., es handelt sich um Vektoren). Ein Magnetfeld läßt sich auf zweierlei Weisen beschreiben - einmal durch die magnetische Flußdichte \mathbf{B} , ausgedrückt in Tesla (T), zum anderen durch die Magnetfeldstärke \mathbf{H} , ausgedrückt in Ampere pro Meter (A m^{-1}). Beide Größen sind miteinander verknüpft durch die Gleichung:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (1)$$

wobei μ die Proportionalitätskonstante (die magnetische Permeabilität) ist; im Vakuum und in Luft sowie in nicht-magnetischen (einschließlich biologischen) Stoffen besitzt μ den Wert $4\pi \times 10^{-7}$, wenn μ in Henry pro Meter (H m^{-1}) angegeben wird. Daher muß bei der Beschreibung eines Magnetfelds zu Schutzzwecken nur eine der beiden Größen \mathbf{B} oder \mathbf{H} angegeben werden.

Im Fernfeldbereich stellt das Modell ebener Wellen eine gute Annäherung an die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen dar. Die Merkmale einer ebenen Welle sind:

- Die Wellenfronten besitzen eine planare Geometrie;
- Die Vektoren \mathbf{E} und \mathbf{H} sowie die Ausbreitungsrichtung stehen senkrecht aufeinander;

- Die Phasen der **E**- und **H**-Felder sind gleich, und das Verhältnis der Amplituden E/H ist im gesamten Raum konstant. Im freien Raum ist das Verhältnis der Amplituden E/H = 377 Ohm, was der charakteristischen Impedanz des freien Raumes entspricht;
- Die Leistungsdichte **S**, also die Leistung pro Einheitsfläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, steht zum elektrischen und magnetischen Feld in einer Beziehung, die durch folgende Gleichung ausgedrückt wird:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \mathbf{H} = E^2 / 377 = 377 H^2. \quad (2)$$

Die Situation im Nahfeldbereich ist weitaus komplizierter, weil die Maxima und Minima der E- und H-Felder anders als im Fernfeld nicht an denselben Orten in Ausbreitungsrichtung auftreten. Im Nahfeld kann die Struktur des elektromagnetischen Feldes sehr inhomogen sein, und es kann zu beträchtlichen Abweichungen von der 377-Ohm-Impedanz ebener Wellen kommen; das heißt, es können in manchen Bereichen fast reine E-Felder, in anderen fast reine H-Felder auftreten. Expositionen im Nahfeld sind viel schwerer zu spezifizieren, weil sowohl E- als auch H-Felder gemessen werden müssen und weil die Feldmuster komplizierter sind; unter diesen Umständen ist die Leistungsdichte keine geeignete Größe mehr, um Expositionsgrenzen auszudrücken (wie es im Fernfeld der Fall ist).

Tabelle 1. Elektrische, magnetische, elektromagnetische und dosimetrische Größen und entsprechende SI-Einheiten

Größe	Symbol	Einheit
Leitfähigkeit	σ	Siemens pro Meter ($S m^{-1}$)
Strom	I	Ampere (A)
Stromdichte	\mathbf{J}	Ampere pro Quadratmeter ($A m^{-2}$)
Frequenz	f	Hertz (Hz)
Elektrische Feldstärke	\mathbf{E}	Volt pro Meter ($V m^{-1}$)
Magnetische Feldstärke	\mathbf{H}	Ampere pro Meter ($A m^{-1}$)
Magnetische Flußdichte	\mathbf{B}	Tesla (T)
Magnetische Permeabilität	μ	Henry pro Meter ($H m^{-1}$)
Permittivität	ϵ	Farad pro Meter ($F m^{-1}$)
Leistungsdichte	\mathbf{S}	Watt pro Quadratmeter ($W m^{-2}$)
Spezifische Energieabsorption	SA	Joule pro Kilogramm ($J kg^{-1}$)
Spezifische Energieabsorptionsrate	SAR	Watt pro Kilogramm ($W kg^{-1}$)

Die Exposition durch zeitlich veränderliche EMF führt zu inneren Körperströmen und zur Energieabsorption im Gewebe, die von den beteiligten Kopplungsmechanismen und der

Frequenz abhängen. Die inneren elektrischen Feldstärken und Stromdichten sind über das Ohmsche Gesetz miteinander verknüpft:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (3)$$

wobei σ die elektrische Leitfähigkeit des Mediums ist. Die dosimetrischen Größen, die in diesen Richtlinien verwendet werden und verschiedene Frequenzbereiche und Wellenformen berücksichtigen, sind die folgenden:

- Stromdichte \mathbf{J} , im Frequenzbereich bis 10 MHz;
- Strom I im Frequenzbereich bis 110 MHz;
- Spezifische Energieabsorptionsrate SAR im Frequenzbereich 100 kHz-10 GHz;
- Spezifische Energieabsorption SA für gepulste Felder im Frequenzbereich 300 MHz-10 GHz;
- Leistungsdichte S im Frequenzbereich 10-300 GHz.

Tabelle 1 gibt eine allgemeine Zusammenfassung der dosimetrischen Größen und Einheiten von EMF, wie sie in diesen Richtlinien verwendet werden.

GRUNDLAGEN FÜR DIE BEGRENZUNG DER EXPOSITION

Die vorliegenden Richtlinien für die Begrenzung der Exposition wurden nach gründlicher Sichtung aller publizierten wissenschaftlichen Literatur entwickelt. Die im Zuge dieser Prüfung angewandten Kriterien wurden ausgearbeitet, um die Glaubwürdigkeit der verschiedenen beschriebenen Ergebnisse zu bewerten (Repacholi und Stolwijk 1991; Repacholi und Cardis 1997); nur gesicherte Wirkungen wurden als Grundlage für die vorgeschlagenen Expositionsbeschränkungen verwendet. Die Auslösung von Krebs durch langfristige Exposition durch EMF wurde als nicht gesichert angesehen, daher basieren diese Richtlinien auf kurzfristigen, unmittelbaren gesundheitlichen Auswirkungen wie z. B. die Reizung peripherer Nerven und Muskeln, Schocks und Verbrennungen, die durch Berührung leitfähiger Objekte verursacht werden und erhöhte Gewebetemperaturen, die aus der Absorption von Energie während der Exposition durch EMF resultieren. Im Falle potentieller Langzeiteffekte der Exposition wie erhöhtes Krebsrisiko kam ICNIRP zu dem Schluß, daß die verfügbaren Daten als Grundlage für die Festlegung von Expositionsbegrenzungen nicht ausreichen, obwohl epidemiologische Untersuchungen zwar Anhaltspunkte, aber keine überzeugenden Beweise für einen Zusammenhang zwischen möglichen karzinogenen Wirkungen und der Exposition durch magnetische Flußdichten von 50/60-Hz-Feldern erbrachten, die in der Größenordnung beträchtlich unter den in diesen Richtlinien empfohlenen liegen.

In-vitro-Effekte kurzzeitiger Exposition durch ELF oder ELF-amplitudenmodulierte EMF wurden zusammengefaßt. Es wurden vorübergehende Zell- und Gewebereaktionen nach Exposition durch EMF beobachtet, jedoch ohne deutliche Beziehung zwischen Exposition und Reaktion. Diese Studien sind für die Bewertung der Gesundheitsfolgen von begrenztem Wert, da viele Reaktionen nicht *in vivo* demonstriert wurden. *In-vitro*-Untersuchungen galten daher als ungeeignet, Daten zu liefern, die als wesentliche Grundlage für die Bewertung möglicher Gesundheitsfolgen von EMF dienen könnten.

KOPPLUNGSMECHANISMEN ZWISCHEN FELDERN UND DEM KÖRPER

Es gibt drei gesicherte, elementare Kopplungsmechanismen, über die frequenzabhängige elektrische und magnetische Felder direkt mit lebender Materie wechselwirken (UNEP/WHO/IRPA 1993):

- die Kopplung mit niederfrequenten elektrischen Feldern;
- die Kopplung mit niederfrequenten magnetischen Feldern;
- die Absorption von Energie aus elektromagnetischen Feldern.

Kopplung mit niederfrequenten elektrischen Feldern

Die Wechselwirkung zeitlich veränderlicher elektrischer Felder mit dem menschlichen Körper führt zum Fließen elektrischer Ladungen (elektrischer Strom), zur Polarisierung gebundener Ladungen (Bildung elektrischer Dipole) und zur Reorientierung von im Gewebe bereits vorhandenen elektrischen Dipolen. Die relativen Größenordnungen dieser unterschiedlichen Effekte hängen von den elektrischen Eigenschaften des Körpers ab - das heißt, der elektrischen Leitfähigkeit (die das Fließen elektrischen Stroms bestimmt) und der Permittivität (die das Ausmaß von Polarisierungseffekten bestimmt). Elektrische Leitfähigkeit und Permittivität variieren mit der Art des Körpergewebes und hängen ferner von der Frequenz des einwirkenden Feldes ab. Elektrische Felder außerhalb des Körpers erzeugen Oberflächenladungen auf dem Körper; diese führen zu Strömen im Körper, deren Verteilung von den Expositionsbedingungen, der Größe und Gestalt des Körpers sowie von der Orientierung des Körpers im Feld abhängt.

Kopplung mit niederfrequenten Magnetfeldern

Die physikalische Wechselwirkung zeitlich veränderlicher Magnetfelder mit dem menschlichen Körper führt zur Induktion von elektrischen Feldern und zu elektrischen Wirbelströmen. Die Stärke des induzierten Feldes und der Stromdichte sind proportional zum Radius der Schleife, der elektrischen Leitfähigkeit des Gewebes sowie der Änderungsgeschwindigkeit und der Größe der magnetischen Flußdichte. Bei gegebener Größe und Frequenz des Magnetfeldes werden die stärksten elektrischen Felder dort induziert, wo die

Schleifendimensionen am größten sind. Die genaue Bahn und die Größe des resultierenden Stromes, der in einem beliebigen Teil des Körpers induziert wird, hängt von der elektrischen Leitfähigkeit des Gewebes ab.

Der Körper ist nicht elektrisch homogen; allerdings können die induzierten Stromdichten unter Nutzung anatomisch und elektrisch realistischer Körpermodelle und Berechnungsmethoden, die eine hohe anatomische Auflösung haben, berechnet werden.

Absorption von Energie aus elektromagnetischen Feldern

Die Exposition durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder führt normalerweise zu einer vernachlässigbaren Energieabsorption und zu keinem meßbaren Temperaturanstieg im Körper. Hingegen kann die Exposition durch elektromagnetische Felder mit Frequenzen über rund 100 kHz zu einer beträchtlichen Energieabsorption und einem beträchtlichen Temperaturanstieg führen. Im allgemeinen ruft die Exposition durch ein homogenes (ebenes) elektromagnetisches Feld eine sehr ungleichmäßige Energieübertragung und -verteilung im Körper hervor, die durch dosimetrische Messungen und Berechnungen bestimmt werden muß.

Hinsichtlich der Energieabsorption durch den menschlichen Körper können elektromagnetische Felder in vier Bereiche eingeteilt werden (Durney et al. 1985):

- Frequenzen von rund 100 kHz bis weniger als rund 20 MHz, bei denen die Absorption im Rumpf bei abnehmender Frequenz rapide abnimmt und eine beträchtliche Absorption in Hals und Beinen auftreten kann;
- Frequenzen im Bereich von ungefähr 20 MHz bis 300 MHz, bei denen eine relativ hohe Absorption im ganzen Körper auftreten kann; sie können zu noch höheren Werten führen, wenn Teilkörperresonanzen (z. B. Kopf) berücksichtigt werden;
- Frequenzen im Bereich von ungefähr 300 MHz bis zu mehreren GHz, bei denen eine beträchtliche lokale, ungleichmäßige Absorption auftritt;
- Frequenzen über rund 10 GHz, bei denen eine Absorption vor allem an der Körperoberfläche auftritt.

Im Gewebe ist die SAR proportional zum Quadrat der inneren elektrischen Feldstärke. Die durchschnittliche SAR und SAR-Verteilung kann aus Labormessungen errechnet oder abgeschätzt werden. Die Werte der SAR hängen von folgenden Faktoren ab:

- den auftretenden Feldparametern, d. h. Frequenz, Intensität, Polarisierung und Quelle-Objekt-Anordnung (Nah- oder Fernfeld);
- den Merkmalen des exponierten Körpers, d. h. seiner Größe sowie der inneren und äußeren Geometrie und den dielektrischen Eigenschaften der verschiedenen Gewebe;

- Erdungseffekten und Reflexionswirkungen anderer Objekte im Feld um den exponierten Körper.

Wenn die Längsachse des menschlichen Körpers parallel zum elektrischen Feldvektor steht und unter den Expositionsbedingungen ebener Wellen (d. h. Fernfeld-Exposition), erreicht die Ganzkörper-SAR Maximalwerte. Die absorbierte Energiemenge hängt von einer Reihe von Faktoren ab, darunter der Größe des exponierten Körpers. Der "Standard-Referenzmann" (ICRP 1994) hat eine resonante Absorptionsfrequenz von nahezu 70 MHz, sofern er nicht geerdet ist. Bei größeren Personen liegt die resonante Absorptionsfrequenz etwas niedriger, bei kleineren Personen, Kindern, Säuglingen und sitzenden Personen kann sie 100 MHz überschreiten. Die Größe der Referenzwerte elektrischer Felder basiert auf der Frequenzabhängigkeit der Absorption beim Menschen; bei geerdeten Personen sind die Resonanzfrequenzen etwa um einen Faktor 2 kleiner (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Bei manchen Geräten, die bei Frequenzen über 10 MHz arbeiten (z. B. dielektrische Erwärmungsanlagen, Mobiltelefone), kann für den Menschen eine Exposition unter Nahfeldbedingungen auftreten. Die Frequenzabhängigkeit der Energieabsorption unter diesen Bedingungen unterscheidet sich stark von denen, die unter Fernfeldbedingungen beschrieben wurden. Bei bestimmten Geräten wie Mobiltelefonen können Magnetfelder unter bestimmten Expositionsbedingungen dominieren.

Die Nützlichkeit numerischer Modellrechnungen sowie Messungen induzierter Körperströme und der Gewebefeldstärke für die Beurteilung der Nahfeld-Exposition wurde für Mobiltelefone, Walkie-Talkies, Funktürme, Bordfunkgeräte und dielektrische Erwärmungsanlagen gezeigt (Kuster und Balzano 1992; Dimbylow und Mann 1994; Jokela et al. 1994; Gandhi 1995; Tofani et al. 1995). Die Bedeutung dieser Studien liegt in dem Nachweis, daß eine Nahfeld-Exposition zu hohen lokalen SAR führen kann (z. B. im Kopf, in Handgelenken, in Fußgelenken), und daß die Ganzkörper- und lokale SAR stark von der Trenndistanz zwischen der Hochfrequenzquelle und dem Körper abhängt. Schließlich sind die durch Messung gewonnenen SAR-Daten konsistent mit den durch numerische Modellrechnungen gewonnenen Daten. Die durchschnittlichen Ganzkörper- und lokalen SAR sind praktische Größen für den Vergleich von unter verschiedenen Expositionsbedingungen beobachteten Wirkungen. Eine detaillierte Erörterung der SAR findet sich andernorts (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Bei Frequenzen über rund 10 GHz ist die Eindringtiefe des Feldes ins Gewebe gering, so daß die SAR kein gutes Maß für die Beurteilung der absorbierten Energie ist; die auftretende Leistungsdichte des Feldes (in $W m^{-2}$) ist eine geeignetere dosimetrische Größe.

INDIREKTE KOPPLUNGSMECHANISMEN

Es gibt zwei indirekte Kopplungsmechanismen:

- Kontaktströme, die auftreten, wenn der menschliche Körper in Kontakt mit einem Objekt gerät, das ein anderes elektrisches Potential aufweist (d. h., wenn entweder der Körper oder das Objekt durch ein EMF aufgeladen ist);
- Kopplung von EMF an medizinische Geräte, die von Personen getragen werden oder in Personen implantiert wurden (in dieser Publikation nicht berücksichtigt).

Die Aufladung eines leitenden Objekts durch EMF bewirkt, daß durch einen menschlichen Körper, der dieses Objekt berührt, elektrische Ströme fließen (Tenforde und Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993). Die Größe und räumliche Verteilung dieser Ströme hängen ab von der Frequenz, der Größe des Objekts, der Größe der Person und der Kontaktfläche; vorübergehende Entladungen - Funken - können auftreten, wenn sich eine Person und ein leitendes Objekt, das einem starken Feld ausgesetzt ist, sehr nahekomen.

BIOLOGISCHE GRUNDLAGEN FÜR EXPOSITIONSBESCHRÄNKUNGEN (BIS 100 kHz)

Die folgenden Abschnitte geben einen allgemeinen Überblick über die relevante Literatur über die biologischen Wirkungen und Gesundheitsfolgen elektrischer und magnetischer Felder mit Frequenzbereichen bis 100 kHz, bei denen der wichtigste Wechselwirkungsmechanismus in der Induktion von Strömen im Gewebe besteht. Für den Frequenzbereich > 0 bis 1 Hz wird die biologische Grundlage für Basisgrenzwerte und Referenzwerte in ICNIRP (1994) geliefert. Eine eingehendere Prüfung ist an anderer Stelle verfügbar (NRPB 1991, 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993; Blank 1995; NAS 1996; Polk und Postow 1996; Ueno 1996).

Direkte Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder

Epidemiologische Studien. Es gibt zahlreiche Übersichten über epidemiologische Studien zum Krebsrisiko im Zusammenhang mit der Exposition durch Felder mit Netzfrequenzen (NRPB 1992, 1993, 1994; ORAU 1992; Savitz 1993; Heath 1996; Stevens und Davis 1996; Tenforde 1996; NAS 1996). Ähnliche Übersichten wurden zum Risiko beeinträchtigter Reproduktionsgesundheit im Zusammenhang mit der Exposition durch EMF veröffentlicht (Chernoff et al. 1992; Brent et al. 1993; Shaw und Croen 1993; NAS 1996; Tenforde 1996).

Reproduktionsgesundheit. Epidemiologische Untersuchungen der Auswirkungen auf Schwangerschaften konnten bisher keinen konsistenten Nachweis beeinträchtigter Reproduk-

tionsgesundheit bei an Bildschirmen arbeitenden Frauen erbringen (Bergqvist 1993; Shaw und Croen 1993; NRPB 1994a; Tenforde 1996). So ergab beispielsweise eine Meta-Analyse kombinierter Untersuchungen, die Schwangere an Bildschirmarbeitsplätzen mit Frauen verglichen, die nicht an Bildschirmgeräten arbeiteten, kein erhöhtes Risiko spontaner Fehlgeburten oder Mißbildungen (Shaw und Croen 1993). Zwei weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf tatsächliche Messungen der von Bildschirmgeräten ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder; die eine beschrieb einen Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen extrem niederfrequenten Magnetfeldern von Bildschirmgeräten und Fehlgeburten (Lindbohm et al. 1992), während die andere keinen derartigen Zusammenhang feststellen konnte (Schnorr et al. 1991). Eine prospektive Studie auf Basis einer großen Zahl von Fällen mit hoher Teilnehmerzahl und genauer Expositionsermittlung (Bracken et al. 1995) berichtete, daß es weder eine Beziehung zwischen Geburtsgewicht, noch eine zwischen intrauteriner Wachstumsrate und einer Exposition durch extrem niederfrequente Felder gibt. Negative Folgen waren nicht mit einer stärkeren Exposition verbunden. Zu den Expositionsmessungen gehörte die Stromführungskapazität von Hochspannungsleitungen außerhalb von Wohnungen, 7-tägige Messungen der Exposition von Personen, 24-stündige Messungen in Wohnungen und eigene Schilderungen über die Nutzung von Heizdecken, geheizten Wasserbetten und Bildschirmgeräten. Die meisten der derzeit verfügbaren Informationen weisen nicht auf eine Beziehung zwischen beruflicher Exposition durch Bildschirmgeräte und beeinträchtigter Reproduktionsgesundheit hin (NRPB 1994a; Tenforde 1996).

Krebsuntersuchungen am Wohnort. Die Möglichkeit einer Beziehung zwischen der Exposition durch ELF Magnetfelder und einem erhöhten Krebsrisiko hat zu beträchtlichen Kontroversen geführt. Es sind verschiedene Berichte zu diesem Thema erschienen, seit Wertheimer und Leeper (1979) einen Zusammenhang zwischen der Kindersterblichkeit an Krebs und der räumlichen Nähe von Wohnungen zu Hochspannungsleitungen herstellten, den die Forscher als *Hochstromkonfiguration* bezeichneten. Nach der Basishypothese, die aus der ursprünglichen Studie abgeleitet wurde, kann in Wohngebieten der Beitrag der umgebenden 50/60-Hz-Magnetfelder aus externen Quellen wie Hochspannungsleitungen mit einem erhöhten Krebsrisiko bei Kindern in Zusammenhang gebracht werden.

Bis heute sind über ein Dutzend Untersuchungen über Krebs bei Kindern und die Exposition durch Magnetfelder mit Netzfrequenzen, die von Hochspannungsleitungen in der Nähe von Wohnungen erzeugt werden, vorgelegt worden. In diesen Studien wurde die Exposition durch Magnetfelder aufgrund kurzzeitiger Messungen oder auf Basis der Entfernung zwischen Wohnung und Hochspannungsleitung sowie, in den meisten Fällen, der Leitungskonfiguration geschätzt. Manche Untersuchungen berücksichtigten zusätzlich die Strombelastung der Leitung. Die Ergebnisse sind hinsichtlich Leukämie die konsistentesten. Von 13 Studien (Wertheimer und Leeper 1979; Fulton et al. 1980; Myers et al. -1985; Tomenius 1986; Savitz et al.

1988; Coleman et al. 1989; London et al. 1991; Feychting und Ahlbom 1993; Olsen et al. 1993; Verkasalo et al. 1993; Michaelis et al. 1997; Linet et al. 1997; Tynes und Haldorsen 1997) haben alle außer fünf ein relatives Risiko zwischen 1,5 und 3,0 geschätzt.

Sowohl direkte Magnetfeldmessungen als auch Schätzungen auf Basis benachbarter Hochspannungsleitungen sind nur grobe Näherungen für die Exposition, die zu verschiedenen Zeiten auftrat, bevor Fälle von Leukämie diagnostiziert wurden, und es ist nicht klar, welches der beiden Verfahren die gültigeren Schätzungen liefert. Obwohl die Ergebnisse nahelegen, daß Magnetfelder tatsächlich für den Zusammenhang mit dem Leukämierisiko von Bedeutung sind, gibt es Unsicherheiten wegen der kleinen Fallzahlen und wegen einer Korrelation zwischen Magnetfeld und der Nähe zu Hochspannungsleitungen (Feychting et al. 1996).

Über die Ätiologie der meisten Krebsformen bei Kindern ist nur wenig bekannt, jedoch hatten verschiedene Versuche zur Kontrolle potentieller Confounder wie sozioökonomischer Status und Luftverschmutzung durch Autoabgase kaum Einfluß auf die Ergebnisse. Studien, die die Verwendung elektrischer Geräte (vor allem von Heizdecken) in Beziehung zu Krebs und anderen Gesundheitsproblemen setzten, erbrachten im allgemeinen negative Ergebnisse (Preston-Martin et al. 1988; Verreault et al. 1990; Vena et al. 1991, 1994; Li et al. 1995). Nur zwei Fall-Kontroll-Studien haben den Gebrauch von Haushaltsgeräten in Beziehung zum Leukämierisiko bei Kindern ausgewertet. Die eine wurde in Denver durchgeführt (Savitz et al. 1990) und legte die Vermutung auf einen Zusammenhang zur pränatalen Verwendung von Heizdecken nahe, die andere, in Los Angeles durchgeführt (London et al. 1991), ergab eine Beziehung zwischen Leukämie und Kindern, die elektrische Haartrockner benützten und Schwarzweiß-Fernsehen schauten.

Die Tatsache, daß die Erkenntnisse über Leukämie, die auf der räumlichen Nähe von Wohnungen zu Hochspannungsleitungen beruhen, relativ konsistent sind, veranlaßte das Komitee der US-amerikanischen National Academy of Sciences zu der Schlußfolgerung, daß Kinder, die in der Nähe von Hochspannungsleitungen wohnen, einem erhöhten Leukämierisiko ausgesetzt zu sein scheinen (NAS 1996). Wegen der kleinen Zahlen sind die Konfidenzintervalle der einzelnen Studien groß; insgesamt sind die Resultate jedoch konsistent, mit einem gesamten relativen Risiko von 1,5 (NAS 1996). Dagegen ergaben Kurzzeitmessungen von Magnetfeldern in einigen der Studien keine Beweise für eine Beziehung zwischen Expositionen durch 50/60-Hz-Felder und dem Risiko von Leukämie oder anderen Krebsarten bei Kindern. Das Komitee war nicht davon überzeugt, daß das erhöhte Risiko durch die Exposition durch Magnetfelder erklärt werde, da es keine erkennbare Beziehung gäbe, wenn die Exposition aufgrund von Magnetfeldmeßwerten geschätzt werde, die sowohl in der Wohnung von Leukämiepatienten als auch in jenen von Kontrollpersonen gewonnen wurden. Es wurde vermutet, daß die Vermengung mit einem bisher unbekanntem Risikofaktor für

Leukämie bei Kindern in Verbindung mit der Nähe der Wohnung zu Hochspannungsleitungen die Erklärung sein könnte, doch wurden keine möglichen Faktoren genannt.

