

SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 302

Nichtionisierende
Strahlung

Begrenzung der
Immissionen von
nichtionisierender
Strahlung

Frequenzbereich
0 Hz bis 300 GHz



Bundesamt für
Umwelt, Wald und
Landschaft
BUWAL

SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 302

Nichtionisierende
Strahlung

Begrenzung der
Immissionen von
nichtionisierender
Strahlung

Frequenzbereich
0 Hz bis 300 GHz

Bericht der Arbeitsgruppe
«Nichtionisierende Strahlung»

Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL
Bern, 1998

Arbeitsgruppe «Nichtionisierende Strahlung»

Vorsitz

Prof. Dr. Helmut Krueger, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich

Mitglieder

Dr. Jürg Baumann, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Sekretariat)

Dr. Stefan Joss, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Protokoll)

Hermann Jossen, SUVA Luzern

Dr. Matthias Jungck, Bundesamt für Gesundheit

Prof. Dr. Theodor Koller, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich

Dr. Vlasta Mercier, Bundesamt für Gesundheit

Dr. Christoph Minder, Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Bern

Dr. Christoph Schierz, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich

PD Dr. Alfred Walz, Theodor-Kocher-Institut, Universität Bern

Prof. emerit. Dr. Silvio Weidmann, Bern (bis Mitte 1997)

Projektleitung

Dr. Jürg Baumann, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Bezug Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Dokumentation
CH-3003 Bern
Fax + 41 (0)31 324 02 16
E-Mail: docu@buwal.admin.ch
Internet: www.buwalshop.ch

Bestellnummer und Preis
SRU-302-D / CHF 8.– (inkl. MWSt)

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5
Vorwort	7
Zusammenfassung	9
1. Einleitung	11
2. Die neue ICNIRP-Richtlinie 1998	13
2.1 Kurzporträt der ICNIRP	13
2.2 Kurzfassung der neuen ICNIRP-Richtlinie 1998	14
2.3 Beurteilung durch die Arbeitsgruppe NIS	16
2.3.1 Schutzziel	16
2.3.2 Zugrundeliegende Datenbasis	17
2.3.3 Basisgrenzwerte und Referenzwerte	18
2.3.4 Referenzwerte für die elektrische und magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte	19
2.3.5 Mittelungsdauer	20
2.3.6 Zusammengesetzte Immissionen	21
2.3.7 Messunsicherheit	22
3. Biologische Wirkungen bei Immissionen unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte	24
3.1 Vorbemerkungen	24
3.2 Epidemiologische Untersuchungen über Krebsrisiken und 50/60 Hz Magnetfelder	25
3.3 Beeinflussung des Melatoninhaushalts	26
3.4 Elektrosensitivität	26
3.5 Nachbemerkung	28
4. Empfehlung der Arbeitsgruppe NIS für den Schutz der Bevölkerung vor nichtionisierender Strahlung	29
4.1 Immissionsgrenzwerte	29
4.2 Vorsorgeaspekte	30
5. Literaturverzeichnis	31

Anhang 1	Verwendete Abkürzungen	33
Anhang 2	Verzeichnis der von der Arbeitsgruppe NIS evaluierten Untersuchungsberichte	35
Anhang 3	Auszug aus der ICNIRP-Richtlinie 1998	39

Abstracts

Begrenzung der Immissionen von nichtionisierender Strahlung. Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz: 1998 hat die Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) ihre Richtlinie über die Begrenzung der Immissionen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Wechselfelder aktualisiert. Die vom BUWAL eingesetzte Arbeitsgruppe "Nichtionisierende Strahlung" erläutert und kommentiert diese Richtlinie. Sie empfiehlt, die Referenzwerte dieser Richtlinie als Immissionsgrenzwerte für kurzzeitige Einwirkungen im Sinne des Umweltschutzgesetzes anzuwenden. Die früheren Empfehlungen der Arbeitsgruppe von 1990 und 1993 werden zurückgezogen.

Beobachtete oder vermutete biologische Wirkungen bei Immissionen unterhalb der empfohlenen Kurzzeit-Immissionsgrenzwerte (epidemiologische Untersuchungen über Krebsrisiken; Beeinflussung des Melatoninhaushalts; Elektrosensitivität) werden vorgestellt und bewertet. Gestützt auf diese Hinweise empfiehlt die Arbeitsgruppe eine Politik der vorsorglichen Vermeidung und Verminderung von Langzeit-Expositionen. In einem Anhang findet sich die neue ICNIRP-Richtlinie auszugsweise in deutscher Übersetzung.

Limitation des immissions du rayonnement non ionisant. Gamme de fréquences de 0 Hz à 300 GHz: en 1998, la Commission internationale pour la protection contre le rayonnement non ionisant (ICNIRP) a remis à jour sa directive sur la limitation des immissions de champs alternatifs électriques, magnétiques et électromagnétiques. Le groupe de travail créé par l'OFEFP et intitulé «Rayonnement non ionisant» explique et commente cette directive. Il conseille d'utiliser les valeurs de référence de la directive au titre de valeurs limites d'immissions pour des atteintes de courte durée au sens de la loi sur la protection de l'environnement. Les précédentes recommandations du groupe de travail datant de 1990 et de 1993 sont annulées.

Les effets biologiques observés ou présumés en cas d'immissions situées au-dessous des valeurs limites d'immissions recommandées pour les courtes durées (enquêtes épidémiologiques sur les risques de cancer; influence sur le taux de production de la mélatonine; électrosensibilité) sont présentés et évalués. En se fondant sur ces indications, le groupe de travail recommande de mener une politique de prévention et de limitation des expositions de longue durée. Une annexe présente des extraits de la nouvelle directive ICNIRP, en version allemande.

Limitazione delle immissioni di radiazioni non ionizzanti. Gamma di frequenze da 0 Hz a 300 GHz: nel 1998 la Commissione internazionale per la protezione contro le radiazioni non ionizzanti (ICNIRP) ha aggiornato la propria direttiva in merito alla limitazione delle immissioni di campi alternati elettrici, magnetici ed elettromagnetici. Il gruppo di lavoro „radiazioni non ionizzanti“ istituito dall'UFAFP spiega e commenta questa direttiva. Esso raccomanda di applicare i valori di riferimento come valori limite di immissione per azioni di breve durata ai sensi della legge sulla protezione dell'ambiente. Le raccomandazioni precedenti del gruppo di lavoro risalenti al 1990 e al 1993 vengono ritirate.

Gli effetti biologici osservati o sospettati in caso di immissioni inferiori ai valori di immissione di breve durata raccomandati (ricerche epidemiologiche sui rischi di tumore; ripercussioni sulla concentrazione di melatonina; elettrosensibilità) vengono presentati e valutati. Sulla base di queste indicazioni, il gruppo di lavoro raccomanda una politica volta ad evitare e a ridurre a titolo preventivo le esposizioni di lunga durata. La nuova direttiva dell'ICNIRP, parzialmente tradotta in tedesco, figura tra gli allegati.

Limiting exposure to non-ionizing radiation. Frequency range from 0 Hz to 300 GHz: In 1998 the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) has updated its guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields. The working group "Non-ionizing radiation" which has been mandated by the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape explains and comments these guidelines. It recommends to apply the reference values of these guidelines as exposure limit values for short term exposure in the frame of the Law on environmental protection. The former recommendations of the working group dating from 1990 and 1993 are withdrawn.

Biological effects which have been observed or which are suspected at exposure levels below the recommended short term exposure limit values (i.e. epidemiological studies with respect to cancer risks; influence on melatonin levels; electromagnetic hypersensitivity) are presented and assessed. Based on these indications the working group recommends a policy of prudent avoidance and reduction of long term exposure. Selected parts of the new ICNIRP guidelines have been translated into German and can be found in an annex.

Vorwort

Nichtionisierende Strahlung (NIS) ist in der heutigen Umwelt allgegenwärtig. Sie wird beispielsweise von elektrischen Leitungen, elektrischen Bahnen, elektrischen Geräten, Sendeanlagen, Mobiltelefonen und Radaranlagen erzeugt und kann bei genügend hoher Intensität Menschen gefährden oder belästigen. Im Umweltschutzgesetz ist NIS als Einwirkung aufgeführt, welche ein für die Umwelt schädliches oder lästiges Ausmass nicht überschreiten darf.