Nachdem das NAS-Komitee ihre Überprüfung abgeschlossen hatte, wurde über die Ergebnisse einer in Norwegen durchgeführten Studie berichtet (Tynes and Haldorsen 1997). Diese Studie umfaßte 500 Fälle aller Krebsformen bei Kindern. Die jeweilige Exposition der einzelnen Individuen wurde durch Berechnung der durch Stromleitungen am Wohnort erzeugten Magnetfeldwerte geschätzt, wobei der Durchschnitt über ein ganzes Jahr gebildet wurde. Eine Beziehung zwischen Leukämierisiko und Magnetfeldern am Wohnort zum Zeitpunkt der Diagnose konnte nicht festgestellt werden. Die Entfernung von der Hochspannungsleitung, die Exposition im ersten Lebensjahr, die Exposition der Mutter zum Zeitpunkt der Empfängnis sowie eine Exposition, die größer war als der Median der Kontrollen ergaben keine Beziehung zu Leukämie, Hirntumoren oder Lymphomen. Allerdings war die Zahl der exponierten Fälle klein.

Auch aus Deutschland wurde nach der Fertigstellung der NAS-Übersicht eine Studie gemeldet (Michaelis et al. 1997). Es handelte sich um eine Fall-Kontroll-Studie über Leukämie bei Kindern auf der Grundlage von 129 Fällen und 328 Kontrollpersonen. Die Expositionsbeurteilung umfaßte über 24 Stunden gehende Messungen des Magnetfeldes im Kinderzimmer am Wohnort, in dem das Kind die meiste Zeit vor dem Datum der Diagnose gelebt hatte. Ein erhöhtes relatives Risiko von 3,2 wurde für $> 0,2 \mu\text{T}$ festgestellt.

Eine große US-amerikanische Fall-Kontroll-Studie (638 Fälle und 620 Kontrollpersonen), die herausfinden sollte, ob akute lymphoblastische Leukämie bei Kindern mit einer Exposition durch 60-Hz-Magnetfelder in Zusammenhang steht, wurde von Linet et al. (1997) veröffentlicht. Die Magnetfeldexpositionen wurden durch 24-stündige Mittelwert-Messungen im Schlafzimmer und jeweils 30 Sekunden dauernde Messungen in verschiedenen anderen Räumen ermittelt. Die Messungen wurden in Wohnungen vorgenommen, in denen die Kinder 70 % der fünf Jahre vor dem Jahr der Diagnose (bzw. den entsprechenden Zeiträumen für die Kontrollpersonen) gelebt hatten. Die Leitungsklassifizierungen (wire codes) wurden für Fall-Kontroll-Paare, bei denen beide Individuen in den Jahren vor der Diagnose ihren Wohnsitz nicht gewechselt hatten, ermittelt. Es waren insgesamt 416 solcher Paare, die eine Ermittlung ermöglichten. Es gab kein Anzeichen einer Beziehung zwischen den Leitungsparametern und Leukämie. Hinsichtlich der Magnetfeldmessungen sind die Ergebnisse interessanter. Für die Schwelle von $0,2 \mu\text{T}$ (cut off point) ergaben die unangepaßten (unmatched) Analysen und die angepaßten (matched) Analysen ein relatives Risiko von 1,2 bzw. 1,5. Für die Schwelle von $0,3 \mu\text{T}$ wurde ein unangepaßtes, auf 45 Expositionsfällen basierendes, relatives Risiko von 1,7 geschätzt. Daher lassen die Meßergebnisse auf eine positive Beziehung zwischen Magnetfeldern und Leukämierisiko schließen. Diese Studie ist ein bedeutender Beitrag, was ihren Umfang, die Zahl der Subjekte in den höher exponierten Kategorien, den Zeitpunkt der Mes-

sungen relativ zum Auftreten der Leukämie (meist binnen 24 Monaten nach der Diagnose), andere Messungen zur Gewinnung von Expositionsdaten und die Qualität der Analyse angeht, die die Berücksichtigung mehrerer potentieller Confounder ermöglicht. Zu den möglichen Schwächen gehören das Auswahlverfahren für die Kontrollpersonen, die Teilnehmerzahlen sowie die für die statistische Datenanalyse verwendeten Verfahren. Die zur Messung verwendeten Instrumente berücksichtigten weder transiente Felder noch Harmonische höherer Ordnung. Der Umfang der Studie ist so, daß ihre Ergebnisse in Verbindung mit jenen anderer Studien die zuvor festgestellte Beziehung zu den Leitungsparametern beträchtlich schmälern (wenn auch nicht unbedingt entwerten) würden.

Im Laufe der Jahre hat sich ferner ein erhebliches Interesse an der Frage entwickelt, ob es eine Beziehung zwischen der Exposition durch Magnetfelder und Hirntumoren bei Kindern gibt, der bei Kindern zweithäufigsten Krebsform. Drei vor kurzem veröffentlichte Studien, die nach der Bestandsaufnahme durch das NAS-Komitee fertiggestellt wurden, konnten eine Beziehung zwischen Hirntumoren bei Kindern und ihrer Exposition durch Magnetfelder nicht bestätigen, gleichgültig, ob Hochspannungsleitungen oder Heizdecken die Quelle waren oder ob die Magnetfelder mittels Berechnungen oder über die Leitungsparameter abgeschätzt wurden (Guénel et al. 1996); Preston-Martin et al. 1996a, b; Tynes and Haldorsen 1997).

Es liegen nur spärliche Daten über Krebs bei Erwachsenen und die Exposition durch Magnetfelder in der Wohnung vor (NAS 1996). Die wenigen veröffentlichten Untersuchungen (Wertheimer und Leeper 1979; McDowall 1985; Severson et al. 1988; Coleman et al. 1989; Schreiber et al. 1993; Feychting und Ahlbom 1994; Li et al. 1996; Verkasalo et al. 1996) kranken in gewisser Hinsicht alle an der geringen Zahl von Expositionsfällen, so daß sich keine Schlußfolgerungen ziehen lassen.

Nach Auffassung der ICNIRP sind die Ergebnisse der epidemiologischen Forschung über die Exposition durch EMF und Krebs, einschließlich Leukämie bei Kindern, angesichts fehlender experimenteller Untersuchungen nicht stichhaltig genug, um eine wissenschaftliche Grundlage für die Festsetzung von Expositionsrichtlinien bilden zu können. Diese Einschätzung stimmt auch mit jüngeren Übersichten überein (NRPB 1992, 1994b; NAS 1996, CRP 1997).

Untersuchungen am Arbeitsplatz. Zur Beurteilung möglicher Beziehungen zwischen der Exposition durch ELF-Felder und Krebsrisiken bei Beschäftigten in elektrotechnischen Berufen sind zahlreiche epidemiologische Studien durchgeführt worden. Die erste Untersuchung dieser Art (Milham 1982) nutzte einen Sterbeurkunden-Datenbestand, der sowohl Tätigkeitsbezeichnungen als auch Informationen über die Krebssterblichkeit bei Krebskranken umfaßte. Als grobes Verfahren zur Beurteilung der Exposition klassifizierte Milham die Tätigkeitsbezeichnungen nach der vermuteten Exposition durch Magnetfelder und

stellte ein erhöhtes Leukämierisiko bei in der Elektrotechnik Tätigen fest. Später durchgeführte Studien (Savitz und Ahlbom 1994) nutzten ähnliche Datenbestände; die Krebsformen, für die ein erhöhtes Vorkommen festgestellt wurde, variierten mit den Studien, insbesondere wenn Unterarten spezifiziert wurden. Über erhöhte Risiken für verschiedene Formen der Leukämie und Tumoren des Nervengewebes sowie in manchen Fällen für Brustkrebs bei Frauen und Männern wurde berichtet (Demers et al. 1991; Matanoski et al. 1991; Tynes et al. 1992; Loomis et al. 1994). Die genannten Studien weisen in gewisser Hinsicht inkonsistente Ergebnisse auf und leiden ferner an sehr groben Expositionsbeurteilungen sowie an mangelnder Kontrolle von Confoundern, etwa der Exposition durch das am Arbeitsplatz befindliche Lösungsmittel Benzol.

Drei jüngere Untersuchungen waren bemüht, die Defizite früherer Arbeiten zu überwinden, indem sie Messungen der Exposition durch ELF-Felder am Arbeitsplatz durchführten und die Dauer der verrichteten Arbeiten berücksichtigten (Floderus et al. 1993; Thériault et al. 1994; Savitz und Loomis 1995). Es wurde ein erhöhtes Krebsrisiko der exponierten Personen festgestellt, doch variierte die Krebsform von Studie zu Studie. Floderus et al. (1993) beobachteten eine signifikante Beziehung zur Leukämie; auch Thériault et al. (1994) stellten eine Beziehung fest, aber eine schwache und nicht-signifikante; Savitz und Loomis (1995) konnten keinen Zusammenhang beobachten. Bei Unterformen der Leukämie war die Inkonsistenz noch größer, doch war die Zahl der jeweiligen Fälle gering. Bei Tumoren des Nervengewebes stellten Floderus et al. (1993) ein Übermaß an Glioblastomen fest (Astrozytom III-IV), während sowohl Thériault et al. (1994) als auch Savitz und Loomis (1995) nur Anhaltspunkte für ein vermehrtes Auftreten von Gliomen fanden (Astrozytom I-II). Sollte es tatsächlich eine Verbindung zwischen der Exposition durch Magnetfelder am Arbeitsplatz und Krebs geben, so wären von diesen kürzlichen Studien auf der Grundlage differenzierter Expositionsdaten eine größere Konsistenz und stärker ausgeprägte Beziehungen zu erwarten.

Forscher haben auch die Möglichkeit untersucht, daß ELF elektrische Felder mit Krebs in Zusammenhang stehen können. Bei den drei Stromversorgungsunternehmen, die sich an der Studie von Thériault et al. (1994) über Magnetfelder beteiligten, wurden auch elektrische Felder untersucht. Bei Arbeitern mit Leukämie wurde in einem der drei Unternehmen eine größere Wahrscheinlichkeit dafür berichtet, daß sie elektrischen Feldern ausgesetzt waren, als bei Arbeitern einer Kontrollgruppe. Ferner war die Beziehung in jener Gruppe stärker, die sowohl starken elektrischen als auch magnetischen Feldern ausgesetzt war (Miller et al. 1996). Im zweiten Unternehmen berichteten die Forscher keine Beziehung zwischen Leukämie und größerer kumulativer Exposition durch elektrische Felder am Arbeitsplatz, doch ergaben einige Analysen einen Zusammenhang mit Hirntumoren (Guénel et al. 1996). Ein Zusammenhang mit Dickdarmkrebs wurde ebenfalls gemeldet, doch in anderen Studien mit großen Zahlen bei Elektroarbeitern wurde diese Krebsart nicht festgestellt. Im dritten

Unternehmen konnte kein Zusammenhang zwischen starken elektrischen Feldern und Hirntumoren oder Leukämie festgestellt werden, doch war diese Studie kleiner, so daß auch die Wahrscheinlichkeit, kleine Veränderungen, falls vorhanden, festzustellen, geringer war (Baris et al. 1996).

Kürzlich wurde vermutet, es bestehe ein Zusammenhang zwischen der Alzheimer-Krankheit und der berufsbedingten Exposition durch Magnetfelder (Sobel und Davanipour 1996). Dieser Effekt hat sich allerdings nicht bestätigt.

Laboruntersuchungen. Die folgenden Abschnitte geben eine Zusammenfassung und eine kritische Beurteilung von Laboruntersuchungen zu den biologischen Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder mit Frequenzen unter 100 kHz. Die Ergebnisse von Studien an Freiwilligen, die unter kontrollierten Bedingungen exponiert wurden, werden getrennt von den Resultaten jener Untersuchungen dargestellt, die im Labor an Zellkulturen, Geweben und Versuchstieren gewonnen wurden.

Untersuchungen an Freiwilligen. Die Exposition durch ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld kann zur Wahrnehmung dieses Feldes führen, wenn an der Körperoberfläche eine veränderliche elektrische Ladung induziert wird, welche die Körperhaare zur Vibration bringt. Verschiedene Studien haben gezeigt, daß die meisten Menschen elektrische 50/60-Hz-Felder von über 20 kV m^{-1} und eine kleine Minderheit auch Felder unter 5 kV m^{-1} wahrnehmen können (UNEP/WHO/IRPA 1984; Tenforde 1991).

Geringfügige Veränderungen der Herzfunktion traten bei Freiwilligen auf, die kombinierten elektrischen und magnetischen 60-Hz-Feldern (9 kV m^{-1} , $20 \mu\text{T}$) ausgesetzt wurden (Cook et al. 1992; Graham et al. 1994). Die Herzfrequenz im Ruhezustand war während oder unmittelbar nach der Exposition leicht, aber signifikant reduziert (um 3-5 Schläge pro Minute). Diese Reaktion trat bei Expositionen durch stärkere (12 kV/m , $30 \mu\text{T}$) oder schwächere (6 kV/m , $10 \mu\text{T}$) Felder nicht auf oder war schwächer, wenn die Versuchsperson geistig aktiv war. Keine der Versuchspersonen dieser Studien konnte die Gegenwart der Felder wahrnehmen, und es gab auch keine weiteren konsistenten Ergebnisse in einer umfangreichen Testreihe mit sensorischen und Wahrnehmungsprüfungen.

In Laboruntersuchungen an Personen, die 50-Hz-Feldern im Bereich 2-5 mT ausgesetzt waren, wurde keine physiologischen oder psychologischen Beeinträchtigungen festgestellt (Sander et al. 1982; Ruppe et al. 1995). In den Studien von Sander et al. (1982) und Graham et al. (1994) gab es keine beobachtbaren Veränderungen der chemischen Blutwerte, Blutkörperchenzahl, Blutgase, Laktatwerte, beim EKG, EEG, bei der Hauttemperatur oder den Kreislaufhormonspiegeln. Auswirkungen der Exposition durch 60-Hz-Magnetfelder auf den nächtlichen Melatoninspiegel im Blut konnten jüngere Studien an Freiwilligen ebenfalls nicht nachweisen (Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996).

Genügend starke ELF-Magnetfelder können direkt periphere Nerven- und Muskelgewebsreizungen auslösen und kurze Magnetfeldpulse wurden klinisch zur Reizung der Nerven in den Gliedmaßen eingesetzt, um die Intaktheit der Nervenbahnen zu prüfen. Auch bei Freiwilligen, die 1-kHz-Gradienten-Magnetfeldern in der bildgebenden Kernspintomographie ausgesetzt waren, wurde eine periphere Nerven- und Muskelstimulation beschrieben. Die Schwellenwerte der magnetischen Flußdichte lagen bei einigen Millitesla, und die entsprechenden induzierten Stromdichten im peripheren Gewebe, die durch gepulste Felder, die durch rasch wechselnde Gradienten erzeugt wurden, betragen rund 1 A m^{-2} . Zeitlich veränderliche Magnetfelder, die im Gewebe Stromdichten von mehr als 1 A m^{-2} induzieren, führen zu Nervenreizungen und können irreversible biologische Wirkungen wie Herzkammerflimmern hervorrufen (Tenforde und Kaune 1987; Reilly 1989). In einer Studie, die Elektromyographien des menschlichen Arms umfaßte (Polson et al. 1982), wurde festgestellt, daß ein gepulstes Feld mit dB/dt von über 10^4 T s^{-1} erforderlich war, um den Medianusstamm zu stimulieren. Auch die Dauer des magnetischen Reizes hat sich als wichtiger Parameter für die Stimulation erregbaren Gewebes erwiesen.

Schwellenwerte unter 100 mA m^{-2} lassen sich aus Untersuchungen visueller und mentaler Funktionen Freiwilliger ableiten. Änderungen der Reaktionslatenz in komplexen Schlußfolgerungstests wurden bei Freiwilligen beobachtet, die schwachen elektrischen Strömen mit Netzfrequenzen ausgesetzt wurden, die durch an Kopf und Schultern befestigten Elektroden flossen; die Stromdichten lagen den Schätzungen zufolge zwischen 10 und 40 mA m^{-2} (Stollery 1986, 1987). Schließlich wurde in zahlreichen Studien berichtet, daß die Freiwilligen schwache flimmernde, visuelle Sinneswahrnehmungen, sogenannte magnetische Phosphene erlebten, während sie niederfrequenten Magnetfeldern von über 3-5 mT ausgesetzt waren (Silny 1986). Diese visuellen Wirkungen können auch durch direktes Anlegen schwacher elektrischer Ströme an den Kopf hervorgerufen werden. Bei 20 Hz werden Stromdichten von rund 10 mA m^{-2} in der Retina als Schwellenwert für die Induzierung von Phosphenen angenommen, was über den typischen endogenen Stromdichten in elektrisch erregbaren Geweben liegt. Höhere Schwellenwerte wurden sowohl bei niedrigeren als auch bei höheren Frequenzen beobachtet (Lövsund et al. 1980; Tenforde 1990).

Es wurden Studien mit visuell evozierten Potentialen bei 50 Hz durchgeführt, die Schwellenwerte für Wirkungen bei Flußdichten von 60 mT ergaben (Silny 1986). In Übereinstimmung mit diesem Ergebnis konnten weder Sander et al. (1982) mit einem 50-Hz/5-mT-Feld noch Graham et al. (1994) mit kombinierten elektrischen und magnetischen 60-Hz-Feldern von bis zu 12 kV m^{-1} bzw. $30 \text{ } \mu\text{T}$ Wirkungen hinsichtlich visuell evozierter Potentiale nachweisen.

Studien mit Zellkulturen und Tieren. Trotz der zahlreichen Studien, die durchgeführt wurden, um biologische Auswirkungen von elektrischen und magnetischen ELF-Feldern nachzuweisen, haben nur wenige systematische Untersuchungen die Schwellenwerte der Feldcharakteristika bestimmt, die zur nachhaltigen Störung biologischer Funktionen führen. Es gilt als sicher, daß ein induzierter elektrischer Strom Nerven- und Muskelgewebe direkt reizen kann, wenn die induzierte Stromdichte bestimmte Schwellenwerte überschreitet (UNEP/WHO/IRPA 1987; Bernhardt 1992; Tenforde 1996). Stromdichten, die nicht in der Lage sind, erregbare Gewebe direkt zu reizen, können dennoch auf die fortwährende elektrische Aktivität wirken und die neuronale Erregbarkeit beeinflussen. Das Zentralnervensystem reagiert bekanntlich empfindlich auf die endogenen elektrischen Felder, die durch die Aktion benachbarter Nervenzellen erzeugt wird, und zwar bei Werten, die unter denen liegen, die zur direkten Stimulation erforderlich sind.

Viele Studien haben darauf hingedeutet, daß die Übertragung schwacher elektrischer Signale im ELF-Bereich Wechselwirkungen mit der Zellmembran verursacht, die zu zytoplasmischen biochemischen Reaktionen führen, welche ihrerseits Veränderungen der funktionalen und Proliferationsstadien der Zellen nach sich ziehen. Anhand einfacher Modelle des Verhaltens einzelner Zellen in schwachen Feldern wurde berechnet, daß ein elektrisches Signal im extrazellulären Feld größer sein muß als annähernd $10\text{-}100\text{ mV m}^{-1}$ (was einer induzierten Stromdichte von ungefähr $2\text{-}20\text{ mA m}^{-2}$ entspricht), um den endogenen physikalischen und biologischen Rauschpegel in Zellmembranen zu überschreiten (Astumian et al. 1995). Nach vorliegenden Beweisen können verschiedene strukturelle und funktionale Eigenschaften von Membranen als Reaktion auf induzierte ELF-Felder mit einer Stärke von 100 mV m^{-1} oder darunter verändert werden (Sienkiewicz et al. 1991; Tenforde 1993). Es sind neuroendokrine Veränderungen (z. B. Unterdrückung der nächtlichen Melatoninproduktion) als Reaktion auf induzierte elektrische Felder von 10 mV m^{-1} oder weniger, was einer induzierten Stromdichte von annähernd 2 mA m^{-2} oder weniger entspricht, beschrieben worden (Tenforde 1991, 1996). Es gibt allerdings keinen eindeutigen Beweis dafür, daß diese biologischen Wechselwirkungen niederfrequenter Felder zu nachteiligen Auswirkungen auf die Gesundheit führen.

Es hat sich gezeigt, daß induzierte elektrische Felder und Ströme, deren Stärke die der in Gewebe vorhandenen endogenen bioelektrischen Signale übersteigen, eine Reihe von physiologischen Effekten verursachen können, die an Stärke zunehmen, wenn die induzierte Stromdichte erhöht wird (Bernhardt 1979; Tenforde 1996). Bei einer Spanne der Stromdichte von $10\text{-}100\text{ mA m}^{-2}$ wurde von Auswirkungen auf das Gewebe und Veränderungen der kognitiven Hirnfunktionen berichtet (NRPB 1992, NAS 1996). Wenn die induzierte Stromdichte 100 bis mehrere hundert mA m^{-2} bei Frequenzen zwischen ungefähr 10 Hz und 1 kHz übersteigt, werden die Schwellen für die neuronale und neuromuskuläre Stimulation überschritten. Die

Schwellenwerte der Stromdichten nehmen bei Frequenzen unter mehreren Hertz und über 1 kHz allmählich zu. Bei extrem hohen Stromdichten von mehr als 1 A m^{-2} können schließlich schwere und potentiell lebensbedrohende Auswirkungen, wie z. B. kardiale Extrasystolen, Kammerflimmern, Muskelkrämpfe und Atemstillstand auftreten. Der Schweregrad und die Möglichkeit der Irreversibilität von Gewebewirkungen nimmt mit chronischer Exposition bei induzierten Stromdichten von über 10 bis 100 mA m^{-2} zu. Es scheint daher angebracht, die Exposition des Menschen auf Felder zu beschränken, die bei Frequenzen von einigen wenigen Hertz bis 1 kHz Stromdichten von nicht größer als 10 mA m^{-2} in Kopf, Hals und Rumpf induzieren.

Man nimmt an, daß auf biogene Magnetitpartikel im Hirngewebe wirkende magneto-mechanische Schwingungskräfte und Drehmomente einen Mechanismus für die Übertragung von Signalen aus magnetischen ELF-Feldern bilden könnten. Kirschvink et al. (1992b) schlugen ein Modell vor, wonach man sich auf Magnetitpartikel einwirkende magnetische ELF-Kräfte so vorstellt, daß sie das Öffnen und Schließen von druckempfindlichen Ionenkanälen in Membranen bewirken. Bei diesem Modell erweist sich allerdings die Spärlichkeit der Magnetitpartikel im Verhältnis zur Zahl der Zellen im Hirngewebe als problematisch. Menschliches Hirngewebe enthält z. B. einige Millionen Magnetitpartikel pro Gramm, verteilt auf 10^5 getrennte Cluster aus 5-10 Partikeln (Kirschvink et al. 1992a). Die Zahl der Zellen im Hirngewebe übersteigt somit die Zahl der Magnetitpartikel um einen Faktor von ungefähr 100, und es ist schwierig, sich vorzustellen, wie oszillierende magnetomechanische Wechselwirkungen eines ELF-Feldes mit Magnetitkristallen eine nennenswerte Zahl von druckempfindlichen Ionenkanälen im Gehirn beeinträchtigen können. Weitere Studien sind unbedingt erforderlich, um die biologische Rolle des Magnetits und den möglichen Mechanismus aufzuklären, durch den dieses Mineral eine Rolle bei der Übertragung von magnetischen ELF-Signalen spielen könnte.

Ein wichtiger Punkt bei der Bewertung der elektromagnetischen Felder ist die mögliche Entstehung von teratogenen und die Entwicklung beeinflussenden Wirkungen. Geht man von veröffentlichten, wissenschaftlichen Daten aus, so ist es unwahrscheinlich, daß niederfrequente Felder negative Auswirkungen auf die embryonale und postnatale Entwicklung der Säugetierspezies haben (Chernoff et al. 1992; Brent et al. 1993; Tenforde 1996). Ferner ist aus derzeit verfügbarem Beweismaterial abzuleiten, daß es kaum denkbar ist, daß somatische Mutationen und genetische Auswirkungen durch Exposition in elektrischen und magnetischen Feldern mit Frequenzen unter 100 kHz bedingt sind (Cridland 1993; Sienkiewicz et al. 1993).

In der Literatur gibt es zahlreiche Berichte über *in-vitro*-Auswirkungen von ELF-Feldern auf die Eigenschaften der Zellmembran (Iontentransport und Wechselwirkungen zwischen Mitogenen und Zelloberflächenrezeptoren) und Veränderungen der Zellfunktionen und der

Wachstumseigenschaften (z. B. gesteigerte Proliferation und Stoffwechselveränderungen, Genexpression, Proteinbiosynthese und Enzymaktivitäten) (Cridland 1993; Sienkiewicz et al. 1993; Tenforde 1991, 1992, 1993, 1996). Besondere Aufmerksamkeit wurde gelenkt auf die Auswirkungen von niederfrequenten Feldern auf den Kalziumionentransport durch die Zellmembranen und die intrazelluläre Konzentration dieses Ions (Walleczek und Liburdy 1990; Liburdy 1992; Walleczek 1992), die Messenger-RNA und die Proteinsynthese (Goodman et al. 1983; Goodman und Henderson 1988, 1991; Greene et al. 1991; Phillips et al. 1992) sowie die Aktivität von Enzymen, wie z. B. Ornithin-Decarboxylase (ODC), die mit der Zellproliferation und Tumorbildung in Verbindung stehen (Byus et al. 1987, 1988; Litovitz et al. 1991, 1993). Bevor diese Beobachtungen jedoch zur Festlegung von Expositionsgrenzen genutzt werden können, ist es von Bedeutung, sowohl deren Reproduzierbarkeit als auch deren Relevanz für die Entstehung von Krebs oder sonstige negative Auswirkungen auf die Gesundheit zu ermitteln. Dieser Punkt wird durch die Tatsache untermauert, daß es Schwierigkeiten gab, einige der Schlüsselbeobachtungen der Feldauswirkungen auf die Genexpression und die Proteinsynthese zu reproduzieren (Lacy-Hulbert et al. 1995; Saffer und Thurston 1995). Die Autoren dieser Replikationsstudien haben in den früheren Studien verschiedene Mängel festgestellt, einschließlich unzureichender Temperaturkontrolle, Mangel an geeigneten internen Kontrollproben und die Verwendung von Techniken mit niedriger Auflösung für die Analyse der Bildung der Messenger-RNA-Transkriptoren. Der als Reaktion auf die Feldexposition verzeichnete, vorübergehende Anstieg der ODC-Aktivität ist nur von geringem Ausmaß und steht nicht mit der *de-novo*-Synthese des Enzyms in Verbindung (anders als die chemischen Tumorpromotoren, wie z. B. Phorbolster) (Byus et al. 1988). In Versuchen mit ODC wurden meistens zelluläre Präparate verwendet. Es sind weitere Studien erforderlich, um festzustellen, ob es *in-vivo*-Auswirkungen auf ODC gibt, obwohl ein Bericht vorliegt, in dem die Vermutung geäußert wird, daß es in einem Test auf Brusttumorbildung bei Ratten Wirkungen auf ODC gibt (Mevissen et al. 1995).

Es gibt keinen Beweis dafür, daß ELF-Felder die DNA- und Chromatin-Struktur verändern, und es sind keine resultierenden und neoplastischen Transformationen zu erwarten. Diese Aussagen werden durch Ergebnisse von Laborversuchen unterstützt, die darauf abzielten, DNA- und Chromosomenschädigungen, mutagene Ereignisse und eine erhöhte Transformationsfrequenz als Reaktion auf die ELF-Feld-Exposition nachzuweisen (NRPB 1992; Murphy et al. 1993; McCann et al. 1993; Tenforde 1996). Das Fehlen von Auswirkungen auf die Chromosomenstruktur läßt vermuten, daß ELF-Felder, sofern sie den Prozeß der Karzinogenese in irgendeiner Weise beeinflussen, wahrscheinlich eher als Promotoren denn als Initiatoren fungieren und dabei eher die Proliferation genetisch veränderter Zellen beschleunigen als die Initialverletzung der DNA oder des Chromatins verursachen. Ein Einfluß auf die Tumorentwicklung könnte durch epigenetische Auswirkungen

dieser Felder vermittelt werden, wie z. B. Veränderungen der Zellsignalwege oder der Genexpression. Neuere Studien haben sich daher auf den Nachweis möglicher Auswirkungen der ELF-Felder auf die Förderung und das Fortschreiten der Tumorentwicklung nach Initiation durch ein chemisches Karzinogen konzentriert.

Studien über *in-vitro*-Tumorzellenwachstum und die Entwicklung von transplantierten Tumoren bei Nagetieren haben keinen einschlägigen Beweis für mögliche karzinogene Auswirkungen der Exposition in ELF-Feldern erbracht (Tenforde 1996). Verschiedene Untersuchungen über eine direktere Relevanz für den Krebs beim Menschen haben *in-vivo*-Tests über die tumorfördernde Wirkung von magnetischen ELF-Feldern auf Haut-, Leber-, Hirn- und Brusttumoren bei Nagetieren zur Folge gehabt. Aus drei Untersuchungen über die Hauttumorförderung (McLean et al. 1991; Rannug et al. 1993a, 1994) ließ sich kein Nachweis dafür ableiten, daß entweder eine kontinuierliche oder intermittierende Exposition durch Magnetfelder mit Netzfrequenz die Entwicklung von chemisch induzierten Tumoren fördert. Bei einer 60-Hz-Feldstärke von 2 mT konnte festgestellt werden, daß im Anfangsstadium des Versuchs Phorboläster als Co-Promotor für die Hauttumorbildung bei der Maus fungierte. Die statistische Bedeutung dieses Ergebnisses ging allerdings bei Abschluß der Studien in der 23. Woche verloren (Stuchly et al. 1992). In früheren Studien hatten dieselben Forscher nachgewiesen, daß eine Exposition in Feldern von 60 Hz und einer Feldstärke von 2 mT das Wachstum von DMBA-initiierten Hautzellen nicht begünstigte (McLean et al. 1991).

Versuche über die Entwicklung von durch ein chemisches Karzinogen ausgelöst und durch Phorboläster geförderten, transformierten Leberfoci bei Ratten mit partieller Leberresektion ließen nicht darauf schließen, daß die Exposition in 50-Hz-Feldern einer Stärke zwischen 0,5 bis 50 μ T fördernd oder mitfördernd wirkt (Rannug et al. 1993b, 1993c).

Studien über die Entwicklung von Brustkrebs bei mit einem chemischen Initiator behandelten Nagetieren haben vermuten lassen, daß die Exposition durch Magnetfelder mit Netzfrequenz von 0,01 bis 30 mT krebsfördernd wirkt (Beniashvili et al. 1991; Löscher et al. 1993; Mevissen et al. 1993, 1995; Baum et al. 1995; Löscher und Mevissen 1995). Diese Beobachtungen über das verstärkte Tumoraufreten bei magnetfeldexponierten Ratten haben zu der Vermutung geführt, daß sie mit der feldinduzierten Unterdrückung der pinealen Melatoninbildung und dem sich daraus ergebenden Anstieg des Steroidhormonspiegels und des erhöhten Brustkrebsrisikos in Verbindung stehen (Stevens 1987; Stevens et al. 1992). Es sind jedoch Wiederholungsversuche durch unabhängige Labors erforderlich, bevor Rückschlüsse hinsichtlich der Auswirkungen dieser Ergebnisse auf die fördernde Wirkung auf Brusttumoren durch magnetische ELF-Felder gezogen werden können. Es sollte ebenfalls bemerkt werden, daß sich aus neueren Studien keine Beweise für eine signifikante Wirkung einer Exposition durch magnetische ELF-Felder auf die Melatoninwerte beim Menschen ergeben haben (Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996).

Indirekte Wirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern

Indirekte Wirkungen elektromagnetischer Felder können durch den physikalischen Kontakt (Berühren oder Streifen) zwischen einer Person und einem Objekt, wie einer metallischen Konstruktion im Feld, mit unterschiedlichem elektrischen Potential entstehen. Das Ergebnis eines solchen Kontakts ist der Fluß elektrischer Ladung (Kontaktstrom), die auf dem Objekt oder auf dem Körper der Person akkumuliert worden ist. Im Frequenzbereich bis ungefähr 100 kHz kann der elektrische Stromfluß von einem im Feld befindlichen Gegenstand zum Körper einer Person zu einer Stimulation der Muskeln und/oder der peripheren Nerven führen. Das kann sich mit zunehmender Stromstärke als prickelnde Wahrnehmung, Schmerz durch elektrischen Stromschlag und/oder Verbrennung, Unfähigkeit, den Gegenstand loszulassen, Atemprobleme und - bei sehr hoher Stromdichte - als Herzkammerflimmern äußern (Tenforde und Kaune 1987). Schwellenwerte für diese Wirkungen sind frequenzabhängig, wobei die niedrigste Schwelle bei Frequenzen zwischen 10 und 100 Hz liegt. Die Schwellen für Reaktionen der peripheren Nerven bleiben niedrig für Frequenzen bis zu einigen wenigen kHz. Durch geeignete technische und/oder administrative Kontrollen und bereits durch das Tragen von persönlicher Schutzkleidung kann solchen Problemen vorgebeugt werden.

Zu einer Funkenentladung kann es kommen, wenn eine Person in die unmittelbare Nähe eines Gegenstandes mit einem anderen elektrischen Potentials kommt, ohne ihn wirklich zu berühren (Tenforde und Kaune 1987, UNEP/WHO/IRPA 1993). In einer Gruppe von Freiwilligen, die gegenüber dem Boden elektrisch isoliert war, und in der jeder die Fingerspitze in die Nähe eines geerdeten Gegenstands hielt, lag die Schwelle für die Wahrnehmung der Funkenentladung in 10 % der Fälle bei nur 0,6-1,5 kV m⁻¹. Die Schwellen, ab der unter diesen Expositionsbedingungen von Belästigung gesprochen wurde, beträgt ungefähr 2,0-3,5 kV m⁻¹. Starke Kontaktströme können zu Muskelkontraktionen führen. Bei männlichen Freiwilligen betrug die 50-Prozent-Schwelle für das Gefühl, unfähig zu sein, einen geladenen Leiter loszulassen, 9 mA bei 50/60 Hz, 16 mA bei 1 kHz, ungefähr 50 mA bei 10 kHz und ungefähr 130 mA bei 100 kHz (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Die Schwellenströme für verschiedene indirekte Auswirkungen von Feldern mit Frequenzen bis 100 kHz werden in Tabelle 2 zusammengefaßt (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Tabelle 2. Bereiche der Schwellenströme für indirekte Effekte (einschließlich Kinder, Frauen und Männer)

Indirekter Effekt	Schwellenstrom (mA) bei Frequenz:		
	50/60 Hz	1 kHz	100 kHz
Berührungswahrnehmung	0,2-0,4	0,4-0,8	25-40
Schmerz bei Fingerkontakt	0,9-1,8	1,6-3,3	33-55

Schmerzhafter Schock / Loslaß-Schwelle	8-16	12-24	112-224
Schwerer Schock / Atemprobleme	12-23	21-41	160-320

Zusammenfassung der biologischen Auswirkungen und epidemiologischen Studien (bis 100 kHz)

Mit der möglichen Ausnahme von Brusttumoren gibt es aus den Laborversuchen nur wenig Beweise dafür, daß sich Magnetfelder mit Netzfrequenzen fördernd auf die Tumorbildung auswirken. Obwohl noch weitere Tierversuche notwendig sind, um die Rolle der möglichen Einwirkungen der ELF-Felder auf in Zellen produzierte Signale und auf eine endokrine Regulierung zu klären - wobei beide die Tumorentwicklung durch Förderung der Proliferation initiiert Zellen beeinflussen könnten -, kann nur darauf geschlossen werden, daß es zur Zeit keinen überzeugenden Beweis für die karzinogene Wirkung dieser Felder gibt, und daß diese Daten nicht als Grundlage für eine Ausarbeitung von Expositionsrichtlinien genutzt werden können.

Laborversuche an Zellkulturen und Tieren haben keine begründeten Wirkungen niederfrequenter Felder erbracht, die für negative Gesundheitsfolgen sprechen, wenn die induzierte Stromdichte 10 mA m^{-2} oder weniger beträgt. Bei höheren induzierten Stromdichten ($10\text{-}100 \text{ mA m}^{-2}$) wurden dementsprechend signifikantere Auswirkungen auf das Gewebe beobachtet, wie z. B. funktionale Veränderungen im Nervensystem und sonstige Gewebeflässe (Tenforde 1996).

Daten über das mit der Exposition durch ELF-Felder verbundene Krebsrisiko bei Personen, die in der Nähe von Hochspannungsleitungen leben, weisen offenbar auf ein geringfügig größeres Risiko für Kinder hin, an Leukämie zu erkranken, obwohl neuere Untersuchungen die zuvor beobachtete schwache Korrelation in Frage stellen. Die Untersuchungen weisen jedoch nicht auf ein ähnlich erhöhtes Risiko hinsichtlich sonstiger Krebsformen bei Kindern oder Erwachsenen hin. Die Grundlage für die hypothetische Verbindung zwischen Leukämie beim Kind und dem Wohnsitz in unmittelbarer Nähe von Hochspannungsleitungen ist nicht bekannt; bezieht sich der Zusammenhang nicht auf von Hochspannungsleitungen erzeugte elektrische und magnetische ELF-Felder, dann müssen unbekannte Risikofaktoren für Leukämie auf unbestimmte Weise mit Hochspannungsleitungen verbunden sein. Mangels Unterstützung durch Laborversuche reichen die vorliegenden epidemiologischen Daten nicht aus, Expositionsrichtlinien festzulegen.

Von in der Elektrotechnik Tätigen wurde berichtet, daß sie einem erhöhten Risiko der Erkrankung an unterschiedlichen Krebsarten, wie Leukämie, Tumoren des Nervengewebes und -

bis zu einem gewissen Ausmaß - Brustkrebs ausgesetzt sind. In den meisten Studien wurden Berufsbezeichnungen verwendet, um die Versuchspersonen entsprechend dem angenommenen Umfang der Magnetfeldexposition einzustufen.

Einige neuere Studien haben jedoch feinere, anspruchsvollere Methoden der Expositionsbeurteilung angewandt; diese Untersuchungen ließen generell ein erhöhtes Leukämie- oder Hirntumorrisiko vermuten, sie waren allerdings weitgehend inkonsistent hinsichtlich der Krebsart, für die das Risiko erhöht ist. Die vorliegenden Daten sind unzureichend, um eine Grundlage für die Festsetzung von Richtlinien für eine Exposition in ELF-Feldern zu bilden. Aus einer großen Reihe von epidemiologischen Studien konnte kein eindeutiger Beweis für nachteilige Einflüsse auf die Fortpflanzung abgeleitet werden.

Die Messung biologischer Reaktionen in Laborversuchen und bei Freiwilligen haben nur wenige Hinweise darauf gegeben, wie sich niederfrequente Felder in einer Stärke, der Menschen üblicherweise ausgesetzt sind, negativ auf deren Gesundheit auswirken. Eine Stromdichte von 10 mA m^{-2} bei Frequenzen bis 1 kHz wurde als Schwelle für eine geringe Beeinflussung der Funktionen des Nervensystems angenommen. Bei Freiwilligen äußerten sich die stimmigsten Auswirkungen der Exposition im Auftreten visueller Phosphene und einer geringfügigen Herabsetzung der Herzfrequenz während oder unmittelbar nach der Exposition durch ELF-Felder, aber es gibt keinen Beweis dafür, daß diese vorübergehenden Effekte mit einer langfristigen Gesundheitsgefährdung verbunden sind. Eine Herabsetzung der nächtlichen pinealen Melatoninsynthese wurde bei mehreren Nagetierarten nach einer Exposition durch schwache elektromagnetische ELF-Felder beobachtet, aber bei Menschen, die unter kontrollierten Bedingungen ELF-Feldern ausgesetzt waren, konnten keine konsistenten Effekte ermittelt werden. Untersuchungen mit Expositionen in 60-Hz-Magnetfeldern bis $20 \text{ }\mu\text{T}$ haben keine verlässlichen Auswirkungen auf die Melatoninwerte im Blut ergeben.

BIOLOGISCHE GRUNDLAGE FÜR EINE EXPOSITIONSBEGRENZUNG (100 kHz-300 GHz)

Die folgenden Absätze geben einen allgemeinen Überblick über die im Bereich der biologischen Auswirkungen und potentiellen Gesundheitsgefährdungen durch elektromagnetische Felder mit Frequenzen von 100 kHz bis 300 GHz relevante Literatur. Detailliertere Übersichten können anderen Quellen entnommen werden (NRPB 1991; UNEP/WHO/IRPA 1993; McKinlay et al. 1996; Polk und Postow 1996; Repacholi 1998).

Direkte Wirkungen elektromagnetischer Felder

Epidemiologische Studien. Es wurde nur eine begrenzte Zahl von Untersuchungen über die Auswirkungen von Mikrowellenstrahlung auf die Fortpflanzung und das Krebsrisiko beim

Menschen durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Literatur wurde von UNEP/WHO/IRPA (1993) veröffentlicht.

Auswirkungen auf die Fortpflanzung. Zwei umfangreiche Studien an Frauen, die mit Mikrowellendiathermie behandelt wurden, um die Schmerzen der Gebärmutterkontraktionen während der Wehen zu lindern, erbrachten keine Beweise für nachteilige Auswirkungen auf den Fötus (Daels 1973, 1976). Sieben Studien über Auswirkungen auf die Schwangerschaft bei berufstätigen Frauen, die am Arbeitsplatz einer Mikrowellenbestrahlung ausgesetzt waren, sowie auf Geburtsfehler bei deren Nachkommen ergaben allerdings sowohl positive als auch negative Ergebnisse. Bei einigen der größeren epidemiologischen Studien über Kunststoffschweißerinnen und Physiotherapeuten, die mit Kurzwellen-Diathermiegeräten arbeiten, gab es keine statistisch signifikanten Auswirkungen hinsichtlich der Zahl der Abgänge oder Mißbildungen beim Fötus (Källen et al. 1982). Dagegen fand man in anderen Untersuchungen an ähnlichen Zahlen von Arbeitnehmerinnen ein erhöhtes Risiko an Fehlgeburten und Geburtsfehlern (Larsen et al. 1991; Ouellet-Hellstrom und Stewart 1993). Bei einer Untersuchung mit männlichen Beschäftigten in der Radartechnik konnte keine Verbindung zwischen der Mikrowellenexposition und der Gefahr für die Nachkommen, am Down-Syndrom zu erkranken, festgestellt werden (Cohen et al. 1977).

Insgesamt leiden die Untersuchungen über die Auswirkungen der Mikrowellenexposition auf die Fortpflanzung an einer sehr unzureichenden Abschätzung der Exposition und in vielen Fällen an einer zu geringen Anzahl an Versuchspersonen. Trotz der im allgemeinen negativen Ergebnisse dieser Studien wird es schwierig sein, ohne weitere epidemiologische Daten über stark exponierte Personen und präzisere Expositionsermittlung eindeutige Schlüsse über die Reproduktionsgefährdung zu ziehen.

Krebsstudien. Es gibt nur wenige Untersuchungen über das Krebsrisiko durch Mikrowellenexposition, und im allgemeinen fehlen quantitative Expositionsdaten. Zwei epidemiologische Studien mit in der Radartechnik Tätigen, die in der Flugzeugindustrie und bei den US-Streitkräften beschäftigt waren, ergaben keinen Beweis für eine erhöhte strahlenbedingte Morbidität und Mortalität (Barron und Baraff 1958; Robinette et al. 1980; UNEP/WHO/IRPA 1993). Lillienfeld et al. (1978) erzielten in einer Untersuchung mit Beschäftigten der amerikanischen Botschaft in Moskau, die einer geringen Mikrowellenstrahlung chronisch ausgesetzt waren, ähnliche Ergebnisse. Selvin et al. (1992) berichteten über keinen Anstieg des Krebsrisikos bei Kindern, die durch einen in der Nähe ihrer Wohnung befindlichen großen Mikrowellensender chronisch exponiert waren. Neuere Untersuchungen konnten keinen signifikanten Anstieg der Tumorbildung im Nervengewebe bei durch Mikrowellen exponierten Arbeitern und Angehörigen des Militärs aufzeigen (Beall et al. 1996; Grayson 1996). Ferner trat bei Benutzern von Mobiltelefonen keine übermäßige Gesamtmortalitätsrate auf

(Rothman et al. 1996a, 1996b), aber es ist noch zu früh, um eine Auswirkung über das Auftreten von Krebs oder krebsbedingte Mortalität beobachten zu können.

Es gab einen Bericht über ein erhöhtes Krebsrisiko bei Angehörigen des Militärs (Szmigielski et al. 1988), aber es ist schwierig, die Untersuchungsergebnisse zu interpretieren, da weder die Größe der Zielgruppe noch die Expositionswerte genau bekannt sind. In einer späteren Studie fand Szmigielski (1996) erhöhte Leukämie- und Lymphomraten bei durch elektromagnetische Felder belasteten Angehörigen des Militärs, aber die Abschätzung der EMF-Exposition war nicht klar definiert. Einige neuere Untersuchungen über Bevölkerungsgruppen, die in der Nähe von EMF-Sendern leben, lassen einen lokalen Anstieg von Leukämiefällen vermuten, (Hocking et al. 1996; Dolk et al. 1997a, b), aber die Ergebnisse sind nicht schlüssig. Generell gilt, daß die Ergebnisse der kleinen Zahl veröffentlichter epidemiologischer Studien nur eine begrenzte Information über das Krebsrisiko geben.

Laborstudien. Die folgenden Absätze geben eine Übersicht und eine kritische Auswertung der Laborstudien über die biologischen Wirkungen von elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz. Die Ergebnisse der Versuche mit Freiwilligen, die unter kontrollierten Bedingungen exponiert waren, sowie der Laborversuche mit Zell- und Gewebekulturen und Tieren werden gesondert erörtert.

Versuche mit Freiwilligen. Aus den von Chatterjee et al. (1986) durchgeführten Studien geht hervor, daß die dominante Wirkung der Exposition durch ein hochintensives elektromagnetisches Feld bei einer von ungefähr 100 kHz bis auf 10 MHz steigenden Frequenz von der Nerven- und Muskelstimulation in eine Erwärmung übergeht. Bei 100 kHz bestand die primäre Empfindung in einem Kribbeln in den Nerven, wogegen es bei 10 MHz zu einem Gefühl der Hauterwärmung kam. Für diesen Frequenzbereich sollten daher die grundlegenden Kriterien des Gesundheitsschutzes darauf abzielen, die Stimulation erregbaren Gewebes und Erwärmungseffekte zu vermeiden. Bei Frequenzen von 10 MHz bis 300 GHz entsteht die Erhitzung im wesentlichen durch die Absorption der elektromagnetischen Energie; ein Temperaturanstieg um mehr als 1-2 °C kann sich nachteilig auf die Gesundheit auswirken und z. B. zu Hitzeerschöpfung und Hitzschlag führen (ACGIH 1996). Studien mit Arbeitern in hohen Umgebungstemperaturen haben gezeigt, daß sich die Ausführung leichter Aufgaben verschlechtert, wenn die Körpertemperatur auf ein Niveau ansteigt, das sich dem physiologischen Hitzestress nähert, (Ramsey und Kwon 1988).

Probanden berichteten bei einem durch eine Gliedmaße geführten, hochfrequenten Strom von ungefähr 100-200 mA über ein Wärmegefühl. Es ist unwahrscheinlich, daß der sich daraus ergebende SAR-Wert eine lokale Temperaturerhöhung von über 1 °C in den Gliedmaßen bewirkt (Chatterjee et al. 1986; Chen und Gandhi 1988; Hoque und Gandhi 1988), was als Obergrenze für einen gesundheitsunschädlichen Temperaturanstieg angesehen wird

(UNEP/WHO/IRPA 1993). Die von Gandhi et al. gelieferten Daten über Freiwillige, die Frequenzen bis zu 50 MHz ausgesetzt wurden, und die von Tofani et al. (1995) gelieferten Daten über Freiwillige, die Frequenzen bis zu 110 MHz (Obergrenze des FM-Sendebereichs) ausgesetzt wurden, sprechen für einen Referenzwert von 100 mA für den in Körpergliedern induzierten Strom, um übermäßige Erwärmungseffekte zu vermeiden (Dimbylow 1997).

Es liegen mehrere Untersuchungen über wärmereregulierende Reaktionen von in Ruhe befindlichen Probanden vor, die elektromagnetischen Feldern in der Magnetresonanztomographie ausgesetzt waren (Shellock und Crues 1987; Magin et al. 1992). Im allgemeinen wurde durch diese Studien nachgewiesen, daß eine bis zu 30-minütige Exposition unter Bedingungen, in denen der Ganzkörper-SAR-Wert unter 4 W kg^{-1} lag, einen Anstieg der Kerntemperatur des Körpers unter $1 \text{ }^\circ\text{C}$ bewirkte.

Zellkultur- und Tierversuche. Es liegen zahlreiche Berichte über physiologische und Verhaltensreaktionen von Versuchstieren, einschließlich Nagetieren, Hunden und nicht-humanen Primaten, auf thermische Wechselwirkungen mit elektromagnetischen Feldern mit Frequenzen von über 10 MHz vor. Sowohl die Wärmeempfindlichkeit als auch wärmereregulierende Reaktionen sind mit dem Hypothalamus und mit den in der Haut und im Innern des Körpers gelegenen Wärmerezeptoren verbunden. Afferente Signale, die die Temperaturveränderung reflektieren, laufen im Zentralnervensystem zusammen, verändern die Aktivität des übergeordneten neuroendokrinen Kontrollsystems und lösen somit die für die Aufrechterhaltung der Homöostase notwendigen physiologischen und Verhaltensreaktionen aus.

Die Exposition von Labortieren mit elektromagnetischen Feldern, die eine Absorption von ungefähr 4 W kg^{-1} erzeugen, hat ein charakteristisches Muster der wärmereregulierenden Reaktion ergeben, nach dem die Körpertemperatur zunächst ansteigt und sich dann nach Aktivierung der wärmereregulierenden Mechanismen stabilisiert (Michaelson 1983). Die Anfangsphase dieser Reaktion geht mit einem Anstieg des Blutvolumens einher, der durch eine Verdrängung von Flüssigkeit aus dem extrazellulären Raum in den Kreislauf und durch eine Erhöhung der Herzfrequenz und des Blutdrucks in den Herzkammern bedingt ist. Diese kardiodynamischen Veränderungen spiegeln die wärmereregulierenden Reaktionen wider, die die Ableitung von Wärme an die Körperoberfläche ermöglichen. Sind die Tiere über einen längeren Zeitraum einer Mikrowellenstrahlung ausgesetzt, die zu einer Erhöhung der Körpertemperatur führt, kommt es letztlich zu einem Versagen dieser wärmereregulierenden Mechanismen.