Im vorliegenden Bericht gibt die vom BUWAL eingesetzte medizinische Expertengruppe "Nichtionisierende Strahlung" eine aktualisierte Empfehlung für die Begrenzung der Immissionen von nichtionisierender Strahlung ab. Diese Empfehlung stellt eine wichtige Grundlage für die Verordnung des Bundesrates zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NIS-Verordnung) dar.

Ich danke der Expertengruppe für ihre kompetente Arbeit und ihr Engagement für eine gesunde Umwelt.

Gerhard Leutert

Chef der Abteilung Luftreinhalteung

Zusammenfassung

Die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) hat im April 1998 eine überarbeitete Richtlinie über den Schutz des Menschen vor elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz publiziert. Neu an dieser Richtlinie ist im wesentlichen, dass der Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz nun vollständig abgedeckt ist, und dass eine transparente Unterscheidung zwischen sogenannten Basisgrenzwerten und abgeleiteten Referenzwerten vorgenommen wurde. Basisgrenzwerte beziehen sich auf die eigentliche Wirkgrösse im Körper, Referenzwerte beziehen sich auf physikalische Grössen des elektromagnetischen Feldes, welche im praktischen Anwendungsfall einer Messung zugänglich sind.

Die früheren Richtlinien von ICNIRP und deren Vorgängerorganisation IRPA/INIRC werden auf Empfehlung der medizinischen Arbeitsgruppe "Nichtionisierende Strahlung" (Arbeitsgruppe NIS), welche das BUWAL in Fragen der biologischen Wirkungen nichtionisierender Strahlung berät, in der Schweiz seit einigen Jahren angewendet. Diese Arbeitsgruppe hat nun die neue ICNIRP-Richtlinie analysiert und legt mit dem vorliegenden Bericht ihre Beurteilung vor. Der Arbeitsgruppe gehören Wissenschaftler von Hochschulen, der Bundesverwaltung und der SUVA an.

Die Arbeitsgruppe erachtet die neue ICNIRP-Richtlinie als gute Grundlage für den Schutz von Personen gegen gesicherte, gefährdende Wirkungen elektromagnetischer Felder. **Sie empfiehlt, die in der Richtlinie enthaltenen Referenzwerte für die Bevölkerung als Immissionsgrenzwerte für kurzzeitige Einwirkungen im Sinne des Umweltschutzgesetzes anzuwenden.** Es handelt sich um Grenzwerte für die elektrische und magnetische Feldstärke, die magnetische Flussdichte, die Leistungsdichte, den Körperableitstrom sowie den Berührungsstrom beim Kontakt mit leitfähigen Objekten. Sind diese eingehalten, dann ist bei kurzfristiger Exposition nicht mit Gefährdungen von Personen zu rechnen.

Die Arbeitsgruppe hat neben der ICNIRP-Richtlinie auch mehrere Untersuchungsberichte bewertet, in welchen über biologische Wirkungen bei Intensitäten unterhalb der empfohlenen Immissionsgrenzwerte berichtet wird. Des weiteren hat sie sich mit der Frage befasst, welcher Stellenwert individuellen Erfahrungen "elektrosensibler Personen" sowie den Ergebnissen epidemiologischer Studien zukommt. Sie ist zum Schluss gekommen, dass sich negative Auswirkungen auf die Gesundheit oder das Wohlbefinden von Personen bei langdauernder Exposition nicht mit Sicherheit ausschliessen lassen, selbst wenn die empfohlenen Immissionsgrenzwerte zu jeder Zeit eingehalten sind. Diese Einschätzung basiert nicht auf gesicherten Wirkungen, sondern lediglich auf vorläufigen Hinweisen oder statistischen Zusammenhängen. Die Arbeitsgruppe erachtet es deshalb beim heutigen Stand des Wissens als nicht mög-

lich, niedrigere Grenzwerte für langdauernde Exposition festzulegen. Diese unbefriedigende Situation gibt den Stand der Wirkungsforschung wieder und wird sich erst mit fortschreitender Entwicklung der Kenntnisse verbessern.