Verschiedene Studien mit Nagetieren und Affen haben ebenfalls eine verhaltensmäßige Komponente der wärmereregulierenden Reaktionen ergeben. Eine verringerte Leistungsfähigkeit bei Ratten und Affen wurde bei SAR-Werten in Höhe von $1\text{-}3 \text{ W kg}^{-1}$ beobachtet (Stern et al. 1979; Adair und Adams 1980; de Lorge und Ezell 1980; D'Andrea et al. 1986).

Bei Affen beginnt ein verändertes wärmeregulierendes Verhalten bereits in dem Moment, in dem die Temperatur im Bereich des Hypothalamus um nur 0,2-0,3 °C ansteigt (Adair et al. 1984). Der Hypothalamus gilt als Kontrollzentrum für normale wärmeregulierende Prozesse, und seine Aktivität kann sich durch einen geringen, lokal begrenzten Temperaturanstieg unter Bedingungen verändern, in denen die rektale Temperatur konstant bleibt.

In Versuchen mit Zellkulturen und Tieren wurde bei absorbierten elektromagnetischen Energien, die zur Erhöhung der Körpertemperatur um über 1-2 °C führen, eine große Zahl physiologischer Effekte bewiesen (Michaelson und Elson 1996). Zu diesen Wirkungen zählen Veränderungen der neuralen und neuromuskulären Funktionen; erhöhte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke; Verschlechterung der Sehfähigkeit (Linsentrübung und Anomalien der Hornhaut); streßbedingte Veränderungen im Immunsystem; hämatologische Veränderungen; Veränderungen der Fortpflanzungsfähigkeit (z. B. verringerte Spermienproduktion); Teratogenität; und Veränderungen der Zellmorphologie, des Wasser- und Elektrolytgehalts und der Membranfunktionen.

Unter Bedingungen der partiellen Exposition des Körpers in intensiven elektromagnetischen Feldern kann es zu signifikanten thermischen Schäden bei empfindlichen Geweben wie Auge oder Hoden, kommen. Eine zwei- bis dreistündige Exposition durch Mikrowellen hat bei SAR-Werten von 100-140 W kg⁻¹, die zu Linsentemperaturen von 41-43 °C führten, bei Kaninchenaugen Starbildung hervorgerufen (Guy et al. 1975). Bei Affen, die Mikrowellenfeldern ähnlicher oder höherer Intensität ausgesetzt waren, wurden keine Katarakte beobachtet, wahrscheinlich aufgrund der bei Affen und Kaninchen unterschiedlichen Energieabsorptionsmuster der Augen. Bei sehr hohen Frequenzen (10-300 GHz) ist die Absorption der elektromagnetischen Energie weitgehend auf die epidermalen Hautschichten, die subkutanen Gewebe und den äußeren Augenbereich beschränkt. Am höheren Ende des Frequenzbereichs wird die Absorption zunehmend oberflächlich. Augenschäden bei diesen Frequenzen können vermieden werden, wenn die Leistungsdichte der Mikrowellen unter 50 W m⁻² liegt (Slaney und Wolbarsht 1980; UNEP/WHO/IRPA 1993).

In neuester Zeit ist ein beträchtliches Interesse an den möglichen karzinogenen Effekten der Exposition durch Mikrowellenfelder in Frequenzbereichen der weitverbreiteten Kommunikationssysteme einschließlich der Mobiltelefone und Basisstationen zu verzeichnen. Die in diesem Bereich erzielten Forschungsergebnisse wurden von ICNIRP (1996) zusammengefaßt. Danach gibt es viele Berichte, die andeuten, daß Mikrowellenfelder nicht mutagen sind, und eine Auslösung von Krebs nach einer Exposition durch diese Felder unwahrscheinlich ist (NRPB 1992; Cridland 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993). Dagegen lassen einige neuere Berichte vermuten, daß die Exposition von Nagetieren mit Mikrowellenfeldern mit SAR-Werten in der Größenordnung von 1 W kg⁻¹ zu DNA-Strangbrüchen in den Hoden und im

Hirngewebe führen kann (Sarkar et al. 1994; Lai und Singh 1995, 1996), obwohl sowohl ICNIRP (1996) als auch Williams (1996) auf methodische Unzulänglichkeiten hingewiesen haben, die diese Ergebnisse wesentlich beeinflusst haben könnten.

In einer Großuntersuchung an Ratten, die bis zu 25 Monate lang Mikrowellen ausgesetzt waren, wurden im Verhältnis zu den Kontrollen ein Übermaß an bösartigen Primärtumoren festgestellt (Chou et al. 1992). Das Auftreten von gutartigen Tumoren war allerdings innerhalb der Gruppen nicht unterschiedlich, und es gab keine spezifische Tumorart, die in der exponierten Gruppe stärker vorherrschte als bei den Ratten, die zum selben Stamm gehörten und unter ähnlichen spezifisch-pathogenfreien Bedingungen gehalten wurden. Insgesamt gesehen können die Ergebnisse dieser Untersuchung nicht dahingehend ausgelegt werden, daß sie auf eine tumorauslösende Wirkung von Mikrowellenfeldern schließen lassen.

Verschiedene Untersuchungen haben sich mit den Auswirkungen der Mikrowellenexposition auf die Entwicklung von präinitiierten Tumorzellen befaßt. Szmigielski et al. (1982) stellten ein vermehrtes Größenwachstum bei transplantierten Lungensarkomzellen in Ratten fest, die Mikrowellen mit hohen Leistungsdichten ausgesetzt waren. Möglicherweise war dies durch eine Schwächung des Immunsystems des Wirts als Reaktion auf den thermischen Streß durch die Mikrowellenexposition bedingt. Aus neueren Studien mit einem nichtthermisch wirkenden Maß an Mikrowellenbestrahlung haben sich keine Auswirkungen auf die Entwicklung von Melanomen bei Mäusen oder Hirntumoren bei Ratten ergeben (Santini et al. 1988; Salford et al. 1993).

Repacholi et al. (1997) berichteten, daß die bis zu 18-monatige Exposition von 100 weiblichen transgenen *Eμ-pim1*-Mäusen mit 900 MHz-Feldern, die mit 217 Hz bei Pulslängen von 0,6 µs gepulst waren, im Vergleich mit 101 Kontrolltieren zu einer Verdoppelung der Lymphominzidenz geführt hat. Da sich die Mäuse in ihren Käfigen frei bewegen konnten, war die Schwankungsbreite der SAR-Werte groß (0,01-4,2 W kg⁻¹). Unter der Voraussetzung, daß der Ruhestoffwechsel dieser Mäuse 7-15 W kg⁻¹ beträgt, kann nur das obere Ende des Expositionsbereichs eine leichte Erwärmung bewirkt haben. Somit scheint es, daß diese Untersuchung die Einwirkung eines nichtthermischen Mechanismus nahelegt, der weiter untersucht werden muß. Bevor jedoch weitere Vermutungen über Gesundheitsrisiken angestellt werden können, muß eine Reihe von Fragen geklärt werden. Die Untersuchung muß in einer Weise wiederholt werden, die die Tiere daran hindert, die SAR-Exposition zu verringern und zu bestimmen, ob es eine Dosis-Wirkungs-Beziehung gibt. Weitere Studien sind notwendig, um festzustellen, ob die Ergebnisse auch in anderen Tiermodellen erzielt werden können, um eine Übertragung der Ergebnisse auf den Menschen zu ermöglichen. Es ist ebenfalls wichtig, zu beurteilen, ob die bei transgenen Tieren erzielten Ergebnisse auf den Menschen angewandt werden können.

Besondere Berücksichtigung gepulster und amplitudenmodulierter Wellenformen

Im Vergleich zur CW-Strahlung sind gepulste Mikrowellenfelder mit derselben durchschnittlichen Rate der Energiedeposition in Geweben im allgemeinen bei der Erzeugung einer biologischen Reaktion wirksamer, insbesondere dann, wenn es sich um eine gut definierte Schwelle handelt, die überschritten werden muß, um die Wirkung auszulösen (ICNIRP 1996). Der "Mikrowellenhöreffekt" ist dafür ein sehr gut bekanntes Beispiel (Frey 1961; Frey und Messenger 1973; Lin 1978): Menschen mit normalem Hörvermögen können pulsmodierte Felder im Frequenzbereich zwischen rund 200 MHz und 6,5 GHz wahrnehmen. Je nach den Modulationscharakteristika des Feldes wurde der Höreindruck verschiedentlich als ein summender, klickender oder knackender Ton beschrieben. Die Mikrowellenhöreffekte wurden einer thermoelastischen Wechselwirkung des auditiven Bereichs des Großhirns mit einer Wahrnehmungsschwelle von ungefähr $100\text{-}400\text{ mJ m}^{-2}$ für Pulslängen von weniger als $30\text{ }\mu\text{s}$ bei 2,45 GHz zugeschrieben (entspricht einer SA von $4\text{-}16\text{ mJ kg}^{-1}$). Wiederholte und längere Belästigung durch Mikrowellenhöreffekte können belastend oder möglicherweise schädlich wirken.

Einige Berichte lassen vermuten, daß die Retina, die Iris und das Hornhautendothel des Primatenauges auf geringe Dosen gepulster Mikrowellenstrahlung empfindlich reagieren (Kues et al. 1985; UNEP/WHO/IRPA 1993). Bei Absorption so geringer Energiemengen wie 26 mJ kg^{-1} wurde über degenerative Veränderungen in den lichtempfindlichen Zellen der Retina berichtet. Nach Verabreichung von Timololmaleat, das zur Glaukombehandlung verwendet wird, sank die Schwelle für die Netzhautschädigung durch gepulste Felder auf $2,6\text{ mJ kg}^{-1}$. Allerdings war ein in einem unabhängigen Labor durchgeführter Versuch, diese Ergebnisse für CW-Felder (d. h. nicht gepulste Felder) partiell zu bestätigen, nicht erfolgreich (Kamimura et al. 1994), und es ist daher zur Zeit nicht möglich, die potentiellen Gesundheitsgefährdungen, die ursprünglich von Kues et al. (1985) gefunden wurden, abzuschätzen.

Es wurde berichtet, daß die Schreckreaktion bei wachen Mäusen durch die Exposition mit intensiven gepulsten Mikrowellenfeldern unterdrückt wird und Bewegungen des Körpers hervorgerufen werden (NRPB 1991; Sienkiewicz et al. 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993). Die für die Energieabsorption im Zwischenhirn spezifische Schwelle, ab welcher Körperbewegungen ausgelöst wurden, betrug 200 J kg^{-1} bei $10\text{-}\mu\text{s}$ -Pulsen. Der für diese Effekte der gepulsten Mikrowellen verantwortliche Mechanismus muß noch bestimmt werden, aber man nimmt an, daß er mit dem Mikrowellenhöreffekt in Verbindung steht. Die Hörschwellen bei Nagetieren liegen ungefähr eine Größenordnung unter der des Menschen, d. h. $1\text{-}2\text{ mJ kg}^{-1}$ bei Pulslängen von $< 30\text{ }\mu\text{s}$. Von Pulsen dieser Größenordnung wird berichtet, daß sie den Neurotransmitter-

Metabolismus und die Konzentration der neuronalen Rezeptoren beeinträchtigen, die bei Streß- und Angstreaktionen in verschiedenen Regionen des Rattenhirns beteiligt sind.

Die Frage der nichtthermischen Wechselwirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder konzentrierte sich im wesentlichen auf Berichte über biologische Wirkungen amplitudenmodulierter Felder (AM-Felder) unter *in-vitro*-Bedingungen bei SAR-Werten, die weit unter denen lagen, die eine meßbare Erwärmung der Gewebe verursachen. Erste Untersuchungen in zwei voneinander unabhängigen Laboratorien ergaben, daß VHF-Felder mit extrem niederfrequenter Amplitudenmodulation (6-20 Hz) zu einer geringen, wenn auch statistisch signifikanten Freisetzung von Ca^{++} -Ionen aus der Oberfläche der Hirnzellen des Huhns führten (Bawin et al. 1975; Blackman et al. 1979). Ein späterer Versuch zur Bestätigung dieser Ergebnisse, bei dem dieselbe Art von AM-Feldern verwendet wurde, führte zu keinem Erfolg (Albert et al. 1987). Eine Reihe weiterer Untersuchungen über die Auswirkungen von AM-Feldern auf die Ca^{++} -Homöostase haben sowohl positive als auch negative Ergebnisse gebracht. So wurden z. B. Auswirkungen von AM-Feldern auf die Ca^{++} -Bindung in Zelloberflächen bei Neuroblastomzellen, Pankreaszellen, Herzwewebe und Hirnzellen von Katzen, jedoch nicht bei kultivierten Nervenzellen von Ratten, der Skelettmuskulatur von Hühnern oder Hirnzellen von Ratten beobachtet (Postow und Swicord 1996).

Es wurde ebenfalls berichtet, daß amplitudenmodulierte Felder die elektrische Aktivität des Gehirns verändern (Bawin et al. 1974), die zytotoxische Aktivität der T-Lymphozyten hemmen (Lyle et al. 1983), die Aktivitäten der nicht-cyclischen AMP-abhängigen Kinase in Lymphozyten herabsetzen (Byus et al. 1984) und eine vorübergehende Zunahme der zytoplasmischen Aktivität der Ornithin-Decarboxylase, einem wichtigen Enzym für die Zellproliferation, bewirken (Byus et al. 1988; Litovitz et al. 1992). Dagegen wurden keine Auswirkungen auf die große Vielfalt anderer Zellsysteme und funktionalen Endpunkte, einschließlich des Lymphozytenabsinkens, der neoplastischen Zelltransformation und verschiedener elektrischer und enzymatischer Eigenschaften von Membranen beobachtet (Postow und Swicord 1996). Von besonderer Bedeutung für die potentiellen karzinogenen Wirkungen der gepulsten Felder ist die Beobachtung von Balcer-Kubiczek und Harrison (1991), daß die neoplastische Transformation in C3H/10T1/2-Zellen, die mit 120 Hz pulsmodulierten 2450-MHz-Mikrowellen ausgesetzt waren, beschleunigt wurde. Der Effekt hing von der Feldstärke ab, trat aber nur auf, wenn ein chemischer Tumor-Promotor, TPA, im Zellkulturmedium vorhanden war. Dieses Ergebnis führt zu der Annahme, daß gepulste Mikrowellen in Verbindung mit einem chemischen Stoff, der die Proliferationsrate transformierter Zellen erhöht, co-carcinogene Auswirkungen haben können. Bis heute gab es keine Versuche, diese Ergebnisse zu bestätigen, und deren Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen bleiben unklar.

Die Interpretation verschiedener beobachteter biologischer Wirkungen von elektromagnetischen AM-Feldern wird ferner durch das offensichtliche Vorhandensein von sogenannten Reaktionsfenstern sowohl im Bereich der Leistungsdichte als auch der Frequenzen erschwert. Es gibt keine anerkannten Modelle, die dieses Phänomen, das das traditionelle Konzept einer monotonen Beziehung zwischen der Feldintensität und dem Ausmaß der sich daraus ergebenden biologischen Wirkungen in Frage stellt, zufriedenstellend erklärt.

Generell gilt, daß die Literatur über nichtthermische Auswirkungen von elektromagnetischen AM-Feldern so komplex ist, die aufgezeigten Wirkungen so wenig gesichert sind und die Relevanz für die Gesundheit des Menschen so unsicher ist, daß es unmöglich ist, diese Gesamtheit an Daten als Grundlage für die Festsetzung von Grenzwerten für die Exposition des Menschen heranzuziehen.

Indirekte Wirkungen elektromagnetischer Felder

Im Frequenzbereich von ungefähr 100 kHz-110 MHz können entweder durch Berühren eines ungeerdeten metallischen Objekts, das seine Ladung aus einem Feld bezogen hat oder durch Kontakt zwischen einer geladenen Person und einem geerdeten metallischen Objekt Schocks und Verbrennungen auftreten. Es sollte bemerkt werden, daß die obere Grenzfrequenz für den Kontaktstrom (110 MHz) eher durch fehlende Daten über höhere Frequenzen als durch das Ausbleiben von Wirkungen belegt ist. 110 MHz stellt jedoch die obere Frequenzgrenze für den FM-Sendebereich. Die Schwellenströme, die zu biologischen Wirkungen führen, die der Stärke nach von der Wahrnehmung bis hin zum Schmerz reichen, wurde in kontrollierten Versuchen mit Freiwilligen gemessen (Chatterjee et al. 1986; Tenforde und Kaune 1987; Bernhardt 1988); sie sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Generell ergab sich, daß die Schwellenströme, die Wahrnehmung und Schmerz verursachen, über den Frequenzbereich von 100 kHz-1 MHz kaum und im Frequenzbereich bis etwa 110 MHz wahrscheinlich nicht wesentlich variieren. Wie bereits für niedrige Frequenzen erwähnt, gibt es auch bei Feldern höherer Frequenz deutliche Unterschiede in den Empfindlichkeiten von Männern, Frauen und Kindern. Die in Tabelle 3 aufgeführten Daten stellen den Bereich der 50-Prozentwerte für Menschen unterschiedlicher Größe und Empfindlichkeitsstufen gegenüber Kontaktströmen dar.

Tabelle 3. Bereiche der Schwellenströme für indirekte Effekte (einschließlich Kinder, Frauen und Männer)

Indirekter Effekt	Schwellenstrom (mA) bei Frequenz:	
	100 kHz	1 MHz
Berührungswahrnehmung	25-40	25-40

Schmerz bei Fingerkontakt	33-55	28-50
Schmerzhafter Schock / Loslaß-Schwelle	112-224	nicht bestimmt
Schwerer Schock / Atemprobleme	160-320	nicht bestimmt

Zusammenfassung der biologischen Wirkungen und epidemiologischen Studien (100 kHz-300 GHz)

Aus gesicherten Versuchsdaten geht hervor, daß die annähernd 30-minütige Exposition ruhender Menschen durch EMF, die eine Ganzkörper-SAR zwischen 1 und 4 W kg⁻¹ bewirken, zu einer Erhöhung der Körpertemperatur von weniger als 1 °C führt. Tierversuche weisen auf eine im selben SAR-Bereich liegende Schwelle für Verhaltensreaktionen hin. Eine Exposition durch intensivere Felder, die SAR-Werte von über 4 W kg⁻¹ erzeugen, kann die wärmeregulierende Fähigkeit des Körpers außer Kraft setzen und eine schädliche Gewebeerwärmung nach sich ziehen. Viele Laborversuche an Nagetieren und nichthumanen Primaten haben eine große Spannweite von Gewebeschädigungen gezeigt, die entweder von einer Teil- oder von einer Ganzkörpererwärmung um mehr als 1-2 °C herrührten. Die Sensibilität verschiedener Gewebearten bezüglich einer thermischen Schädigung ist sehr unterschiedlich, aber die Schwelle für irreversible Effekte liegt selbst bei den empfindlichsten Geweben unter normalen Umweltbedingungen über 4 W kg⁻¹. Diese Daten bilden die Grundlage für eine Begrenzung der Exposition am Arbeitsplatz auf 0,4 W kg⁻¹, was einen großen Sicherheitsspielraum für andere einschränkende Bedingungen, wie hohe Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit oder körperliche Aktivität, ergibt.

Sowohl die Labordaten als auch die Ergebnisse begrenzter Versuche am Menschen (Michaelson und Elson 1996) machen deutlich, daß ein thermisch belastendes Umfeld und der Gebrauch von Drogen oder Alkohol die wärmeregulierende Fähigkeit des Körpers gefährden kann. Unter diesen Umständen sollten Sicherheitsfaktoren eingeführt werden, um einen adäquaten Schutz für exponierte Personen zu gewährleisten.

Daten über Reaktionen von Menschen auf hochfrequente EMF, die eine nachweisbare Erwärmung bewirken, wurden aus der kontrollierten Exposition Freiwilliger und aus epidemiologischen Studien mit Arbeitern, die Quellen wie Radar, medizinischen Diathermiegeräten und Hitzeversiegeln ausgesetzt waren, erhalten. Sie untermauern vollständig die aus Laborarbeiten abgeleiteten Schlußfolgerungen, wonach Temperaturerhöhungen im Gewebe von mehr als 1 °C zu negativen biologischen Wirkungen führen können. Epidemiologische Studien an exponierten Arbeitern und der Normalbevölkerung haben gezeigt, daß aus den typischerweise herrschenden Expositionsbedingungen keine wesentliche Gesundheitsgefährdung abzuleiten ist. Obwohl es Mängel in den epidemiologischen Studien gibt, wie z. B. unzureichende Expositionsabschätzung, haben die Studien keinen

überzeugenden Beweis dafür geliefert, daß typische Expositionswerte die Fortpflanzung negativ beeinflussen oder zu einem erhöhten Krebsrisiko bei exponierten Personen führen. Diese Ergebnisse stimmen mit jenen überein, die in Laborversuchen mit Zellkulturen und Tiermodellen erzielt wurden und die weder teratogene noch kanzerogene Wirkungen der Exposition durch nichtthermische Intensitäten hochfrequenter EMF zeigten.

Eine Exposition durch gepulste EMF ausreichender Intensität führt zu bestimmten vorhersehbaren Effekten, wie das Mikrowellenhörphänomen und verschiedene Verhaltensreaktionen. Epidemiologische Studien an exponierten Arbeitern und der Normalbevölkerung haben nur begrenzte Informationen geliefert und keine Auswirkungen auf die Gesundheit nachgewiesen. Berichte über ernste Schädigungen der Netzhaut wurden nach erfolglosen Versuchen, die Ergebnisse zu reproduzieren, in Frage gestellt.

Eine große Zahl von Untersuchungen über die biologischen Wirkungen von amplitudenmodulierten EMF, die meistens bei niedrigen Expositionswerten durchgeführt wurden, haben sowohl positive als auch negative Ergebnisse erbracht. Sorgfältige Analysen dieser Untersuchungen zeigen, daß die Effekte von AM-Feldern je nach Expositionsparametern, Art der involvierten Zellen und Gewebe und den untersuchten biologischen Endpunkten sehr unterschiedlich ausfallen. Im allgemeinen sind die Auswirkungen der Exposition biologischer Systeme mit nichtthermisch wirkenden, amplitudenmodulierten EMF gering und sehr schwer mit eventuellen Auswirkungen auf die Gesundheit in Verbindung zu bringen. Es gibt keinen überzeugenden Beweis für Frequenz- und Leistungsdichtefenster der Reaktion auf diese Felder.

Schocks und Verbrennungen können als negative indirekte Effekte hochfrequenter EMF auftreten, die durch den Kontakt eines Menschen mit einem metallischen Objekt im Feld entstehen. Bei Frequenzen von 100 kHz-110 MHz (die Obergrenze des FM-Rundfunkbandes) schwanken die Schwellenwerte des Kontaktstroms, der sich in Wirkungen äußert, die von der bloßen Wahrnehmung bis hin zu starken Schmerzen reichen, in Abhängigkeit von der Feldfrequenz nicht wesentlich. Die Schwelle für die Wahrnehmung reicht bei Personen unterschiedlicher Größe von 25 bis 40 mA und die für Schmerzen von annähernd 30 bis 55 mA; oberhalb von 50 mA kann es zu schweren Verbrennungen der Gewebeteile kommen, die mit einem metallischen Leiter im Feld in Kontakt geraten.

RICHTLINIEN FÜR DIE BEGRENZUNG DER EMF EXPOSITION

Expositionsbeschränkungen für Arbeitsplatz und Öffentlichkeit

Die am Arbeitsplatz exponierten Personen sind Erwachsene, die im allgemeinen unter bekannten Bedingungen exponiert sind und gelernt haben, sich der eventuellen Gefahr bewußt zu sein und entsprechende Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen. Dagegen setzt sich die Normalbevölkerung aus Personen jeglichen Alters und Gesundheitszustandes zusammen und kann besonders empfängliche Gruppen und Individuen einschließen. In vielen Fällen ist sich die Bevölkerung der Exposition durch elektromagnetische Felder nicht bewußt. Ferner kann von einzelnen Mitgliedern der Bevölkerung normalerweise nicht erwartet werden, daß sie Vorkehrungen treffen, um die Exposition zu verringern oder zu vermeiden. Aufgrund dieser Erwägungen kam es zur Annahme strengerer Expositionsbeschränkungen für die Öffentlichkeit als für die beruflich exponierte Bevölkerung.

Basisgrenzwerte und Referenzwerte

Die Beschränkungen für die Auswirkungen der Exposition basieren auf gesicherten gesundheitlichen Beeinträchtigungen und werden als Basisgrenzwerte bezeichnet. Je nach Frequenz sind die zur Spezifizierung der Basisgrenzwerte der Exposition mit EMF herangezogenen physikalischen Größen die Stromdichte, die SAR und die Leistungsdichte. Der Schutz vor nachteiligen Auswirkungen auf die Gesundheit erfordert, daß diese Basisgrenzwerte nicht überschritten werden.

Referenzwerte der Exposition werden zum Zweck des Vergleichs mit Meßwerten physikalischer Größen angegeben; eine Übereinstimmung mit allen in diesen Leitsätzen angegebenen Referenzwerten gewährleistet eine Übereinstimmung mit den Basisgrenzwerten. Sind die gemessenen Werte höher als die Referenzwerte, läßt sich daraus nicht zwangsläufig schließen, daß die Basisgrenzwerte überschritten wurden; allerdings ist eine detailliertere Analyse notwendig, um die Übereinstimmung mit den Basisgrenzwerten zu beurteilen.