Angesichts der nicht abschliessend geklärten Risiken bei langdauernder Exposition **empfiehlt die Arbeitsgruppe eine Politik der vorsorglichen Vermeidung und Verminderung** von Expositionen, soweit dies technisch und betrieblich möglich, wirtschaftlich tragbar und ökologisch verträglich ist, auch im Bereich unterhalb der empfohlenen Immissionsgrenzwerte. Priorität haben diejenigen Situationen, wo Personen über längere Zeit exponiert sind.

Die Arbeitsgruppe zieht ihre früheren Empfehlungen zurück, soweit sie im Widerspruch zur neuen ICNIRP-Richtlinie stehen. Es handelt sich insbesondere um die Grenzwerte für die magnetische Feldstärke im Frequenzbereich zwischen ca. 1 kHz und 10 MHz und um die Anleitung für die kombinierte Beurteilung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder.

In Anhang 3 ist die neue ICNIRP-Richtlinie auszugsweise in deutscher Übersetzung wiedergegeben.

1. Einleitung

Elektromagnetische Felder, auch als nichtionisierende Strahlung oder in der Umgangssprache als "Elektrosmog" bezeichnet, sind in unserer heutigen Lebensumwelt allgegenwärtig. Es ist seit längerem bekannt, dass diese Felder bei genügender Intensität Körpergewebe schädigen und biologische Abläufe beeinflussen können. Im Umweltschutzgesetz von 1983 wurden deshalb elektromagnetische Felder (dort als "Strahlen" bezeichnet) in die Liste der Umwelteinwirkungen aufgenommen. Diese Einwirkungen sind so zu begrenzen, dass Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume nicht gefährdet und die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich gestört wird.

Für die Beurteilung des Gefährdungs- oder Belästigungspotentials dienen Immissionsgrenzwerte. Diese sind laut Umweltschutzgesetz aufgrund der wissenschaftlichen Kenntnisse über die biologischen Wirkungen oder aufgrund der Erfahrung festzulegen. Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) als Umweltfachstelle des Bundes befasst sich seit mehreren Jahren mit dieser Thematik. Seit 1989 berät eine medizinische Arbeitsgruppe "Nichtionisierende Strahlung" (Arbeitsgruppe NIS), welcher Wissenschaftler von Hochschulen, der Bundesverwaltung und der SUVA angehören, das BUWAL in Fragen der biologischen Wirkungen nichtionisierender Strahlung. Diese Arbeitsgruppe hat 1990 und 1993 zwei Berichte publiziert (BUWAL 1990 und 1993), in denen sie den damals aktuellen Kenntnisstand über die biologischen Wirkungen zusammengefasst und bewertet sowie Immissionsgrenzwerte und weitere Schutzmassnahmen empfohlen hat. Als Vorlage für die empfohlenen Grenzwerte dienten zwei Richtlinien des Internationalen Strahlenschutzverbandes IRPA (IRPA 1988 und 1990).

In der Zwischenzeit ist die Erforschung der biologischen Wirkungen elektromagnetischer Felder weitergegangen. IRPA hat eine eigenständige Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) gegründet, welche die beiden genannten Richtlinien von 1988 und 1990 total überarbeitet hat. Einige Staaten haben nationale Regelungen getroffen, und die europäische Normungsorganisation CENELEC hat ebenfalls Grenzwerte erarbeitet.

Die Arbeitsgruppe NIS hat diese Entwicklungen verfolgt und legt mit dem vorliegenden Bericht eine aktualisierte Bewertung der gesundheitlichen Risiken elektromagnetischer Felder und eine Empfehlung im Hinblick auf die in Vorbereitung befindliche Verordnung des Bundesrates zum Schutz der Bevölkerung vor nichtionisierender Strahlung vor.

Dieser Bericht ersetzt die Empfehlungen in den beiden alten Berichten (BUWAL 1990, Kapitel 6 und BUWAL 1993, Kapitel 11 und 12). Die übrigen Kapitel in jenen

Berichten sind hingegen nach wie vor gültig und werden im vorliegenden Bericht nicht wiederholt. Nach Auffassung der Arbeitsgruppe gibt es seit der Publikation dieser Berichte keine Forschungsergebnisse, die wesentlich über das bereits 1993 Bekannte hinausgehen.

2. Die neue ICNIRP-Richtlinie 1998

2.1 Kurzporträt der ICNIRP

Im Jahr 1992 wurde die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) gegründet. Diese Kommission übernahm die Tätigkeiten im Bereich des Schutzes vor nichtionisierender Strahlung, welche vorher durch den Internationalen Strahlenschutzverband IRPA wahrgenommen worden waren.

Die ICNIRP ist eine unabhängige, wissenschaftliche Organisation. Gemäss den Statuten sind ihre wichtigsten Ziele:

- Förderung des Schutzes vor nichtionisierender Strahlung zum Wohl von Mensch und Umwelt.
- Die Erarbeitung internationaler Richtlinien für Grenzwerte und Schutzmassnahmen, die unabhängig von Interessenvertretungen und wissenschaftlich fundiert sind.
- Die Erstellung von Grundlagen für nationale und internationale Strahlenschutzprogramme.

Die ICNIRP wird von der Weltgesundheits- und der internationalen Arbeitsorganisation als die offizielle Körperschaft im Bereich nichtionisierender Strahlung anerkannt und arbeitet eng mit anderen internationalen Organisationen zusammen.

Richtlinien der ICNIRP entstehen in einem langen Prozess, in dem alle wesentlichen Expertenmeinungen weltweit einfließen. Sie geben den wissenschaftlichen Konsens zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder. Sie haben zwar keinen rechtsverbindlichen Charakter, stellen jedoch eine wichtige Grundlage für nationale und internationale Regelungen dar.

In den Jahren 1988 und 1990 legte IRPA zwei Richtlinien zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung vor: Die erste behandelte den Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz (IRPA 1988), die zweite die Netzfrequenz 50 Hz (bzw. 60 Hz in den USA) (IRPA 1990). Beide Richtlinien bildeten die Grundlage für die Empfehlungen der Arbeitsgruppe NIS (BUWAL 1990 und 1993) des BUWAL.

In der Zwischenzeit hat die neu gegründete ICNIRP die beiden alten IRPA-Richtlinien vollständig überarbeitet. Es ist jetzt der ganze Frequenzbereich von statischen Feldern bis zu einer Frequenz von 300 GHz lückenlos abgedeckt, was vorher nicht der Fall war. Die Richtlinie enthält eine ausführliche Begründung sowie Empfehlungen für den Schutz am Arbeitsplatz und für die übrige Bevölkerung.

2.2 Kurzfassung der neuen ICNIRP-Richtlinie 1998

Die ICNIRP hat im April 1998 eine überarbeitete Richtlinie mit dem Titel "Richtlinie über die Begrenzung der Immissionen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Wechselfelder (bis 300 GHz)" veröffentlicht (ICNIRP 1998). Im Anhang 3 ist diese Richtlinie auszugsweise in deutscher Übersetzung wiedergegeben. Für die detaillierten Begründungen konsultiere man die Richtlinie selbst.