Allgemeine Erklärung über Sicherheitsfaktoren

Es gibt nicht genügend Daten über die biologischen und gesundheitlichen Folgen der Exposition von Menschen und Versuchstieren mit EMF, um eine strenge Grundlage für die Festlegung von Sicherheitsfaktoren für den gesamten Frequenzbereich und für alle Frequenzmodulationen zu bilden. Außerdem bestehen einige Unsicherheiten hinsichtlich der angemessenen Sicherheitsfaktoren aufgrund der fehlenden Kenntnisse über die geeignete Dosimetrie (Repacholi 1998). Folgende allgemeine Parameter wurden bei der Entwicklung von Sicherheitsfaktoren für Hochfrequenzfelder berücksichtigt:

- Auswirkungen der EMF-Exposition unter extremen Umgebungsbedingungen (hohe Temperaturen, usw.) und/oder hohes Aktivitätsniveau;
- die potentiell höhere Wärmeempfindlichkeit bei bestimmten Volksgruppen wie gebrechliche und/oder alte Menschen, Säuglinge und Kleinkinder sowie Kranke und Menschen, die den Wärmehaushalt beeinträchtigende Medikamente einnehmen.

Folgende zusätzliche Faktoren wurden bei der Ableitung von Referenzwerten für Hochfrequenzfelder berücksichtigt:

- Unterschiede in der Absorption der elektromagnetischen Energie durch Personen unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Ausrichtung zum Feld;
- Reflexion, Fokussierung und Streuung des auftretenden Feldes, was zu einer erhöhten lokalen Absorption der hochfrequenten Energie führen kann.

Basisgrenzwerte

Verschiedene wissenschaftliche Grundlagen wurden bei der Entwicklung der Basisexpositionsgrenzen für unterschiedliche Frequenzbereiche verwendet:

- Zwischen 1 Hz und 10 MHz bestehen Basisgrenzwerte für die Stromdichte, um den Auswirkungen auf die Funktionen des Nervensystems vorzubeugen;
- Zwischen 100 kHz und 10 GHz bestehen Basisgrenzwerte für SAR-Werte, um die Wärmebelastung des ganzen Körpers und eine übermäßige lokale Gewebeerwärmung zu vermeiden; im Bereich von 100 kHz-10 MHz wurden Grenzwerte sowohl für die Stromdichte als auch für den SAR-Wert eingeführt;
- Zwischen 10 und 300 GHz wurden Basisgrenzwerte für die Leistungsdichte eingeführt, um eine übermäßige Erwärmung des Gewebes an oder nahe der Körperoberfläche zu vermeiden.

Im Frequenzbereich von einigen Hz bis 1 kHz - bei Werten der induzierten Stromdichte von über 100 mA m^{-2} - werden die Schwellen für akute Veränderungen in der Erregbarkeit des Zentralnervensystems und sonstige akute Effekte, wie die Umkehrung der visuell evozierten Potentiale, überschritten. In Anbetracht der oben genannten Sicherheitserwägungen wurde beschlossen, daß die berufsbedingte Exposition im Frequenzbereich von 4 Hz bis 1 kHz auf Felder beschränkt sein sollte, die Stromdichten von weniger als 10 mA m^{-2} induzieren, d. h., daß ein Sicherheitsfaktor von 10 angesetzt wird. Für die allgemeine Bevölkerung wird ein zusätzlicher Faktor 5 angewandt, der eine grundlegende Begrenzung der Exposition auf 2 mA m^{-2} ergibt. Unter 4 Hz und über 1 kHz nimmt der Basisgrenzwert für die induzierte Stromdichte allmählich zu, und zwar entsprechend dem Anstieg der Schwelle für die Nervenstimulation in diesen Frequenzbereichen.

Gesicherte biologische und gesundheitliche Wirkungen im Frequenzbereich von 10 MHz bis zu einigen GHz stimmen mit den Reaktionen auf einen Anstieg der Körpertemperatur um mehr als 1 °C überein. Dieser Temperaturanstieg ergibt sich aus der Exposition von Personen unter gemäßigten Umgebungsbedingungen durch eine Ganzkörper-SAR von ungefähr 4 W kg^{-1} während einer Zeit von 30 Minuten. Die durchschnittliche Ganzkörper-SAR von $0,4 \text{ W kg}^{-1}$ wurde daher als Grenzwert gewählt, der einen angemessenen Schutz vor beruflich bedingter Exposition gewährleistet. Ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 5 wird für die Exposition der Normalbevölkerung eingeführt, was einer durchschnittlichen Ganzkörper-SAR-Grenze von $0,08 \text{ W kg}^{-1}$ entspricht.

Tabelle 4. Basisgrenzwerte für zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder bei Frequenzen bis zu 10 GHz^a

Art der Exposition	Frequenzbereich	Stromdichte für Kopf und Rumpf (mA m^{-2}) (Effektivwerte)	Durchschnittliche Ganzkörper-SAR (W kg^{-1})	Lokale SAR (Kopf und Rumpf) (W kg^{-1})	Lokale SAR (Gliedmaßen) (W kg^{-1})
Berufliche Exposition	bis 1 Hz	40	—	—	—
	1-4 Hz	$40/f$	—	—	—
	4 Hz-1 kHz	10	—	—	—
	1-100 kHz	$f/100$	—	—	—
	100 kHz-10 MHz	$f/100$	0,4	10	20
	10 MHz-10 GHz	—	0,4	10	20
Exposition der Bevölkerung	bis 1 Hz	8	—	—	—
	1-4 Hz	$8/f$	—	—	—
	4 Hz-1 kHz	2	—	—	—
	1-100 kHz	$f/500$	—	—	—
	100 kHz-10 MHz	$f/500$	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz	—	0,08	2	4

^a *Anmerkungen:*

1. f ist die Frequenz in Hertz.
2. Aufgrund der elektrischen Inhomogenität des menschlichen Körpers sollten die Stromdichten über einen Querschnitt von 1 cm^2 senkrecht zur Stromrichtung gemittelt werden.
3. Für Frequenzen bis 100 kHz können die Spitzenwerte für die Stromdichten erhalten werden, indem der Effektivwert mit $\sqrt{2}$ ($\sim 1,414$) multipliziert wird. Für Pulse der Dauer t_p sollte die auf die Basisgrenzwerte anzuwendende Frequenz über $f = 1/(2 t_p)$ ermittelt werden.
4. Für Frequenzen bis 100 kHz und für gepulste Magnetfelder können die mit den Pulsen verbundenen maximalen Stromdichten aus den Anstiegs- und Abfallzeiten sowie der maximalen Änderungsrate der magnetischen Flußdichte berechnet werden. Die induzierte Stromdichte läßt sich dann mit den entsprechenden Basisgrenzwerten vergleichen.
5. Sämtliche SAR-Werte sind über beliebige 6-Minuten-Zeitintervalle zu mitteln.
6. Die zu mitteln Gewebemasse für lokale SAR-Werte beträgt 10 g eines beliebigen zusammenhängenden Körpergewebes; die so ermittelten SAR-Maximalwerte sollten für die Expositionsermittlung verwendet werden.
7. Für Pulse der Dauer t_p sollte die auf die Basisgrenzwerte anzuwendende Frequenz über $f = 1/(2 t_p)$ ermittelt werden. Darüber hinaus wird für den Frequenzbereich von 3 bis 10 GHz und für die lokale Exposition des Kopfes ein zusätzlicher Basisgrenzwert empfohlen, um durch thermoelastische Expansion bedingte Höreffekte einzuschränken oder zu vermeiden. Danach sollte die SA bei gepulsten Expositionen 10 mJ kg^{-1} bei Beschäftigten und 2 mJ kg^{-1} für die Normalbevölkerung nicht überschreiten, gemittelt über je 10 g Gewebe.

Die niedrigeren Basisgrenzwerte für die Exposition der Normalbevölkerung berücksichtigen die Tatsache, daß hier Alter und Gesundheitszustand von denen der Arbeiter abweichen können.

Für den Niederfrequenzbereich gibt es zur Zeit nur wenig Daten, die vorübergehende Ströme mit gesundheitlichen Effekten in Beziehung setzen. Die ICNIRP empfiehlt daher, daß die Beschränkung von Stromdichten, die durch vorübergehende oder sehr kurzfristige Spitzenfelder induziert werden, als Momentanwerte angesehen werden, die nicht zeitlich gemittelt werden sollten.

Die Basisgrenzwerte für Stromdichten, durchschnittliche Ganzkörper-SAR und lokale SAR für Frequenzen von 1 Hz und 10 GHz sind in Tabelle 4 wiedergegeben, und jene für Leistungsdichten für Frequenzen von 10-300 GHz sind in Tabelle 5 aufgeführt.

REFERENZWERTE

Sofern angebracht, werden die Referenzwerte durch Modellrechnungen aus den Basisgrenzwerten sowie durch Extrapolation aus den Ergebnissen von Laboruntersuchungen bei spezifischen Frequenzen erhalten. Sie werden für den Fall angegeben, daß eine maximale Kopplung des Feldes zur exponierten Person vorliegt, so daß ein maximaler Schutz gewährleistet ist. Die Tabellen 6 und 7 fassen die Referenzwerte für die Exposition am Arbeitsplatz bzw. die Exposition der Normalbevölkerung zusammen, und sie werden in den

Abbildungen 1 und 2 veranschaulicht. Die Referenzwerte sollen räumlich über den gesamten Körper der exponierten Person gemittelte Werte darstellen, jedoch unter der wichtigen Bedingung, daß die Basisgrenzwerte für die Exposition nicht überschritten werden.

Für niederfrequente Felder wurden verschiedene Berechnungs- und Meßverfahren zur Ableitung von Feldstärke-Referenzwerten aus den Basisgrenzwerten entwickelt. Die Vereinfachungen, die bislang verwendet wurden, konnten Phänomene wie inhomogene Verteilung und Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit sowie andere für diese Berechnungen wichtige Gewebefaktoren nicht berücksichtigen.

Tabelle 5. Basisgrenzwerte für Leistungsdichten bei Frequenzen zwischen 10 und 300 GHz^a

Art der Exposition	Leistungsdichte (W m ⁻²)
Berufliche Exposition	50
Exposition der Bevölkerung	10

^a *Anmerkungen:*

1. Leistungsdichten sind über eine beliebige Teilfläche von 20 cm² der exponierten Fläche und über einen 68/ $f^{1,05}$ -minütigen Zeitraum (wobei f in GHz anzugeben ist) zu mitteln, um die mit steigender Frequenz geringer werdenden Eindringtiefen auszugleichen.
2. Räumliche Maximal-Leistungsdichten, gemittelt über 1 cm², sollten das 20-fache der obigen Werte nicht überschreiten.

Die Frequenzabhängigkeit der Feld-Referenzwerte ist konsistent mit den Daten sowohl über biologische Wirkungen als auch über die Kopplung des Feldes.

Magnetfeldmodelle gehen davon aus, daß der Körper eine homogene und isotrope Leitfähigkeit besitzt, und sie wenden einfache zirkulare leitfähige Schleifenmodelle zur Abschätzung induzierter Ströme in verschiedenen Organen und Körperregionen, z. B. im Kopf, an, wobei die folgende aus dem Faradayschen Induktionsgesetz abgeleitete Gleichung für ein reines sinusförmiges Feld der Frequenz f verwendet wird:

$$J = \pi R f \sigma B, \quad (4)$$

wobei B die magnetische Flußdichte und R der Radius der Schleife für den Induktionsstrom ist. Komplexere Modelle verwenden ein ellipsoidales Modell, um den Rumpf oder den ganzen Körper zur Abschätzung der an der Körperoberfläche induzierten Stromdichten darzustellen (Reilly 1989, 1992).

Geht man der Einfachheit halber von einer homogenen Leitfähigkeit von 0,2 S m⁻¹ aus, erzeugt ein 50-Hz-Magnetfeld einer Flußdichte von 100 µT in der Körperperipherie Stromdich-

ten zwischen $0,2$ und 2 mA m^{-2} (CRP 1997). Einer anderen Untersuchung zufolge (NAS 1996) führt die Exposition durch 60-Hz-Magnetfelder von $100 \mu\text{T}$ zu durchschnittlichen Stromdichten von $0,28 \text{ mA m}^{-2}$ und zu maximalen Stromdichten von annähernd 2 mA m^{-2} . Realistischere Berechnungen, die auf anatomisch und elektrisch verfeinerten Modellen beruhen (Xi und Stuchly 1994) ergaben für $100\text{-}\mu\text{T}$ -Felder von 60 Hz Stromdichten von über 2 mA m^{-2} . Allerdings beeinflusst die Gegenwart biologischer Zellen das räumliche Muster der induzierten Ströme und Felder, was verglichen mit jenen, die durch vereinfachte Analysen vorhergesagt werden, evtl. zu erheblichen Unterschieden sowohl in der Größenordnung (um einen Faktor von 2 größer) als auch den Mustern der induzierten Ströme führt (Stuchly und Xi 1994).

Modelle elektrischer Felder müssen die Tatsache berücksichtigen, daß, abhängig von den Expositionsbedingungen sowie der Größe, Gestalt und Lage des exponierten Körpers im Feld, die Oberflächenladungsdichte stark variieren kann, was zu einer variablen und ungleichmäßigen Verteilung von Strömen innerhalb des Körpers führt. Für sinusförmige elektrische Felder mit Frequenzen unter rund 10 MHz nimmt die Größenordnung der induzierten Stromdichte im Körper mit der Frequenz zu. Die Verteilung der induzierten Stromdichte variiert umgekehrt mit dem Körperquerschnitt und kann an Hals und Knöcheln sehr hoch sein. Der Expositionswert von 5 kV m^{-1} für die Exposition der Bevölkerung entspricht, unter Worst-Case-Bedingungen, einer induzierten Stromdichte von rund 2 mA m^{-2} in Hals und Rumpf, wenn der E-Feld-Vektor parallel zur Körperachse steht (ILO 1994; CRP 1997). Allerdings entspricht die durch 5 kV m^{-1} induzierte Stromdichte unter realistischen Worst-Case-Bedingungen den Basisgrenzwerten.

Zum Zweck einer Demonstration der Übereinstimmung mit den Basisgrenzwerten, sollten die Referenzwerte für elektrische und magnetische Felder getrennt und nicht zusammengekommen berücksichtigt werden. Das liegt daran, daß die von elektrischen und magnetischen Feldern induzierten Ströme für Schutzzwecke nicht additiv sind.

Für den speziellen Fall der beruflich bedingten Exposition bei Frequenzen bis 100 kHz können die abgeleiteten elektrischen Felder um den Faktor 2 unter Bedingungen erhöht werden, unter denen schädliche indirekte Wirkungen des Kontakts mit elektrisch geladenen Leitern ausgeschlossen werden können.

Bei Frequenzen über 10 MHz wurden die abgeleiteten elektrischen und magnetischen Feldstärken aus den Basisgrenzwerten der Ganzkörper-SAR gewonnen, wobei sowohl Berechnungen als auch Versuchsdaten verwendet wurden. Im ungünstigsten Fall erreicht die Energiekopplung ein Maximum zwischen 20 MHz und einigen hundert MHz. In diesem Frequenzbereich nehmen die abgeleiteten Referenzwerte den minimalen Wert an. Die abgeleiteten Magnetfeldstärken wurden aus den elektrischen Feldstärken unter Verwendung der

Fernfeldbeziehung zwischen E und H ($E/H = 377 \text{ Ohm}$) errechnet. Im Nahfeld gelten die SAR-Frequenz-Abhängigkeitskurven nicht mehr; darüber hinaus müssen die Beiträge der elektrischen und magnetischen Feldkomponenten getrennt betrachtet werden. Für eine konservative Approximation können für die Nahfeld-Abschätzung die Feld-Expositionswerte herangezogen werden, da die Kopplung von Energie aus dem Beitrag des elektrischen oder magnetischen Feldes die SAR-Grenzen nicht überschreiten kann. Für eine weniger konservative Abschätzung sollten die Basisgrenzwerte des Ganzkörper-Durchschnitts und der lokalen SAR verwendet werden.

Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung wurden aus jenen für die Exposition am Arbeitsplatz unter Verwendung verschiedener Faktoren über den gesamten Frequenzbereich gewonnen. Diese Faktoren wurden auf der Grundlage der Wirkungen gewählt, die als spezifisch und relevant für die verschiedenen Frequenzbereiche erkannt wurden. Im allgemeinen orientieren sich die Faktoren über den gesamten Frequenzbereich an den Basisgrenzwerten, und ihre Werte entsprechen dem mathematischen Verhältnis zwischen den Größen der Basisgrenzwerte und den wie unten beschrieben abgeleiteten Werten:

- Im Frequenzbereich bis 1 kHz betragen die Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch elektrische Felder die Hälfte des für Expositionen am Arbeitsplatz festgesetzten Wertes. Der Wert von 10 kV m^{-1} für eine 50-Hz-Exposition oder von $8,3 \text{ kV m}^{-1}$ für eine 60-Hz-Exposition am Arbeitsplatz beinhaltet einen ausreichend sicheren Spielraum, um Reizwirkungen durch Kontaktströme unter allen denkbaren Bedingungen zu verhindern. Die Hälfte dieses Wertes, d. h. 5 kV m^{-1} für 50 Hz bzw. $4,2 \text{ kV m}^{-1}$ für 60 Hz, wurde als Referenzwert für die Bevölkerung gewählt, um nachteilige indirekte Wirkungen für über 90 % der exponierten Personen zu verhindern;
- Im Niederfrequenzbereich bis 100 kHz sind die Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch Magnetfelder um einen Faktor von 5 unter den Werten für Expositionen am Arbeitsplatz festgesetzt worden;
- Im Frequenzbereich von 100 kHz-10 MHz wurden die Referenzwerte für die Magnetfeld-Exposition der Bevölkerung im Vergleich zu den Grenzwerten der IRPA-Richtlinie von 1988 erhöht. In jener Richtlinie wurden die Referenzwerte für die Magnetfeldstärke aus den Referenzwerten für die elektrische Feldstärke unter Verwendung der Fernfeld-Formel, die E und H miteinander in Beziehung setzt, berechnet. Diese Referenzwerte sind zu konservativ, da das Magnetfeld bei Frequenzen unter 10 MHz nicht nennenswert zum Risiko von Schocks, Verbrennungen oder Oberflächenladungseffekten beiträgt, die eine wichtige Grundlage für die Begrenzung der Exposition am Arbeitsplatz durch elektrische Felder in diesem Frequenzbereich bilden;
- Im Hochfrequenzbereich von 10 MHz-10 GHz liegen die Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch elektrische und magnetische Felder um den Faktor 2,2 unter

den für die Exposition am Arbeitsplatz festgelegten Werten. Der Faktor 2,2 entspricht der Quadratwurzel von 5, die den Sicherheitsfaktor zwischen den Basisgrenzwerten für die Exposition am Arbeitsplatz und jenen für die Exposition der Bevölkerung bildet. Die Quadratwurzel wird verwendet, um die Größen "Feldstärke" und "Leistungsdichte" miteinander in Beziehung zu setzen.

- Im Hochfrequenzbereich von 10-300 GHz werden die Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung wie bei den Basisgrenzwerten über die Leistungsdichte definiert und liegen um den Faktor 5 unter den Grenzwerten für die Exposition am Arbeitsplatz;
- Obwohl kaum Informationen über die Beziehung zwischen biologischen Wirkungen und Spitzenwerten gepulster Felder vorliegen, wird vorgeschlagen, daß S_{eq} für Frequenzen über 10 MHz, gemittelt über die Pulsdauer, das 1000-fache der Referenzwerte nicht überschreiten sollte, bzw., daß die Feldstärken das 32-fache der Referenzwerte für die Feldstärke, wie in Tabelle 6 und 7 oder in Abbildung 1 und 2 gezeigt, nicht überschreiten sollten. Für Frequenzen zwischen rund 0,3 GHz und mehreren GHz und für eine lokale Exposition des Kopfes muß die spezifische Absorption von Pulsen begrenzt werden, um Höreffekte, die durch thermoelastische Expansion verursacht werden, einzuschränken oder zu vermeiden. In diesem Frequenzbereich entspricht der SA-Schwellenwert von 4-16 mJ kg^{-1} zur Erzeugung dieses Effekts bei Pulsen von 30 μs den Spitzen-SAR-Werten von 130-520 W kg^{-1} im Gehirn. Zwischen 100 kHz und 10 MHz werden die Spitzenwerte für die Feldstärken in den Abbildungen 1 und 2 durch Interpolation zwischen dem 1,5-fachen des Spitzenwertes bei 100 kHz und dem 32-fachen des Spitzenwertes bei 10 MHz gewonnen;
- In den Tabellen 6 und 7 sowie in den Abbildungen 1 und 2 treten bei Referenzwerten für Expositionen am Arbeitsplatz und Expositionen der Bevölkerung verschiedene Eckfrequenzen auf. Dies ist eine Folge der wechselnden Faktoren, die zur Ableitung der Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung verwendet wurden, während im allgemeinen die Frequenzabhängigkeit für die Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung wie auch für die Exposition am Arbeitsplatz gleich gehalten wurde.

Tabelle 6. Referenzwerte für die berufliche Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder (ungestörte Effektivwerte)^a

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke (V m ⁻¹)	Magnetische Feldstärke (A m ⁻¹)	B-Feld (μT)	Äquivalente Leistungsdichte bei ebenen Wellen S _{eq} (W m ⁻²)
bis 1 Hz	—	1,63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	—
1-8 Hz	20 000	1,63 x 10 ⁵ /f ²	2 x 10 ⁵ /f ²	—
8-25 Hz	20 000	2 x 10 ⁴ /f	2,5 x 10 ⁴ /f	—
0,025-0,82 kHz	500/f	20/f	25/f	—
0,82-65 kHz	610	24,4	30,7	—
0,065-1 MHz	610	1,6/f	2,0/f	—
1-10 MHz	610/f	1,6/f	2,0/f	—
10-400 MHz	61	0,16	0,2	10
400-2000 MHz	3f ^{1/2}	0,008f ^{1/2}	0,01f ^{1/2}	f/40
2-300 GHz	137	0,36	0,45	50

^a Anmerkungen:

1. f wie in der Frequenzbereichs-Spalte wiedergegeben.
2. Vorausgesetzt, daß die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden und schädliche indirekte Wirkungen ausgeschlossen werden können, dürfen die Werte für die Feldstärke überschritten werden.
3. Für Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 GHz sind S_{eq}, E², H² und B² über einen beliebigen 6-Minuten-Zeitraum zu mitteln.
4. Für Spitzenwerte bei Frequenzen bis 100 kHz siehe Tabelle 4, Anmerkung 3.
5. Für Spitzenwerte bei Frequenzen über 100 kHz siehe die Abbildung 1 und 2. Zwischen 100 kHz und 10 MHz werden die Spitzenwerte der Feldstärken durch Interpolation zwischen dem 1,5-fachen Spitzenwert bei 100 kHz und dem 32-fachen Spitzenwert bei 10 MHz erhalten. Für Frequenzen über 10 MHz wird vorgeschlagen, daß der Spitzenwert der äquivalenten Leistungsdichte ebener Wellen, gemittelt über die Pulsdauer, das 1000-fache der S_{eq}-Grenzwerte nicht überschreitet, bzw. daß die Feldstärke das 32-fache der in der Tabelle angegebenen Feldstärken-Expositionswerte nicht überschreitet.
6. Für Frequenzen über 10 GHz sind S_{eq}, E², H² und B² über einen beliebigen 68/f^{1,05}-Minuten-Zeitraum zu mitteln (f in GHz).
7. Für Frequenzen < 1 Hz sind keine E-Feld-Werte angegeben, da es sich effektiv um statische elektrische Felder handelt. Elektroschocks durch niederohmige Quellen werden durch anerkannte Sicherheitsmaßnahmen für derartige Anlagen verhindert.

Tabelle 7. Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder (ungestörte Effektivwerte)^a

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke (V m ⁻¹)	Magnetische Feldstärke (A m ⁻¹)	B-Feld (μT)	Äquivalente Leistungsdichte bei ebenen Wellen S _{eq} (W m ⁻²)
bis 1 Hz	—	3,2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	—
1-8 Hz	10 000	3,2 x 10 ⁴ /f ²	4 x 10 ⁴ /f ²	—
8-25 Hz	10 000	4000/f	5000/f	—
0,025-0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	—
0,8-3 kHz	250/f	5	6,25	—
3-150 kHz	87	5	6,25	—
0,15-1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	—
1-10 MHz	87/f ^{1/2}	0,73/f	0,92/f	—
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	1,375f ^{1/2}	0,0037f ^{1/2}	0,0046f ^{1/2}	f/200
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

^a Anmerkungen:

1. f wie in der Frequenzbereichs-Spalte wiedergegeben.
2. Vorausgesetzt, daß die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden und schädliche indirekte Wirkungen ausgeschlossen werden können, dürfen die Werte für die Feldstärke überschritten werden.
3. Für Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 GHz sind S_{eq}, E², H² und B² über einen beliebigen 6-Minuten-Zeitraum zu mitteln.
4. Für Spitzenwerte bei Frequenzen bis 100 kHz siehe Tabelle 4, Anmerkung 3.
5. Für Spitzenwerte bei Frequenzen über 100 kHz siehe Abbildung 1 und 2. Zwischen 100 kHz und 10 MHz werden die Spitzenwerte der Feldstärken durch Interpolation zwischen dem 1,5-fachen Spitzenwert bei 100 kHz und dem 32-fachen Spitzenwert bei 10 MHz erhalten. Für Frequenzen über 10 MHz wird vorgeschlagen, daß der Spitzenwert der äquivalenten Leistungsdichte ebener Wellen, gemittelt über die Pulsdauer, das 1000-fache der S_{eq}-Grenzwerte nicht überschreitet, bzw. daß die Feldstärke das 32-fache der in der Tabelle angegebenen Feldstärken-Expositionswerte nicht überschreitet.
6. Für Frequenzen über 10 GHz sind S_{eq}, E², H² und B² über einen beliebigen 68/f^{1,05}-Minuten-Zeitraum zu mitteln (f in GHz).
7. Für Frequenzen < 1 Hz sind keine E-Feld-Werte angegeben, da es sich effektiv um statische elektrische Felder handelt. Bei den meisten Menschen wird die störende Wahrnehmung elektrischer Oberflächenladungen bei Feldstärken unter 25 kV m⁻¹ nicht auftreten. Funkenentladungen, die Streß oder Belästigungen verursachen, sollten vermieden werden.