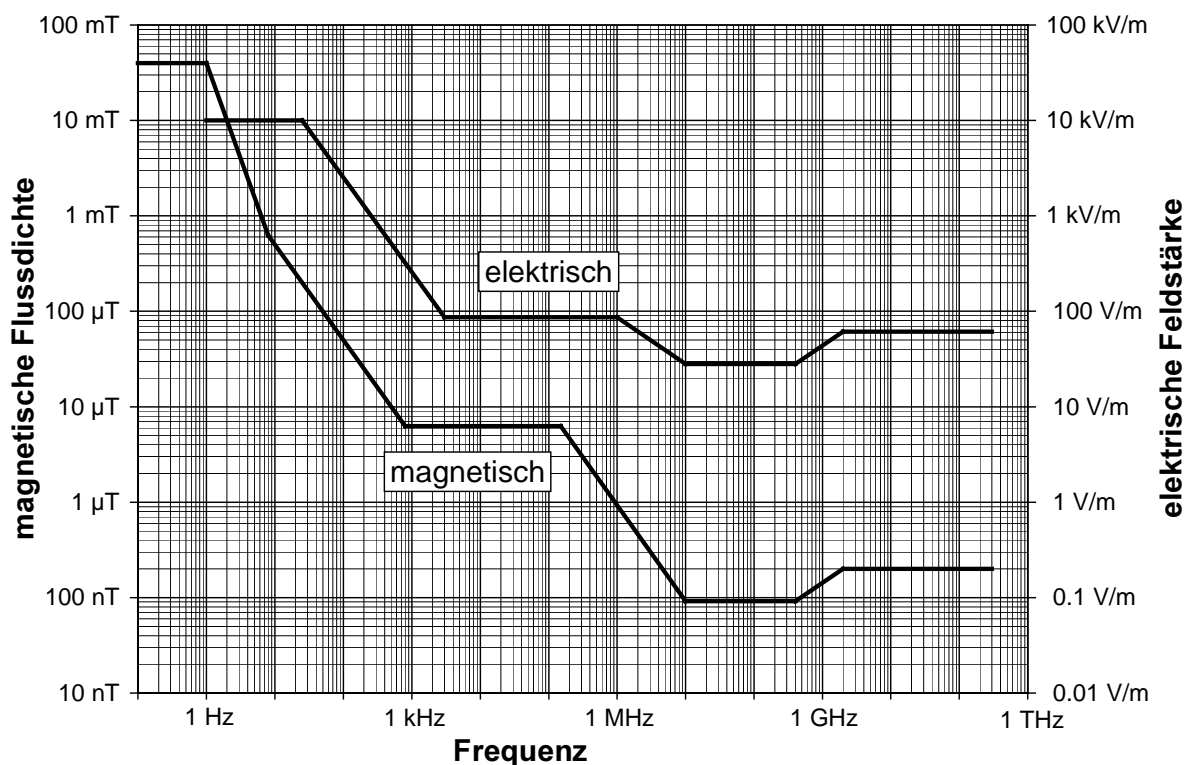
Ziel der Richtlinie ist der Schutz von Personen vor wissenschaftlich gesicherten Gefährdungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder. Zu diesem Zweck werden Grenzwerte angegeben, die nicht überschritten werden sollen.

Die ICNIRP verwendet zwei unterschiedliche Typen von Grenzwerten:

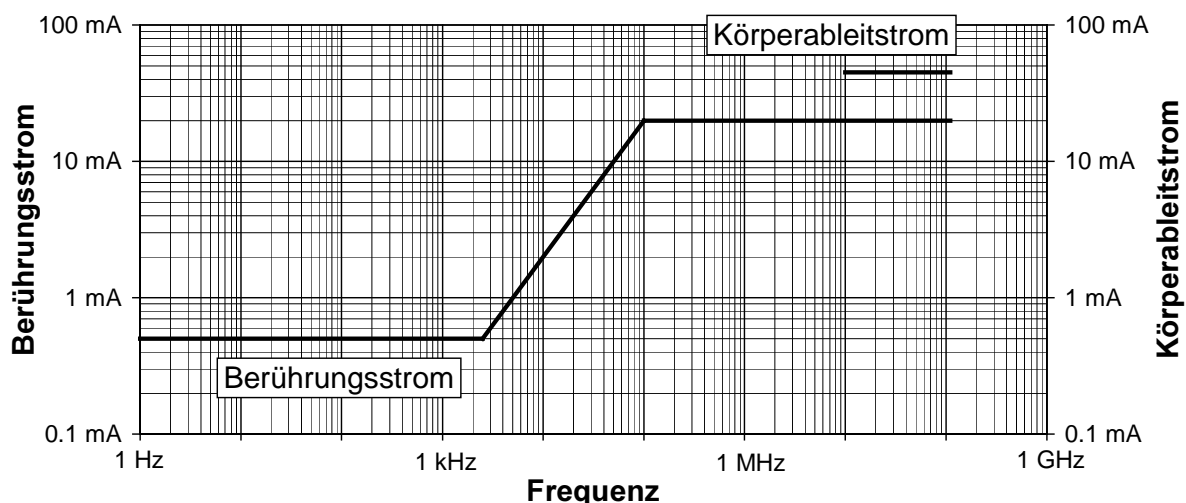
- **Basisgrenzwerte** begrenzen die eigentliche Wirkgrösse. Es handelt sich um die im Körper induzierte elektrische Stromdichte, um die spezifische Absorptionsrate (SAR) und bei Frequenzen oberhalb von 10 GHz um die Strahlungsleistungsdichte. Diese Basisgrössen sind, mit Ausnahme der Strahlungsleistungsdichte, in der Praxis nicht messbar.
- Für die Anwendung in der Praxis gibt die ICNIRP sog. **Referenzwerte** für physikalische Grössen an, die einer Messung leichter zugänglich sind. Sind diese eingehalten, dann sind auch die Basisgrenzwerte eingehalten. Die Richtlinie enthält Referenzwerte für die elektrische und magnetische Feldstärke, die magnetische Flussdichte und die Strahlungsleistungsdichte für den Fall, dass die Immissionen über die Dimension des menschlichen Körpers homogen sind. Zusätzlich befindet sich in der Richtlinie ein Referenzwert für den Körperableitstrom¹ und den Berührungstrom. Der letztere ist für die Beurteilung von Gefährdungen und Belästigungen durch Schocks und Verbrennungen bei der Berührung eines leitfähigen Objekts in einem elektrischen Feld anzuwenden.