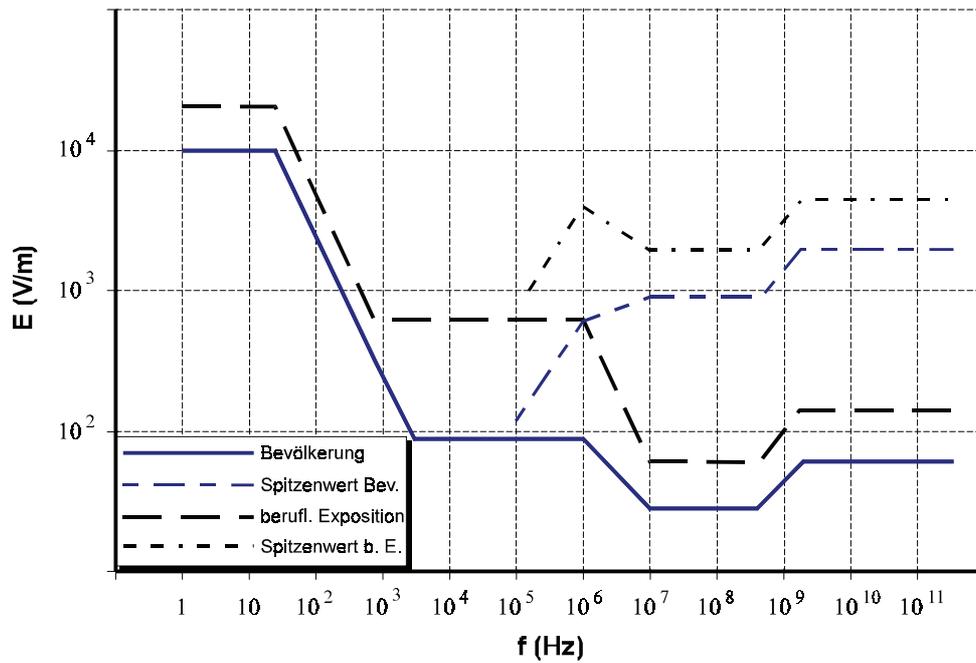


Abbildung 1. Referenzwerte für Expositionen durch zeitlich veränderliche elektrische Felder (vgl. Tabelle 6 und 7).

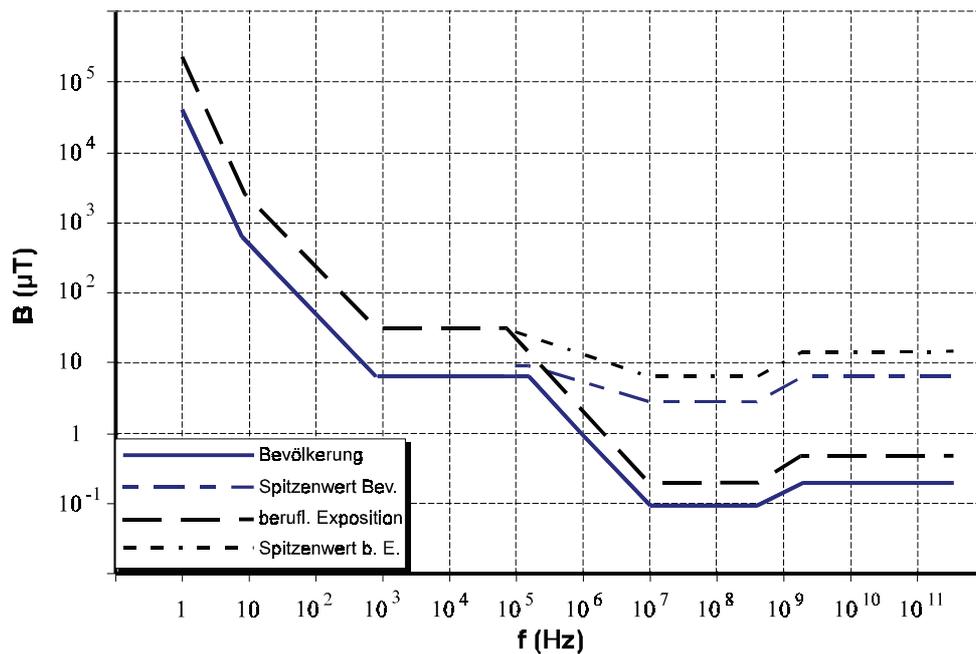


Abbildung 2. Referenzwerte für Expositionen durch zeitlich veränderliche Magnetfelder (vgl. Tabelle 6 und 7).

REFERENZWERTE FÜR KONTAKTSTRÖME UND INDUZIERTER STRÖME

Bis 110 MHz - worunter auch das FM-Sendeband fällt - werden Referenzwerte für Kontaktströme angegeben, bei deren Überschreiten Vorsicht zu walten hat, um Schocks und Verbrennungen zu vermeiden. Die Punktkontakt-Referenzwerte sind in Tabelle 8 wiedergegeben. Da die Schwellenwerte für Kontaktströme, die zu biologischen Reaktionen bei Kindern und erwachsenen Frauen führen, annähernd die Hälfte bzw. zwei Drittel der Werte für erwachsene Männer ausmachen, sind hinsichtlich der Exposition der Bevölkerung die Referenzwerte für Kontaktströme um den Faktor 2 niedriger als die Werte für die Exposition am Arbeitsplatz angesetzt.

Für den Frequenzbereich 10-110 MHz werden Referenzwerte für Ströme in den Gliedmaßen angegeben, die unter den Basisgrenzwerten für lokale SAR liegen (siehe Tabelle 9).

Tabelle 8. Referenzwerte für zeitlich veränderliche Kontaktströme leitfähiger Objekte^a

Art der Exposition	Frequenzbereich	Maximaler Kontaktstrom (mA)
Berufliche Exposition	bis 2,5 kHz	1,0
	2,5-100 kHz	0,4 <i>f</i>
	100 kHz-110 MHz	40
Exposition der Bevölkerung	bis 2,5 kHz	0,5
	2,5-100 kHz	0,2 <i>f</i>
	100 kHz-110 MHz	20

^a *f* ist die Frequenz in kHz.

Tabelle 9. Referenzwerte für in Gliedmaßen induzierte Ströme bei Frequenzen von 10-110 MHz^a

Art der Exposition	Strom (mA)
Berufliche Exposition	100
Exposition der Bevölkerung	45

^a *Anmerkungen:*

1. Der Referenzwert für die Exposition der Bevölkerung ist gleich dem Referenzwert für die berufliche Exposition dividiert durch $\sqrt{5}$.
2. Um dem Basisgrenzwert für die lokale SAR zu entsprechen, bildet die Quadratwurzel des zeitlich gemittelten Werts des Quadrates des induzierten Stromes über einen beliebigen 6-Minuten-Zeitraum die Grundlage für die Referenzwerte.

GLEICHZEITIGE EXPOSITION DURCH FELDER MIT MEHREREN FREQUENZEN

Es ist wichtig, zu bestimmen, ob sich in Fällen gleichzeitiger Exposition durch Felder verschiedener Frequenzen eine additive Wirkung der Exposition ergibt. Diese Additivität müssen hinsichtlich der Wirkungen thermischer und elektrischer Stimulation getrennt untersucht werden, wobei die unten aufgeführten Basisgrenzwerte eingehalten werden sollen. Die unten stehenden Formeln gelten für die relevanten Frequenzen bei praktischen Expositionssituationen.

Bei der elektrischen Stimulation, die für Frequenzen bis 10 MHz relevant ist, werden die induzierten Stromdichten gemäß folgender Formel addiert:

$$\sum_{i=1 \text{ Hz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1. \quad (5)$$

Für thermische Wirkungen, die oberhalb 100 kHz relevant sind, werden die SAR- und Leistungsdichte-Werte gemäß folgender Formel addiert:

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{10 \text{ GHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10 \text{ GHz}}^{300 \text{ GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1, \quad (6)$$

wobei

- J_i = die bei der Frequenz i induzierte Stromdichte;
- $J_{L,i}$ = der Basisgrenzwert für die induzierte Stromdichte bei der Frequenz i , wie in Tabelle 4 angegeben;
- SAR_i = die durch die Exposition bei der Frequenz i bewirkte SAR;
- SAR_L = der in Tabelle 4 angegebene SAR-Basisgrenzwert;
- S_L = der in Tabelle 5 angegebene Basisgrenzwert für die Leistungsdichte;
- S_i = die Leistungsdichte bei Frequenz i .

Für die praktische Anwendung der Basisgrenzwerte sollen folgende Kriterien für die Referenzwerte der Feldstärken herangezogen werden.

Für Effekte durch induzierte Stromdichten und elektrische Stimulation, die bis 10 MHz relevant sind, werden die beiden folgenden Voraussetzungen auf die Feldwerte angewendet:

$$\sum_{i=1 \text{ Hz}}^{1 \text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1, \quad (7)$$

und

$$\sum_{j=1 \text{ Hz}}^{65 \text{ kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1, \quad (8)$$

wobei

- E_i = die elektrische Feldstärke bei Frequenz i ;
- $E_{L,i}$ = der Referenzwert für das elektrische Feld aus Tabelle 6 und 7;
- H_j = die magnetische Feldstärke bei Frequenz j ;
- $H_{L,j}$ = der Referenzwert für das Magnetfeld aus Tabelle 6 und 7;
- $a = 610 \text{ V m}^{-1}$ für die berufliche Exposition und 87 V m^{-1} für die Exposition der Bevölkerung;
- $b = 24,4 \text{ A m}^{-1}$ ($30,7 \text{ } \mu\text{T}$) für die berufliche Exposition und 5 A m^{-1} ($6,25 \text{ } \mu\text{T}$) für die Exposition der Bevölkerung.

Die Konstanten a und b werden für elektrische Felder über 1 MHz und für Magnetfelder über 65 kHz gebraucht, da die Aufsummierung auf induzierten Stromdichten beruht und nicht mit thermischen Überlegungen vermengt werden sollte. Letzteres ist die Grundlage für $E_{L,i}$ und $H_{L,j}$ über 1 MHz bzw. 65 kHz, wie in Tabelle 6 und 7 angegeben.

Bei thermischen Überlegungen, die oberhalb von 100 kHz relevant sind, werden die beiden folgenden Voraussetzungen auf die Feldwerte angewendet:

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1, \quad (9)$$

und

$$\sum_{j=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left(\frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{j>1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1, \quad (10)$$

wobei

- E_i = die elektrische Feldstärke bei Frequenz i ;
- $E_{L,i}$ = der Referenzwert für das elektrische Feld aus Tabelle 6 und 7;
- H_j = die magnetische Feldstärke bei Frequenz j ;
- $H_{L,j}$ = der Referenzwert für das Magnetfeld aus Tabelle 6 und 7;
- $c = \text{gleich } 610/f \text{ V m}^{-1}$ (f in MHz) für die berufliche Exposition und $87/f^{1/2} \text{ V m}^{-1}$ für die Exposition der Bevölkerung;
- $d = \text{gleich } 1,6/f \text{ A m}^{-1}$ (f in MHz) für die berufliche Exposition und $0,73/f$ für die Exposition der Bevölkerung.

Für durch die Gliedmaßen fließende Ströme bzw. Kontaktströme werden die beiden folgenden Voraussetzungen angewendet:

$$\sum_{k=10 \text{ MHz}}^{110 \text{ MHz}} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1 \quad \sum_{n=1 \text{ Hz}}^{110 \text{ MHz}} \frac{I_n}{I_{C,n}} \leq 1, \quad (11)$$

wobei

- I_k = die Gliedstromkomponente bei Frequenz k ;
- $I_{L,k}$ = der Referenzwert für den Gliedstrom (siehe Tabelle 9);
- I_n = die Kontaktstromkomponente bei Frequenz n ;
- $I_{C,n}$ = der Referenzwert für den Kontaktstrom bei Frequenz n (siehe Tabelle 8).

Die obigen Summenformeln gehen von Worst-Case-Bedingungen bei Feldern mehrerer Quellen aus. Infolge dessen können typische Expositionssituationen in der Praxis weniger strenge Expositionswerte als die für die Referenzwerte in obigen Formeln ausgewiesenen erfordern.

SCHUTZMASSNAHMEN

ICNIRP stellt fest, daß die eine Exposition durch elektrische und magnetische Felder bewirkenden Unternehmen für die Einhaltung dieser Richtlinien in allen Bestandteilen verantwortlich sind.

Maßnahmen zum Schutz von Beschäftigten umfassen technische und verwaltungsmäßige Kontrollen, Personenschutzprogramme sowie die medizinische Überwachung (ILO 1994). Geeignete Schutzmaßnahmen sind dann durchzuführen, wenn die Exposition am Arbeitsplatz zur Überschreitung der Basisgrenzwerte führt. In einem ersten Schritt sollten, wann immer möglich, technische Kontrollen durchgeführt werden, um die Emission von Feldern aus Anlagen auf annehmbare Werte zu reduzieren. Solche Kontrollen beinhalten eine geeignete Sicherheitsauslegung sowie nötigenfalls die Verwendung von Sperren oder vergleichbaren Gesundheitsschutzmechanismen.

Administrative Kontrollen wie Zugangsbeschränkungen und die Verwendung hör- und sichtbarer Warneinrichtungen sollten in Verbindung mit den technischen Kontrollen durchgeführt werden. Personenschutzmaßnahmen wie Schutzbekleidung sollten, wenn gleich unter bestimmten Bedingungen sinnvoll, nur als letztes Mittel zur Gewährleistung der Sicherheit der Beschäftigten in Betracht gezogen werden; technische und administrative Kontrollen

sollten wann immer möglich bevorzugt werden. Ferner dürfen, wenn z. B. solche Ausrüstungen wie Isolierhandschuhe zum Schutz von Personen vor hochfrequenten Schocks und Verbrennungen verwendet werden, die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden, da die Isolierung nur gegen die indirekten Feldeffekte schützt.

Mit Ausnahme von Schutzbekleidung und anderen Personenschutzmaßnahmen können dieselben Maßnahmen immer dann auf die Bevölkerung angewandt werden, wenn die Möglichkeit besteht, daß die Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung überschritten werden könnten. Außerdem ist es wichtig, Vorschriften zu entwickeln und umzusetzen, die folgendes verhindern:

- Störung elektronischer medizinischer Einrichtungen und Geräte (einschließlich Herzschrittmacher);
- Detonation elektroexplosiver Einrichtungen mit elektrotechnischen Komponenten (Zünder usw.)
- Feuer und Explosionen infolge der Entzündung brennbarer Stoffe durch Funken, die durch induzierte Felder, Kontaktströme oder Funkenentladungen hervorgerufen werden.

DANKSAGUNGEN

Die Unterstützung des ICNIRP durch die Internationale Strahlenschutz-Vereinigung, die Weltgesundheitsorganisation, das Umweltprogramm der Vereinten Nationen, das Internationale Arbeitsamt, die Europäische Kommission und die deutsche Bundesregierung wird dankbar erwähnt.

LITERATUR

- Adair, E. R.; Adams, B. W.; Akel, G. M. Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior. *Bioelectromagnetics*; 5:13-30; 1984.
- Adair, E. R.; Adams, B. W. Microwaves modify thermoregulatory behavior in squirrel monkey. *Bioelectromagnetics*; 1:1-20; 1980.
- Albert, E. N.; Slaby, F.; Roche, J.; Loftus, J. Effect of amplitude modulated 147 MHz radio-frequency radiation on calcium ion efflux from avian brain tissue. *Radiat. Res*; 109:19-27; 1987.
- Allen, S. G.; Bernhardt, J. H.; Driscoll, C. M. H.; Grandolfo, M.; Mariutti, G. F.; Matthes, R.; McKinlay, A. F.; Steinmetz, M.; Vecchia, P.; Whillock, M. Proposals for basic restrictions for protection against occupational exposure to electromagnetic non-ionizing radiations. Recommendations of an International Working Group set up under the auspices of the Commission of the European Communities. *Phys. Med.*; VII:77-89; 1991.
- American Conference of Government Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH; American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 1996.

- Astumian, R. D.; Weaver, J. C.; Adair, R. K. Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells. *PNAS*; 92:3740-3743; 1995
- Balcer-Kubiczek, E. K.; Harrison, G. H. Neoplastic transformation of C3H/10T1/2 cells following exposure to 120 Hz modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. *Radiat. Res.*; 126:65-72; 1991.
- Baris, D.; Armstrong, B. G.; Deadman, J.; Thériault, G. A mortality study of electrical utility workers in Quebec. *Occ. Environ. Med.*; 53:25-31; 1996.
- Barron, C. I.; Baraff, A. A. Medical considerations of exposure to microwaves (radar). *J. Am. Med. Assoc.*; 168:1194-1199; 1958.
- Baum, A.; Mevissen, M.; Kamino, K.; Mohr, U.; Löscher, W. A histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 μ T magnetic field exposure. *Carcinogenesis*; 16:119-125; 1995.
- Bawin, S. M.; Gavalas-Medici, R. J.; Adey, W. R. Reinforcement of transient brain rhythms by amplitude modulated VHF fields. In: *Biological and clinical effects of low frequency magnetic and electric fields* (Llaurado, J. G.; Sances, A.; Battocletti, J. H., eds.). Springfield, IL, Charles C. Thomas:172-186; 1974.
- Bawin, S. M.; Kaczmarek, L. K.; Adey, W. R. Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann. NY Acad. Sci.*; 274:74-81; 1975.
- Beall, C.; Delzell, E.; Cole, P.; Brill, I. Brain tumors among electronics industry workers. *Epidemiology*; 7:125-130; 1996.
- Beniashvili, D. S.; Bilanishvili, V. G.; Menabde, M. Z. The effect of low-frequency electromagnetic fields on the development of experimental mammary tumors. *Vopr. Onkol.*; 37:937-941; 1991.
- Bergqvist, U. Pregnancy outcome and VDU work - a review. In: Luczak, H.; Cakir, A.; An Cakir, G., eds. *Work with Display Units '92 - Selected Proceedings of the 3rd International Conference WWDO '92, Berlin Germany 1-4 Sept. 1992*. Amsterdam, Elsevier, 70-76; 1993.
- Bernhardt, J. H. The direct influence of electromagnetic fields on nerve and muscle cells of man within the frequency range of 1 Hz to 30 MHz. *Radiat. Environ. Biophys.*; 16:309-323; 1979.
- Bernhardt, J. H. The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects. *Radiat. Environ. Biophys.*; 27:1-27; 1988.
- Bernhardt, J. H. Basic criteria of ELF-standards: worldwide achievement in public and occupational health protection against radiation. *Proceedings of the Eighth International Congress of the International Radiation Protection Association*, 933-936; 1992.
- Blackman, C. F.; Elder, J. A.; Weil, C. M.; Benane, S. G.; Eichinger, D. C.; House, D. E. Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation: effects of modulation frequency and field strength. *Radio Sci.*; 14:93-98; 1979.
- Blank, M., ed. *Electromagnetic fields: biological interactions and mechanisms*. Washington, DC; American Chemical Society Press; 1995.
- Bracken, M. B.; Belanger, K.; Hellenbrand, K.; Dlugosz, L.; Holford, T. R.; McSharry, J. E.; Adesso, K.; Leaderer, B. Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth. *Epidemiol.*; 6:263-270; 1995.
- Brent, R. L.; Beckman, D. A.; Landel, C. P. Clinical teratology. *Curr. Opin. Pediatr.*; 5:201-211; 1993.

- Byus, C. V.; Lundak, R. L.; Fletcher, R. M.; Adey, W. R. Alterations in protein kinase activity following exposure of cultured human lymphocytes to modulated microwave fields. *Bioelectromagnetics*; 5:341-351; 1984.
- Byus, C. V.; Pieper, S. E.; Adey, W. R. The effects of low-energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis*; 8:1385-1389; 1987.
- Byus, C. V.; Kartun, K.; Pieper, S.; Adey, W. R. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Res.*; 48:4222-4226; 1988.
- Chatterjee, I.; Wu, D.; Gandhi, O. P. Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazards analysis in the VLF-MF band. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-33:486-494; 1986.
- Chen, J. Y.; Gandhi, O. P. Thermal implications of high SARs in the body extremities at the ANSI-recommended MF-VHF safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-35:435-441; 1988.
- Chernoff, N.; Rogers, J. M.; Kavet, R. A review of the literature on potential reproductive and developmental toxicity of electric and magnetic fields. *Toxicology*; 74:91-126; 1992.
- Chou, C.-K.; Guy, A. W.; Kunz, L. I.; Johnson, R. B.; Crowley, J. J.; Krupp, J. H. Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics*; 13:469-496; 1992.
- Cohen, B. H.; Lillienfield, A. M.; Kramer, A. M.; Hyman, L. C. C. Parental factors in Down's syndrome: results of the second Baltimore case control study. In: *Population cytogenetics - studies in humans* (Hook, E. B; Porter, I. H., eds.). New York, Academic Press; 301-352; 1977.
- Coleman, M. P.; Bell, C. M. J.; Taylor, H. L.; Primic-Zakelj, M. Leukemia and residence near electricity transmission equipment: a case-control study. *Br. J. Cancer*; 60:793-798; 1989.
- Commission on Radiological Protection. Protection against low-frequency electric and magnetic fields in energy supply and use. Recommendation, approved on 16th / 17th February 1995. In: *Berichte der Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 7*. Stuttgart, Fischer; 1997.
- Cook, M. R.; Graham, C.; Cohen, H. D.; Gerkovich, M. M. A replication study of human exposure to 60-Hz fields: effects on neurobehavioral measures. *Bioelectromagnetics*; 13:261-285; 1992.
- Cridland, N. A. Electromagnetic fields and cancer: a review of relevant cellular studies. Chilton, UK; National Radiological Protection Board; Report NRPB-R256; 1993.
- Daels, J. Microwave heating of the uterine wall during parturition. *Obstet. Gynecol.*; 42:76-79; 1973.
- Daels, J. Microwave heating of the uterine wall during parturition. *J. Microwave Power*; 11:166-167; 1976.
- D'Andrea, J. A.; DeWitt, J. R.; Gandhi, O. P.; Stensaas, S.; Lords, J. L.; Neilson, H. C. Behavioral and physiological effects of chronic 2450-MHz microwave irradiation of the rat at 0.5 mW/cm². *Bioelectromagnetics*; 7:45-56; 1986.
- De Lorge, J. O.; Ezell, C. S. Observing responses of rats exposed to 1.28- and 5.62-GHz microwaves. *Bioelectromagnetics*; 1:183-198; 1980.
- Demers, P. A.; Thomas, D. B.; Sternhagen, A.; Thompson, W. D.; Curnen, M. G. M.; Satariano, W.; Austin, D. F.; Issacson, P.; Greenberg, R. S.; Key, C.; Kolonel, L. K.; West, D. W. Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am. J. Epidemiol.*; 132:775-776; 1991.

- Dimbylow, P. J. FDTD calculations of the whole-body averaged SAR in an anatomically realistic voxel model of the human body from 1 MHz to 1 GHz. *Phys. Med. Biol.*; 42:479-490; 1997.
- Dimbylow, P. J.; Mann, S. M. SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phys. Med. Biol.*; 39:1537-1553; 1994.
- DIN VDE 0848, Teil 1, Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Mess- und Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag, Berlin; 1995.
- Dolk, H.; Shaddick, H.; Walls, P.; Grundy, C.; Thakrar, B.; Kleinschmidt, I.; Elliot, P. Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part I. Sutton Coldfield Transmitter. *Am. J. Epidemiol.*; 145:1-9; 1997a.
- Dolk, H.; Elliot, P.; Shaddick, G.; Walls, P.; Thakrar, B. Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part II. All high-power transmitters. *Am. J. Epidemiol.*; 145:10-17; 1997b.
- Durney, C. H.; Massoudi, H.; Iskander, M. F. Radiofrequency radiation dosimetry handbook, Reg. No. SAM-TR-85-73. U.S. Air Force School of Aerospace, Medical Division, Brooks Air Force Base, Texas; 1985.
- Feychting, M.; Ahlbom, A. Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.*; 138:467-481; 1993.
- Feychting, M.; Ahlbom, A. Magnetic fields, leukemia, and central nervous system tumors in Swedish adults residing near high-voltage power lines. *Epidemiology*; 5:501-509; 1994.
- Feychting, M.; Kaune, T.W.; Savitz, D.A.; Ahlbom, A. Estimating exposure in studies on residential magnetic fields and cancer. *Epidemiology*; 7:220-224; 1996.
- Floderus, B.; Persson, T.; Stenlund, C.; Wennberg, A.; Ost, A.; Knave, B. Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden. *Cancer Causes and Control*; 4:465-476; 1993.
- Frey, A. M. Auditory system response to radiofrequency energy. *Aerospace Med.*; 32:1140-1142; 1961.
- Frey, A. M.; Messenger, R. Human perception of illumination with pulsed ultra-high-frequency electromagnetic radiation. *Science*; 181:356-358; 1973.
- Fulton, J. P.; Cobb, S.; Preble, L.; Leone, L.; Forman, E. Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am. J. Epidemiol.*; 111:292-295; 1980.
- Gandhi, O. P.; Chen, J. Y.; Riazi, A. Current induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; BME-33(8):757-767; 1986.
- Gandhi, O. P. Some numerical methods for dosimetry: extremely low frequencies to microwave frequencies. *Radio Science*; 30:161-177; 1995.
- Goodman, R.; Bassett, C. A.; Henderson, A. S. Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription. *Science*; 220:1283-1285; 1983.
- Goodman, R.; Henderson, A. S. Exposure of salivary gland cells to low-frequency electromagnetic fields alters polypeptide synthesis. *Proc. Nat. Acad. Sci.*; 85:3928-3232; 1988.
- Goodman, R.; Henderson, A. S. Transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 25:335-355; 1991.
- Graham, C.; Cook, M. R.; Cohen, H. D.; Gerkovich, M. M. Dose response study of human exposure to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 15:447-463; 1994.
- Graham, C.; Cook, M. R.; Riffle, D. W.; Gerkovich, M. M.; Cohen, H. D. Nocturnal melatonin levels in human volunteers exposed to intermittent 60 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; 17:263-273; 1996.

- Graham, C.; Cook, M. R.; Riffle, D. W. Human melatonin during continuous magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*; 18:166-171; 1997.
- Grayson, J. K. Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force: a nested case-control study. *Am. J. Epidemiol.*; 143:480-486; 1996.
- Greene, J. J.; Skowronski, W. J.; Mullins, J. M.; Nardone, R. M. Delineation of electric and magnetic field effects of extremely low frequency electromagnetic radiation on transcription. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*; 174:742-749; 1991.
- Guénel, P.; Nicolau, J.; Imbernon, E.; Chevalier, A.; Goldberg, M. Exposure to 50-Hz electric field and incidence of leukemia, brain tumors, and other cancers among French electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 144:1107-21; 1996.
- Gurney, J. G.; Mueller, B. A.; Davis, S.; Schwartz, S. M.; Stevens, R. G.; Kopecky, K. J. Childhood brain tumor occurrence in relation to residential power line configuration, electric heating sources, and electric appliance use. *Am. J. Epidemiol.*; 143:120-128; 1996.
- Guy, A. W.; Lin, J. C.; Kramar, P. O.; Emery, A. Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique, MTT-23*:492-498; 1975.
- Heath, C. W. Jr. Electromagnetic field exposure and cancer: a review of epidemiologic evidence. *Ca. Cancer J. Clin.*; 46:29-44; 1996.
- Hocking, B.; Gordon, I. R.; Grain, M. L.; Hatfield, G. E. Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med. J. Australia*; 165:601-605; 1996.
- Hoque, M.; Gandhi, O. P. Temperature distributions in the human leg for VLF-VHF exposures at the ANSI-recommended safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; 35:442-449; 1988.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.*; 66:100-106; 1994.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Phys.*; 70:587-593; 1996.
- International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection., ICRP Publication 66, Table B.6:p 189, Oxford, Pergamon; 1994.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York, Institute of Electrical and Electronic Engineers; (IEEE C95.1-1991); 1992.
- International Labour Organisation. Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva, International Labour Office; (Occupational Safety and Health Series, No. 69); 1994.
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Phys.*; 54:115-123; 1988.
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. *Health Phys.*; 58:113-121; 1990.
- Jokela, K.; Puranen, L.; Gandhi, O. P. Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. *Health Phys.*; 66:237-244; 1994.
- Källén, B.; Malmquist, G.; Moritz, U. Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: Is non-ionizing radiation a fetal hazard? *Arch. Environ. Health*; 37:81-85; 1982.

- Kamimura, Y.; Sato, K.; Saiga, T.; Amemiya, Y. Effects of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans. Communications*, E77-B:762-765; 1994.
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Diaz Ricci, J. C.; Kirschvink, S. J. Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics*; Suppl. 1:101-113; 1992a.
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Woodford, B. J. Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc. Nat. Acad. Sci.*; 89:7683-7687; 1992b.
- Kues, H. A.; Hirst, L. W.; Luty, G. A.; D'Anna, S. A.; Dunkelberger, G. R. Effects of 2.45-GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics*; 6:177-188; 1985.
- Kuster, N.; Balzano, Q. Energy absorption mechanisms by biological bodies in the near-field of dipole antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VT-42:17-23; 1992.
- Lacy-Hulbert, A.; Wilkins, R. C.; Hesketh, T. R.; Metcalfe, J. C. No effect of 60 Hz electromagnetic fields on MYC or beta-actin expression in human leukemic cells. *Rad. Res.*; 144:9-17; 1995.
- Lai, H.; Singh, N. P. Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*; 16:207-210; 1995.
- Lai, H.; Singh, N. P. Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radiation Biol.*; 69:513-521; 1996.
- Larsen, A. I.; Olsen, J.; Svane, O. Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists. *Scand. J. Work Environ. Health*; 17:324-329; 1991.
- Li, D.; Ceckoway, H.; Mueller, B. A. Electric blanket use during pregnancy in relation to the risk of congenital urinary tract anomalies among women with a history of subfertility. *Epidemiology*; 6:485-489; 1995.
- Li, C. Y.; Thériault, G.; Lin, R. S. Epidemiological appraisal of studies of residential exposure to power frequency magnetic fields and adult cancers. *Occup. Environ. Med.*; 53:505-510; 1996.
- Liburdy, R. P. Biological interactions of cellular systems with time-varying magnetic fields. *Ann. NY Acad. Sci.*; 649:74-95; 1992.
- Lillienfeld, A. M.; Tonascia, J.; Tonascia, S.; Libauer, C. A.; Cauthen, G. M. Foreign service health status study - evaluation of health status of foreign service and other employees from selected eastern European posts. Final report. Washington, DC, Department of State; Contract No. 6025-619073, NTIS PB-288163; 1978.
- Lin, J. C. Microwave auditory effects and applications. Springfield, IL, Charles C. Thomas; 1978.
- Lindbohm, M. L.; Hietanen, M.; Kyyrönen, P.; Sallmen, M.; van Nandelstadh, P.; Taskinen, H.; Pekkarinen, M.; Ylikoski, M.; Hemminki, K. Magnetic fields of video display terminals and spontaneous abortion. *Am. J. Epidemiol.*; 136:1041-1051; 1992.
- Linnet, M. S.; Hatch, E. E.; Kleinerman, R. A.; Robinson, L. L.; Kaune, W. T.; Friedman, D. R.; Severson R. K.; Haines, C. M.; Hartsock, C. T.; Niwa, S.; Wacholder, S.; Tarone, R.E. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *New Eng. J. Med.*; 337:1-7; 1997.
- Litovitz, T. A.; Krause, D.; Mullins, J. M. Effect of coherence time of the applied magnetic field on ornithine decarboxylase activity. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*; 178(3):862-865; 1991.

- Litovitz, T. A.; Montrose, C. J.; Wang, W. Dose-response implications of the transient nature of electromagnetic-field-induced bioeffects: theoretical hypotheses and predictions. *Bioelectromagnetics*; Suppl. 1:237-246; 1992.
- Litovitz, T. A.; Krause, D.; Penafiel, M.; Elson, E. C.; Mullins, J. M. The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics*; 14:395-403; 1993.
- 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.
- Löscher, W.; Mevissen, M. Linear relationship between flux density and tumor co-promoting effect of prolonging magnetic exposure in a breast cancer model. *Cancer Letters*; 96:175-180; 1995.
- Lövsund, P.; Öberg, P.; Nilsson, S. E. G. Magneto- and electrophosphenes: a comparative study. *Med. Biol. Eng. Computing*; 18:758-764; 1980.
- London, S. J.; Thomas, D. C.; Bowman, J. D.; Sobel, E.; Cheng, T. C.; Peters, J. M. Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am. J. Epidemiol.*; 134:923-937; 1991.
- Loomis, D. P.; Savitz, D. A.; Ananth, C. V. Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *J. Nat. Cancer Inst.*; 86:921-925; 1994.
- Lyle, D. B.; Schechter, P.; Adey, W. R.; Lundak, R. L. Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to sinusoidally amplitude-modulated fields. *Bioelectromagnetics*; 4:281-292; 1983.
- Magin, R. L.; Liburdy, R. P.; Persson, B. Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Ann. NY Acad. Sci.*; 649; 1992.
- Matanoski, G. M.; Breyse, P. N.; Elliott, E. A. Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet*; 337:737; 1991.
- McCann, J.; Dietrich, F.; Rafferty, C.; Martin, A. A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutation Res.*; 297:61-95; 1993.
- McDowall, M. Mortality in persons resident in the vicinity of electricity transmission facilities. *Br. J. Cancer*; 53; 271-279; 1985.
- McKinlay, A. F.; Andersen, J. B.; Bernhardt, J. H.; Grandolfo, M.; Hossmann, K.-A.; Mild, K. H.; Swerdlow, A. J.; Van Leeuwen, M.; Verschaeve, L.; Veyret, B. Radiotelephones and human health - proposal for a European research programme. Report of a European Commission Expert Group. Brussels, European Commission Directorate General XIII; 1996.
- McLean, J.; Stuchly, M. A.; Mitchel, R. E.; Wilkinson, D.; Yang, H.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Schunk, M.; Callary, E.; Morrison, D. Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field: II. Tumor development and immune response. *Bioelectromagnetics*; 12:273-287; 1991.
- Mevissen, M.; Stamm, A.; Buntenkötter, S.; Zwingelberg, R.; Wahnschaffe, U.; Löscher, W. Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics*; 14:131-143; 1993.
- Mevissen, M.; Kietzmann, M.; Löscher, W. *In vivo* exposure of rats to weak alternating magnetic field increases ornithine decarboxylase activity in the mammary gland by a similar extent as the carcinogen DMBA. *Cancer Letters*; 90:207-214; 1995.
- Michaelis, J.; Schüz, J.; Meinert, R.; Menger, M.; Grigat, J.-P.; Kaatsch, P.; Kaletsch, U.; Miesner, A.; Stamm, A.; Brinkmann, K.; Kärner, H.. Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes and Control*; 8:167-174; 1997.

- Michaelson, S. M. Biological effects and health hazards of RF and MW energy: fundamentals and overall phenomenology. In: Grandolfo, M.; Michaelson, S. M.; Rindi, A., eds. Biological effects and dosimetry of nonionizing radiation. New York, Plenum Press; 337-357; 1983.
- Michaelson, S. M.; Elson, E. C. Modulated fields and 'window' effects. In: Polk, C.; Postow, E., eds. Handbook of Biological effects of electromagnetic fields. Boca Raton, FL, CRC Press; 435-533; 1996.
- Milham, S., Jr. Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *New Engl. J. Med.*; 307:249; 1982.
- Miller, A. B.; To, T.; Agnew, D. A.; Wall, C.; Green, L. M. Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 144:150-160; 1996.
- Murphy, J. C.; Kaden, D. A.; Warren, J.; Sivak, A. Power frequency electric and magnetic fields: a review of genetic toxicology. *Mutation Res.*; 296:221-240; 1993.
- Myers, A.; Cartwright, R. A.; Bonnell, J. A.; Male, J. C.; Cartwright, S. C. Overhead power lines and childhood cancer. International Conference of Electric and Magnetic Fields in Medicine and Biology, London, December 4-5, 126; IEEE Conf. Publ. No. 257; 1985.
- National Academy of Science/National Research Council. Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields. Washington, DC, National Academy Press; 1996.
- National Council on Radiation Protection. Radiofrequency electromagnetic fields. Properties, quantities and units, biophysical interaction, and measurement. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 67; 1981.
- National Council on Radiation Protection. A practical guide to the determination of human exposure to 1981 radiofrequency fields. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 119; 1993.
- National Radiological Protection Board. Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: III: Radiofrequency and microwave radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; Report R-240; 1991.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 3(1); 1992.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Summary of the views of the Advisory Group on Non-ionising Radiation on epidemiological studies published since its 1992 report. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 4(5); 1993.
- National Radiological Protection Board. Health effects related to the use of visual display units. Report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB Documents 5(2); 1994a.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Supplementary report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation of 12 April 1994. *Radiol. Prot. Bull.*; 154:10-12; 1994b.
- Olsen, J. H.; Nielsen, A.; Schulgen, G. Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children. *Danish Cancer Registry*, AG-NIR:1-26; 1993.
- Oak Ridge Associated Universities. Health effects of low-frequency electric and magnetic fields. Oak Ridge, Oak Ridge Associated Universities, TE; ORAU 92/F9; 1992.

- Ouellet-Hellstrom, R.; Stewart, W. F. Miscarriages among female physical therapists, who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation. *Am. J. Epidemiol.*; 138:775-786; 1993.
- Phillips, J. L.; Haggren, W.; Thomas, W. J.; Ishida-Jones, T.; Adey, W. R. Magnetic field-induced changes in specific gene transcription. *Biochim. Biophys. Acta*; 1132:140-144; 1992.
- Polk, C.; Postow, E. *Handbook of Biological effects of electromagnetic fields*, 2nd ed. Boca Raton, FL, CRC Press; 1996.
- Polson, M. J. R.; Barker, A. T.; Freeston, I. L. Stimulation of nerve trunks with time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*; 20:243-244; 1982.
- Postow, E.; Swicord, M. L. Modulated fields and 'window' effects. In: *Handbook of biological effects of electromagnetic fields* (Polk, C.; Postow, E., eds.). Boca Raton, FL, CRC Press; 535-580; 1996.
- Preston-Martin, S.; Peters, J. M.; Yu, M. C.; Garabrant, D. H.; Bowman, J. D. Myelogenous leukemia and electric blanket use. *Bioelectromagnetics*; 9:207-213; 1988.
- Preston-Martin, S.; Navidi, W.; Thomas, D.; Lee, P.-J.; Bowman, J.; Pogoda, J. Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am. J. Epidemiol.*; 143:105-119; 1996a.
- Preston-Martin, S.; Gurney, J. G.; Pogoda, J. M.; Holly, E. A.; Mueller, B. A. Brain tumor risk in children in relation to use of electric blankets and water bed heaters: results from the United States West Coast Childhood Brain Tumor Study. *Am. J. Epidemiol.*; 143:1116-1122; 1996b.
- Ramsey, J. D.; Kwon, Y. C. Simplified decision rules for predicting performance loss in the heat. In: *Proceedings Seminar on heat stress indices*. Luxembourg, CEC 337; 1988.
- Rannug, A.; Ekström, T.; Mild, K. H.; Holmberg, B.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. A study on skin tumour formation in mice with 50 Hz magnetic field exposure. *Carcinogenesis*; 14:573-578; 1993a.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekström, T.; Mild, K. H. Rat liver foci study on coexposure with 50 Hz magnetic fields and known carcinogens. *Bioelectromagnetics*; 14:17-27; 1993b.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Mild, K. H. A rat liver foci promotion study with 50-Hz magnetic fields. *Environ. Res.*; 62:223-229; 1993c.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekström, T.; Mild, K. H.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. Intermittent 50 Hz magnetic field and skin tumour promotion in Sencar mice. *Carcinogenesis*; 15:153-157; 1994.
- Reilly, J. P. Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: exposure to time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*; 3:101-109; 1989.
- Reilly, J. P. *Electrical stimulation and electropathology*. Cambridge, Cambridge University Press; 1992.
- Repacholi, M. H. Low-level exposure to radiofrequency fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*; 19:1-19; 1998.
- Repacholi, M. H.; Stolwijk, J. A. J. Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. *Rad. Protect. Austral.*; 9:79-84; 1991.
- Repacholi, M. H.; Cardis, E. Criteria for EMF health risk assessment. *Rad. Protect. Dosim.*; 72:305-312; 1997.
- Repacholi, M. H.; Basten, A.; Gebiski, V.; Noonan, D.; Finnie, J.; Harris, A. W. Lymphomas in E μ -Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Rad. Res.*; 147:631-640; 1997.

- Robinette, C. D.; Silverman, C.; Jablon, S. Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar). *Am. J. Epidemiol.*; 112:39-53; 1980.
- Rothman, K. J.; Chou, C. K.; Morgan, R.; Balzano, Q.; Guy, A. W.; Funch, D. P.; Preston-Martin, S.; Mandel, J.; Steffens, R.; Carlo, G. Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research. *Epidemiology*; 7:291-298; 1996a.
- Rothman, K. J.; Loughlin, J. E.; Funch, D. P.; Dreyer, N. A. Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology*; 7:303-305; 1996b.
- Ruppe, I.; Hentschel, K.; Eggert, S.; Goltz, S. Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung von 50 Hz Magnetfeldern. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Fb 11.003; 1995 (in German).
- Saffer, J. D.; Thurston, S. J. Cancer risk and electromagnetic fields. *Nature*; 375:22-23; 1995.
- Salford, L. G.; Brun, A.; Eberhardt, J. L. Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 30:313-318; 1993.
- Sander, R.; Brinkmann, J.; Kühne, B. Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50 Hz electric and magnetic fields. CIGRE, International Congress on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 1-9 September, CIGRE Paper 36-01; 1982.
- Santini, R.; Hosni, M.; Deschaux, P.; Packeco, H. B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. *Bioelectromagnetics*; 9:105-107; 1988.
- Sarkar, S.; Ali, S.; Behari, J. Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. *Mutation Res.*; 320:141-147; 1994.
- Savitz, D. A. Overview of epidemiological research on electric and magnetic fields and cancer. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.*; 54:197-204; 1993.
- Savitz, D. A.; Ahlbom, A. Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure. In: *Biologic effects of electric and magnetic fields*, Vol. 2. New York, Academic Press; 233-262; 1994.
- Savitz, D. A.; Loomis, D. P. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.*; 141:123-134; 1995.
- Savitz, D. A.; Wachtel, H.; Barnes, F. A.; John, E. M.; Tvrdik, J. G. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*; 128:21-38; 1988.
- Savitz, D. A.; John, E. M.; Kleckner, R. C. Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 131:763-773; 1990.
- Schnorr, T. M.; Grajewski, B. A.; Hornung, R. W.; Thun, M. J.; Egeland, G. M.; Murray, W. E.; Conover, D. L.; Halperin, W. E. Video display terminals and the risk of spontaneous abortion. *New Eng. J. Med.*; 324:727-733; 1991.
- Schreiber, G. H.; Swaen, G. M.; Meijers, J. M.; Slangen, J. J.; Sturmans, F. Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment: a retrospective cohort study. *Int. J. Epidemiol.*; 22:9-15; 1993.
- Selmaoui, B.; Lambrozo, J.; Touitou, Y. Magnetic fields and pineal function in humans: evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms. *Life Sci.*; 58:1539-1549; 1996.
- Selvin, S.; Schulman, J.; Merrill, D. W. Distance and risk measures for the analysis of spatial data: a study of childhood cancers. *Soc. Sci. Med.* 34:769-777; 1992.

- Severson, R. K.; Stevens, R. G.; Kaune, W. T.; Thomas, D. B.; Houser, L.; Davis, S.; Sever, L. E. Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 128:10-20; 1988.
- Shaw, G. W.; Croen, L. A. Human adverse reproductive outcomes and electromagnetic fields exposures: review of epidemiologic studies. *Environ. Health Persp.* 101:107-119; 1993.
- Shellock, F. G.; Crues, J. V. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical imaging at 1.5 T. *Radiology*; 163:259-262; 1987.
- Sienkiewicz, Z. J.; Saunders, R. D.; Kowalczyk, C. I. The biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: II Extremely low frequency electric and magnetic fields. Chilton, UK, National Radiological Protection Board; NRPB R239; 1991.
- Sienkiewicz, Z. J.; Cridland, N. A.; Kowalczyk, C. I.; Saunders, R. D. Biological effects of electromagnetic fields and radiations. In: Stone, W. R.; Hyde, G., eds. *The review of radio science: 1990-1992*; Oxford, Oxford University Press; 737-770; 1993.
- Silny, J. The influence threshold of a time-varying magnetic field in the human organism. In: Bernhardt, J. H., ed. *Biological effects of static and extremely-low-frequency magnetic fields*. Munich, MMV Medizin Verlag; 105-112; 1986.
- Sliney, D.; Wolbarsht, M. *Safety with laser and other optical sources*. London, Plenum Press; 1980.
- Sobel, E.; Davanipour, Z. EMF exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease. *Neurology*; 47:1594-1600; 1996.
- Stern, S.; Margolin, L.; Weiss, B.; Lu, S. T.; Michaelson, S. M. Microwaves: effects on thermoregulatory behavior in rats. *Science*; 206:1198-1201; 1979.
- Stevens, R. G. Electric power use and breast cancer: a hypothesis. *Am. J. Epidemiol.*; 125:556-561; 1987.
- Stevens, R. G.; Davis, S.; Thomas, D. B.; Anderson, L. E.; Wilson, B. W. Electric power, pineal function and the risk of breast cancer. *The FASEB Journal*; 6:853-860; 1992.
- Stevens, R. G.; Davis, S. The melatonin hypothesis: electric power and breast cancer. *Environ. Health Persp.*; 104(Suppl. 1):135-140; 1996.
- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on mood and verbal reasoning skills. *Br. J. Ind. Med.*; 43:339-349; 1986.
- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on vigilance and concentration. *Br. J. Ind. Med.*; 44:111-118; 1987.
- Stuchly, M. A.; McLean, J. R. N.; Burnett, R.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Mitchel, R. E. J. Modification of tumor promotion in the mouse skin by exposure to an alternating magnetic field. *Cancer Letters*; 65:1-7; 1992.
- Stuchly, M. A.; Xi, W. Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields. *Phys. Med. Biol.*; 39:1319-1330; 1994.
- Szmigielski, S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radio-frequency and microwave) electromagnetic radiation. *Science of the Total Environment*; 180:9-17; 1996.
- Szmigielski, S.; Szudinski, A.; Pietraszek, A.; Bielec, M.; Wrembel, J. K. Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*; 3:179-191; 1982.
- Szmigielski, S.; Bielec, M.; Lipski, S.; Sokolska, G. Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. In: Marino, A. A., ed. *Modern bioelectricity*. New York, Marcel Dekker; 861-925; 1988.

- Tenforde, T. S. Biological interactions and human health effects of extremely-low-frequency magnetic fields. In: *Extremely low-frequency electromagnetic fields: the question of cancer.* (Anderson, L. E.; Stevens, R. G.; Wilson, B. W. eds.). Columbia, OH, Battelle Press; 291-315; 1990.
- Tenforde, T. S. Biological interactions of extremely-low-frequency electric and magnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.*; 25:1-17; 1991.
- Tenforde, T. S. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Ann. Rev. Public Health*; 13:173-196; 1992.
- Tenforde, T. S. Cellular and molecular pathways of extremely-low-frequency electromagnetic field interactions with living systems. In: Blank, M., ed. *Electricity and magnetism in biology and medicine.* San Francisco, San Francisco Press; 1-8; 1993.
- Tenforde, T. S. Interaction of ELF magnetic fields with living systems. In: Polk, C.; Postow, E., eds. *Handbook of Biological effects of electromagnetic fields.* Boca Raton, FL, CRC Press; 185-230; 1996.
- Tenforde, T. S.; Kaune, W. T. Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health Phys.*; 53:585-606; 1987.
- Thériault, G.; Goldberg, M.; Miller, A. B.; Armstrong, B.; Guénel, P.; Deadman, J.; Imbernon, E.; To, T.; Chevalier, A.; Cyr, D.; Wall, C. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France - 1970-1989. *Am. J. Epidemiol.*; 139:550-572; 1994.
- Tofani, S.; d'Amore, G.; Fiandino, G.; Benedetto, A.; Gandhi, O. P.; Chen, J. Y. Induced foot-currents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EC-37:96; 1995.
- Tomenius, L. 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county. *Bioelectromagnetics*; 7:191-207; 1986.
- Tynes, T.; Andersen, A.; Langmark, F. Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*; 136:81-88; 1992.
- Tynes, T.; Haldorsen, T. Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.*; 145:219-226; 1997.
- Ueno, S. (ed.). *Biological effects of magnetic and electromagnetic fields.* New York, Plenum Press; 1996.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. *Extremely low frequency (ELF) fields.* Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 35; 1984.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. *Magnetic fields.* Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 69; 1987.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. *Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz).* Geneva, World Health Organization; Environmental Health Criteria 137; 1993.
- Vena, J. E.; Graham, S.; Hellman, R.; Swanson, M.; Brasure, J. Use of electric blankets and risk of post-menopausal breast cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 134:180-185; 1991.
- Vena, J. E.; Freudenheim, J. L.; Marshall, J. R.; Laughlin, R.; Swanson, M.; Graham, S. Risk of premenopausal breast cancer and use of electric blankets. *Am. J. Epidemiol.*; 140:974-979; 1994.
- Verkasalo, P. K. Magnetic fields and leukemia: risk for adults living next to power lines. *Scand. J. Work Environ. Health*; 22 (Suppl. 2):7-55; 1996.

- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Hongisto, M. Y.; Valjus, J. E.; Jörvinen, P. J.; Heikkilö, K. V.; Koskenvuo, M. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Br. Med. J.*; 307:895-899; 1993.
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Kaprio, J.; Heikkilä, K. V.; Koskenvuo, M. Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults: nationwide cohort study. *Br. Med. J.*; 313:1047-1051; 1996.
- Verreault, R.; Weiss, N. S.; Hollenbach, K. A.; Strader, C. H.; Daling, J. R. Use of electric blankets and risk of testicular cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 131:759-762; 1990.
- Walleczek, J. Electromagnetic field effects on cells of the immune system: the role of calcium signalling. *The FASEB Journal*; 6:3177-3185; 1992.
- Walleczek, J.; Liburdy, R. P. Nonthermal 60 Hz sinusoidal magnetic-field exposure enhances $^{45}\text{Ca}^{2+}$ uptake in rat thymocytes: dependence on mitogen activation. *FEBS Letters*; 271:157-160; 1990.
- Wertheimer, N.; Leeper, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.*; 109:273-284; 1979.
- Williams, G. M. Comment on "Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells" by Henry Lai and Narendra P. Singh. *Bioelectromagnetics*; 17:165; 1996.
- Xi, W.; Stuchly, M. A. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*; 9:127-134; 1994.

ANHANG

Glossar

Absorption: Bei der Ausbreitung von Radiowellen die Schwächung der Radiowellen durch Dissipation ihrer Energie, d. h. die Umwandlung ihrer Energie in eine andere Form wie z. B. Wärme.

Berufliche Exposition: Jede Exposition durch EMF, die Personen während der Ausübung ihrer Arbeit erfahren.

Blut-Hirn-Schranke: Funktionelles Konzept, das entwickelt wurde, um zu erklären, warum viele vom Blut transportierte Stoffe zwar leicht in andere Gewebe, nicht jedoch in das Gehirn gelangen; diese Barriere funktioniert wie eine permanente Membran, die das Gefäßsystem des Gehirns auskleidet. Die Endothelzellen der Hirnkapillare bilden die nahezu dauerhafte Schranke, die verhindert, daß Substanzen vom Blut in das Gehirn gelangen.

CW (continuous wave): Kontinuierliche Welle mit konstanter Amplitude. Im Gegensatz zu pulsformigen Wellenpaketen oder amplitudenmodulierten Wellen.

Dielektrizitätskonstante: Siehe Permittivität.

Dosimetrie: Messung oder Berechnung der internen elektrischen Feldstärke oder der induzierten Stromdichte, der spezifischen Energieabsorption oder der Verteilung der spezifischen Energieabsorptionsrate bei Menschen oder Tieren, die elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind.

Ebene Welle: Elektromagnetische Welle, bei der die elektrischen und magnetischen Feldvektoren in einer zur Wellenausbreitungsrichtung senkrecht stehenden Ebene liegen und deren magnetische Feldstärke (multipliziert mit der Impedanz der Umgebung) gleich der elektrischen Feldstärke ist.

Eindringtiefe: Bei ebenen Wellen eines elektromagnetischen Feldes (EMF), die auf die Grenzfläche eines guten Leiters auftreffen, ist die Eindringtiefe dieser Welle jene Tiefe, bei der die Feldstärke der Welle auf $1/e$ oder rund 37 % des ursprünglichen Wertes abgesunken ist.

Elektrische Feldstärke: Die Kraft (E) auf eine ruhende positive Einheitsladung an einem bestimmten Ort in einem elektrischen Feld; gemessen in Volt pro Meter ($V\ m^{-1}$).

Elektromagnetische Energie: Die in einem elektromagnetischen Feld gespeicherte Energie; ausgedrückt in Joule (J).

ELF: Extrem niedrige Frequenz; Frequenzen unter 300 Hz.

EMF: Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder.

Feldwellenwiderstand: Das Verhältnis der komplexen Zahl (Vektor), die das transversale elektrische Feld an einem bestimmten Ort repräsentiert, zu der, die das transversale Magnetfeld an diesem Ort repräsentiert; ausgedrückt in Ohm (Ω).

Fernfeld: Der Bereich, in dem der Abstand von einer abstrahlenden Antenne größer ist als die Wellenlänge der abgestrahlten EMF; im Fernfeld stehen sowohl die Feldkomponenten (E und H) als auch die Ausbreitungsrichtung senkrecht aufeinander, und die Form des Feldes ist unabhängig vom Abstand von der Quelle.

Frequenz: Anzahl der vollen sinusförmigen Schwingungen elektromagnetischer Wellen pro Sekunde; gewöhnlich in Hertz (Hz) ausgedrückt.

Leistungsdichte: Die Leistung, die bei der Ausbreitung von Radiowellen durch eine Einheitsfläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Wellen geht; ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter (W m^{-2}).

Leitfähigkeit, elektrische: Der Skalar oder Vektorbetrag, der, multipliziert mit der elektrischen Feldstärke die Leitungsstromdichte ergibt; sie ist der Kehrwert des Leitungswiderstands. Ausgedrückt in Siemens pro Meter (S m^{-1}).

Leitwert: Kehrwert des Widerstands. Ausgedrückt in Siemens (S).

Magnetische Feldstärke: Eine axiale Vektorgröße (H), die neben der magnetischen Flußdichte ein Magnetfeld irgendwo im Raum spezifiziert und in Ampere pro Meter (A m^{-1}) ausgedrückt wird.

Magnetische Flußdichte: Eine Vektorgröße (B), die aus der Kraft resultiert, die auf eine bewegte Ladung oder bewegte Ladungen wirkt und in Tesla (T) ausgedrückt wird.

Magnetische Permeabilität: Der Skalar oder Vektorbetrag, der, multipliziert mit der magnetischen Feldstärke, die magnetische Flußdichte ergibt; ausgedrückt in Henry pro Meter (H m^{-1}). *Anmerkung:* Bei isotropen Medien ist die magnetische Permeabilität ein Skalar, bei anisotropen Medien eine Tensorgröße.

Mikrowellen: Elektromagnetische Strahlung genügend kurzer Wellenlänge, zu deren praktischen Gebrauch Wellenleiter und verwandte Hohlraumtechniken für Übertragung und Empfang genutzt werden können. *Anmerkung:* Der Terminus dient zur Bezeichnung von Strahlungen oder Feldern im Frequenzbereich von 300 MHz-300 GHz.

Nahfeld: Der Bereich, in dem der Abstand von der abstrahlenden Antenne kleiner ist als die Wellenlänge der abgestrahlten EMF. *Anmerkung:* Die Magnetfeldstärke (multipliziert mit der Impedanz der Umgebung) und die elektrische Feldstärke sind verschieden und variieren bei Abständen von weniger als einem Zehntel der Wellenlänge von einer Antenne umgekehrt mit dem Quadrat oder der dritten Potenz des Abstands, wenn die Antenne im Vergleich zu diesem Abstand kurz ist.

Nichtionisierende Strahlung (NIR): Umfaßt alle Strahlungen und Felder des elektromagnetischen Spektrums, die normalerweise nicht genügend Energie besitzen, um in Stoffen eine Ionisierung zu bewirken; charakterisiert durch eine Energie pro Photon von unter rund 12 eV, Wellenlängen von über 100 nm und Frequenzen von unter 3×10^{15} Hz.

Nichtthermischer Effekt: Die Wirkung elektromagnetischer Energie auf einen Körper, die nicht mit Wärme verbunden ist.

Öffentliche Exposition: Jegliche Exposition durch EMF, die Mitglieder der Normalbevölkerung erfahren, ausgenommen der beruflichen Exposition sowie der Exposition während medizinischer Untersuchungen.

Permittivität: Eine Konstante, die den Einfluß eines isotropen Mediums auf die Anziehungs- und Abstoßungskräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern definiert und in Farad pro Meter ($F m^{-1}$) ausgedrückt wird; die *relative Permittivität* ist die Permittivität eines Stoffes oder Mediums dividiert durch die Permittivität des Vakuums.

Quadratisches Mittel: Bestimmte elektrische Effekte sind proportional zur Quadratwurzel des Durchschnitts des Quadrats einer periodischen Funktion (über eine Periode). Das quadratische Mittel, auch Effektivwert genannt, wird gebildet, indem die Funktion zunächst quadriert, sodann der Durchschnitt der erhaltenen Quadrate und schließlich die Quadratwurzel dieses Durchschnitts gebildet wird.

Radiofrequenz (RF): Alle Frequenzen, bei denen elektromagnetische Strahlung für die Telekommunikation nützlich ist. *Anmerkung:* In dieser Publikation bezieht sich der Begriff *Radiofrequenz* auf den Frequenzbereich von 300 Hz-300 GHz.

Resonanz: Die Änderung der Amplitude, die eintritt, wenn sich die Frequenz der Welle der Eigenfrequenz des Mediums annähert oder mit ihr identisch ist; die Ganzkörper-Absorption elektromagnetischer Wellen bildet ihren Höchstwert, d. h. die Resonanz bei Frequenzen (in MHz) von ungefähr $114/L$, wobei L die Größe der betreffenden Person in Meter ist.

Spezifische Energieabsorption: Die pro Masseneinheit eines biologischen Gewebes absorbierte Energie (SA), ausgedrückt in Joule pro Kilogramm ($J kg^{-1}$); die spezifische Energieabsorption ist das Zeitintegral der spezifischen Energieabsorptionsrate.

Spezifische Energieabsorptionsrate (SAR): Die Rate, mit der Energie vom Körpergewebe absorbiert wird, ausgedrückt in Watt pro Kilogramm ($W kg^{-1}$); die SAR ist das dosimetrische Maß, das bei Frequenzen von über rund 100 kHz weitgehend anerkannt ist.

Stromdichte: Ein Vektor, dessen Integral über eine gegebene Fläche gleich dem elektrischen Strom ist, der durch diese Fläche tritt; die mittlere Dichte in einem linearen Leiter ist gleich dem Strom dividiert durch die Fläche des Leiterquerschnitts. Ausgedrückt in Ampere pro Quadratmeter ($A m^{-2}$).

Wellenlänge: Der Abstand zwischen zwei in Ausbreitungsrichtung einer periodischen Welle aufeinanderfolgenden Punkten, an denen die Schwingung die gleiche Phase besitzt.



Verzeichnis aller Publikationen der Strahlenschutzkommission

In der Reihe „*Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission*“ sind bisher erschienen:

- Band 1 Empfehlungen der Strahlenschutzkommission zu speziellen Fragen des Strahlenschutzes in den Jahren 1974 - 1984
1985, 279 Seiten, 31 Tabellen, ISBN 3-437-11034-9, DM 68,00
- Band 2 Wirkungen nach pränataler Bestrahlung
2. Auflage, deutsch/englisch
1989, 378 Seiten, 5 Abbildungen, 7 Tabellen., ISBN 3-437-11293-7, DM 62,00
- Band 3 Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition durch Photonenstrahlung und Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition durch Elektronen, insbesondere durch β -Strahlung
2., durchges. Auflage
1992, 93 Seiten, 41 Abbildungen, 20 Tabellen, ISBN 3-437-11412-3, DM 36,00
- Band 4 Medizinische Maßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen; Leitfaden für: Ärztliche Berater der Katastrophenschutzleitung, Ärzte in Notfallstationen, Ärzte in der ambulanten Betreuung
2. überarb. Aufl. 1995, 64 Seiten, 3 Abbildungen, 5 Tabellen, ISBN 3-437-11682-7, DM 34,00
- Band 5 Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl in der Bundesrepublik Deutschland. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission zur Abschätzung, Begrenzung und Bewertung
1986, 93 Seiten, 1 Abbildung, 7 Tabellen, ISBN 3-437-11084-5, DM 26,00
- Band 6 Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 1985/1986
1987, 212 Seiten, 2 Abbildungen, 27 Tabellen, ISBN 3-437-11138-8, DM 42,00
- Band 7 Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl auf die Bundesrepublik Deutschland. Aktivitätskonzentrationen in der Bundesrepublik Deutschland. Empfehlungen zur Begrenzung der Strahlenexposition. Strahlenexposition der Bevölkerung und Bewertung. Zusammenfassender Bericht der Strahlenschutzkommission
1987, 237 Seiten, 61 Abbildungen, 40 Tabellen, ISBN 3-437-11147-7, DM 29,00
- Band 8 Zur beruflichen Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland
1988, 353 Seiten, ISBN 3-437-11187-6, DM 54,00
- Band 9 Radionuklide in Wasser-Schwebstoff-Sediment-Systemen und Abschätzung der Strahlenexposition
1988, 300 Seiten, 83 Abbildungen, 52 Tabellen, ISBN 3-437-11196-5, DM 48,00
- Band 10 Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 1987
deutsch/englisch
1988, 114 Seiten, 1 Abbildungen, 7 Tabellen, ISBN 3-437-11233-3, DM 29,00
- Band 11 Strahlenschutzfragen bei Anfall und Beseitigung von radioaktiven Reststoffen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 6.-7. November 1986
1988, 223 Seiten, 60 Abbildungen, 21 Tabellen, ISBN 3-437-11238-4, DM 42,00
- Band 12 Aktuelle Fragen zur Bewertung des Strahlenkrebsrisikos
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission 5.-6. November 1987
1988, 291 Seiten, 31 Abbildungen, 41 Tabellen, ISBN 3-437-11239-2, DM 48,00

- Band 13 Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen
2., überarbeitete Auflage
1995, 296 Seiten, 21 Abbildungen, 37 Tabellen, ISBN 3-437-11639-8, DM 78,00
- Band 14 Strahlenexposition und Strahlengefährdung durch Plutonium
1989, 177 Seiten, 12 Abbildungen, 23 Tabellen, ISBN 3-437-11258-9, DM 38,00
- Band 15 Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 1988/1989
deutsch/englisch
1992, 233 Seiten, 2 Abbildungen, 9 Tabellen, ISBN 3-437-11278-3, DM 49,00
- Band 16 Nichtionisierende Strahlung
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 7.-9. Dezember 1988
1990, 421 Seiten, 71 Abbildungen, 29 Tabellen, ISBN 3-437-11279-1, DM 68,00
- Band 17 Modelle, Annahmen und Daten mit Erläuterungen zur Berechnung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser zum Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte nach §45 StrlSchV
1992, 194 Seiten, 13 Abbildungen, ISBN 3-437-11419-0, DM 49,00
- Band 18 Maßnahmen nach Kontamination der Haut mit radioaktiven Stoffen
1992, 144 Seiten, 7 Abbildungen, 12 Tabellen, ISBN 3-437-11450-6, DM 44,00
- Band 19 Die Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland und deren Bewertung
1992, 114 Seiten, 43 Abbildungen, 17 Tabellen, ISBN 3-437-11451-4, DM 42,00
- Band 20 Risiken durch ionisierende Strahlen und chemotoxische Stoffe; Quantifizierung, Vergleich, Akzeptanz
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 7./8. Dezember 1989
1992, 200 Seiten, 18 Abbildungen., 13 Tabellen, ISBN 3-437-11452-2, DM 48,00
- Band 21 Die Strahlenexposition durch den Bergbau in Sachsen und Thüringen und deren Bewertung
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 7.-11. November 1990
1993, 208 Seiten, 42 Abbildungen, 16 Tabellen, ISBN 3-437-11453-0, DM 64,00
- Band 22 Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk
1992, 137 Seiten, 23 Abbildungen, 14 Tabellen, ISBN 3-437-11438-7, DM 44,00
- Band 23 Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe von kontaminierten Materialien, Gebäuden, Flächen oder Halden aus dem Uranerzbergbau
Empfehlungen der Strahlenschutzkommission mit Erläuterungen
1992, 198 Seiten, 4 Abbildungen, 1 Karte, ISBN 3-437-11495-6, DM 54,00
- Band 24 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1990/1991
deutsch/englisch
1993, 357 Seiten, 2 Abbildungen, 6 Tabellen, ISBN 3-437-11519-7, DM 76,00
- Band 25 Notfallschutz und Vorsorgemaßnahmen bei kerntechnischen Unfällen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 7./8. November 1991
1993, 347 Seiten, 112 Abbildungen, 46 Tabellen, ISBN 3-437-11520-0, DM 74,00
- Band 26 Strahlenschutzüberlegungen zum Messen und Bergen von radioaktiven Satellitenbruchstücken
1994, 160 Seiten, 23 Abbildungen, 14 Tabellen, ISBN 3-437-11629-0, DM 52,00

- Band 27 Medizinische Maßnahmen bei Strahlenunfällen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 11.-13. November 1992
1994, 372 Seiten, 51 Abbildungen, 31 Tabellen, ISBN 3-437-11633-9, DM 64,00
- Band 28 Wirkungen niederfrequenter Felder
Symposium des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission
am 3./4. Dezember 1992
1994, 306 Seiten, 64 Abbildung, 34 Tabellen, ISBN 3-437-11634-7, DM 58,00
- Band 29 Ionisierende Strahlung und Leukämieerkrankungen von Kindern und Jugendlichen
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission mit Anlagen
1994, 98 Seiten, 10 Abbildungen, 6 Tabellen, ISBN 3-437-11635-5, DM 34,00
- Band 30 Strahlenexposition in der medizinischen Diagnostik
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 18./19. Oktober 1993
1995, 462 Seiten, 80 Abbildungen, 127 Tabellen, ISBN 3-437-11659-2, DM 74,00
- Band 31 Empfehlungen und Stellungnahmen
der Strahlenschutzkommission 1992/1993
deutsch/englisch
1997, 316 Seiten, 5 Abbildungen, 12 Tabellen, ISBN 3-437-25406-5, DM 86,00
- Band 32 Der Strahlenunfall – Ein Leitfaden für Erstmaßnahmen
1996, 107 Seiten, ISBN 3-437-11685-1, DM 44,00
- Band 33 Molekulare und zelluläre Prozesse bei der Entstehung stochastischer Strahlenwirkungen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 13./14. Oktober 1994
1995, 253 Seiten, 61 Abbildungen, 9 Tabellen, ISBN 3-437-11685-1, DM 74,00
- Band 34 Environmental UV-Radiation, Risk of Skin Cancer and Primary Prevention
Internationaler Kongreß und Klausurtagung der Strahlenschutzkommission,
6.-8. Mai 1996, Hamburg
1996, 443 Seiten, ISBN 3-437-25188-0, DM 98,00
- Band 35 Sicherheitsaspekte der Sonographie
Sachverständigenanhörung der Strahlenschutzkommission, 2./3. März 1995
1998, 244 Seiten, ISBN 3-437-25187-2, DM 68,00
- Band 36 Empfehlungen und Stellungnahmen
der Strahlenschutzkommission 1994
1997, deutsch/englisch, 210 Seiten, ISBN 3-437-25189-9, DM 58,00
- Band 37 Aktuelle radioökologische Fragen des Strahlenschutzes
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 12./13. Oktober 1995
1998, 294 Seiten, ISBN 3-437-25199-6, DM 78,00
- Band 38 Funkanwendungen
Technische Perspektiven, biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 15./16. Mai 1997
1999, ca. 280 Seiten, *in Vorbereitung*
- Band 39 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1995
1998, 124 Seiten, ISBN 3-437-21448-9
- Band 40 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1996
1998, 100 Seiten, ISBN 3-437-21439-X, DM 68,00
- Band 41 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1997
1998, 200 Seiten, ISBN 3-437-21438-1, DM 78,00

- Band 42 Methoden, Probleme und Ergebnisse der Epidemiologie
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 13.-15. Mai 1998
In Vorbereitung
- Band 43 Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition
1999, 180 Seiten, *in Vorbereitung*
- Band 44 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1998
1999, 208 Seiten

In der Reihe „*Berichte der Strahlenschutzkommission*“
sind bisher erschienen:

- Heft 1 Die Ermittlung der durch kosmische Strahlung verursachten Strahlenexposition des fliegenden Personals
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1995, 69 Seiten, ISBN 3-437-11666-5, DM 27,00
- Heft 2 20 Jahre Strahlenschutzkommission 1974-1994 – Eine Bilanz –
Erläuternde Texte zu den Aufgaben, zur Arbeitsweise und zur Geschichte der Strahlenschutzkommission.
Mit vollständigen Verzeichnissen der Empfehlungen und Stellungnahmen sowie Veröffentlichungen
1995, 57 Seiten, ISBN 3-437-11671-1, DM 26,50
- Heft 3 Kriterien für die Alarmierung der Katastrophenschutzbehörden durch die Betreiber kerntechnischer Einrichtungen
Gemeinsame Empfehlung der Reaktor-Sicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission. Mit Erläuterungen
1995, 38 Seiten, ISBN 3-437-11688-6, DM 20,50
- Heft 4 10 Jahre nach Tschernobyl
Information der Strahlenschutzkommission zu den radiologischen Auswirkungen und Konsequenzen insbesondere in Deutschland
1996, 34 Seiten, ISBN 3-437-11730-0, DM 26,00
- Heft 5 Atmosphärische Ausbreitung bei kerntechnischen Notfällen
1996, 183 Seiten, ISBN 3-437-11731-9, DM 46,50
- Heft 6 Konzepte und Handlungsziele für eine nachhaltige, umweltgerechte Entwicklung im Strahlenschutz in Deutschland. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1996, 22 Seiten, ISBN 3-437-25288-7, DM 16,00
- Heft 7 Schutz vor niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern der Energieversorgung und -anwendung.
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
deutsch/englisch
1997, 124 Seiten, ISBN 3-437-25436-7, DM 36,00
- Heft 8 Jahresbericht 1996 der Strahlenschutzkommission
1997, 33 Seiten, ISBN 3-437-25438-3, DM 19,50
- Heft 9 Interventionelle Radiologie
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
1997, 48 Seiten, ISBN 3-437-25458-8, DM 20,50
- Heft 10 Strahlenexposition an Arbeitsplätzen durch natürliche Radionuklide
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1997, 69 Seiten, deutsch/englisch, ISBN 3-437-21336-9, DM 20,50

- Heft 11 Auswirkungen der Einführung neuer Dosismeßgrößen im Strahlenschutz
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1998, 60 Seiten, ISBN 3-437-25557-6, DM 24,50
- Heft 12 Jahresbericht 1997 der Strahlenschutzkommission
1998, 56 Seiten, ISBN 3-437-25558-4, DM 24,00
- Heft 13 Wissenschaftliche Begründung für die Anpassung des Kapitels 4 „Berechnung der
Strahlenexposition“ der Störfallberechnungsgrundlagen für Kernkraftwerke mit
Druckwasserreaktor
in Vorbereitung
- Heft 14 Empfehlungen zur Patientensicherheit bei Anwendungen der Ultraschalldiagnostik in der
Medizin
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
einschließlich wissenschaftlicher Begründung
1998, 74 Seiten, ISBN 3-437-25559-2, DM 28,00
- Heft 15 Grundsätze für die Anwendung radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlen am Menschen in
der medizinischen Forschung (Grundsätze nach § 41 StrlSchV)
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1998, 46 Seiten, ISBN 3-437-25568-1, DM 22,00
- Heft 16 Freigabe von Materialien, Gebäuden und Bodenflächen mit geringfügiger Radioaktivität aus
anzeige- oder genehmigungspflichtigem Umgang
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
deutsch/englisch
1998, 124 Seiten, ISBN 3-437-21306-X, DM 36,00
- Heft 17 Radon-Statusgespräch 1998
1998, 242 Seiten, ISBN 3-437-25569-X, DM 49,00
- Heft 18 Empfehlungen zur Vermeidung gesundheitlicher Risiken bei Anwendung magnetischer
Resonanzverfahren in der medizinischen Diagnostik
1998, 74 Seiten, ISBN 3-437-25579-7, DM 27,00
- Heft 19 UV-Strahlung und malignes Melanom
Bewertung epidemiologischer Studien von 1990-1996
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission und wissenschaftliche Begründung
1998, 86 Seiten, ISBN 3-437-25599-1
- Heft 20 Jahresbericht 1998 der Strahlenschutzkommission
1999, 60 Seiten, ISBN 3-437-25589-4
- Heft 21 Anforderungen an die Kontaminationskontrolle beim Verlassen eines Kontrollbereiches
(§ 64 Abs. 2 StrlSchV)
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
mit Originalarbeiten
In Vorbereitung
- Heft 22 Der Einsatz von SODAR-Geräten bei kerntechnischen Anlagen
In Vorbereitung
- Heft 23 Schutz der Bevölkerung bei Exposition durch elektromagnetische Felder (bis 300 GHz)
Empfehlung der Strahlenschutzkommission und wissenschaftliche Begründung
mit deutscher Übersetzung der ICNIRP-„Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric,
Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)“
1999, 120 Seiten, *In Vorbereitung*

In der Reihe „*Informationen der Strahlenschutzkommission*“ sind bisher erschienen:

- Nummer 1 Strahlenunfall
Ein Leitfaden für Erstmaßnahmen - Kurzfassung
- Nummer 2 Verzeichnis aller Publikationen der Strahlenschutzkommission
Mit Kurzbeschreibung der einzelnen Veröffentlichungen
- Nummer 3 The German Commission on Radiological Protection
Objectives, Recommendations and Statements
- Nummer 4 Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung
Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission
1995 - 1997
- Nummer 5 Strahlenschutz und Strahlenbelastung im Zusammenhang mit Polizeieinsätzen anlässlich von
CASTOR-Transporten
Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission
sowie Erläuterungen zum Strahlenrisiko

Die Ausgaben der Reihe „*Informationen der Strahlenschutzkommission*“ sind kostenlos über die Geschäftsstelle der Strahlenschutzkommission erhältlich

*Veröffentlichung des Bundesamtes für Strahlenschutz
in Zusammenarbeit mit der Strahlenschutzkommission:*

Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz.

Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission, München, 6./7. März 1996. Herausgegeben von Prof. Dr. A. Bayer, Prof. Dr. A. Kaul und Prof. Dr. Chr. Reiners
1996, 594 Seiten, ISBN 3-437-25198-8, DM 98,00

Eine stets aktuelle Liste der SSK-Publikationen ist auch im Internet-Angebot der Strahlenschutzkommission enthalten.



Die Strahlenschutzkommission im Internet:
www.ssk.de