Basisgrenzwerte und Referenzwerte sind für Expositionen am Arbeitsplatz höher als für die Bevölkerung. Beide sind zumindest teilweise abhängig von der Frequenz. Die Referenzwerte für die Bevölkerung sind in den Figuren 1 und 2 wiedergegeben. Sie gelten für Immissionen, bei denen Felder nur einer einzigen Frequenz vorhanden sind. Beim Vorliegen mehrerer Frequenzen sind die einzelnen Beiträge mit dem jeweiligen Grenzwert zu gewichten und zu summieren.

¹ Nach dem Wortlaut der Richtlinie: in Gliedmassen induzierter Strom



Figur 1: Referenzwerte gemäss ICNIRP (1998) für die Bevölkerung: elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte. Die Referenzwerte sind anwendbar bei der Exposition des ganzen menschlichen Körpers in einem homogenen Feld.



Figur 2: Referenzwerte gemäss ICNIRP (1998) für die Bevölkerung: Körperableitstrom durch ein Bein sowie Berührungsstrom beim Kontakt mit leitfähigen Objekten.

2.3 Beurteilung durch die Arbeitsgruppe NIS

Die Arbeitsgruppe ist der Ansicht, dass die neue internationale Richtlinie der ICNIRP eine gute Grundlage für den Schutz von Personen vor nichtionisierender Strahlung darstellt. Sie sieht allerdings gewisse Grenzen, die bei der Anwendung der Richtlinie zu beachten sind.

2.3.1 Schutzziel

Die ICNIRP-Richtlinie hat zum Zweck, Personen vor den bekannten schädlichen Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder zu schützen. Wirkungen werden als schädlich betrachtet, wenn die Gesundheit exponierter Personen oder ihrer Nachkommen feststellbar beeinträchtigt wird.

In der Richtlinie wird zwischen Expositionen am Arbeitsplatz und der Exposition der übrigen Bevölkerung unterschieden, wobei für die Bevölkerung ein höheres Schutzniveau (niedrigere Grenzwerte) vorgegeben wird.

Nicht berücksichtigt sind Expositionen von Patienten bei medizinischen Diagnose- und Therapieverfahren, bei welchen elektromagnetische Felder zum Einsatz kommen.

Ebenfalls nicht berücksichtigt sind Wechselwirkungen zwischen elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern und medizinischen Implantaten sowie elektronischen Lebenshilfen (z.B. metallische Prothesen, Herzschrittmacher, Defibrillatoren und Cochlea-Implantate). Es wird deshalb in der Richtlinie darauf hingewiesen, dass Beeinflussungen solcher medizintechnischer Hilfsmittel auch bei Einhaltung der vorgeschlagenen Grenzwerte auftreten können.

Beurteilung:

Gemäss USG ist nicht nur der Mensch zu schützen, sondern die ganze belebte Umwelt. Die Arbeitsgruppe ist sich bewusst, dass die Datenlage über biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Pflanzen und Tiere (mit Ausnahme weniger Arten, die für Tierversuche verwendet werden), äusserst spärlich ist. Sie erachtet es daher zum heutigen Zeitpunkt als richtig, den Schutz des Menschen in den Vordergrund zu stellen.

Die Arbeitsgruppe erachtet es als sachgemäss, die Beeinflussung von Implantaten und elektronischen Lebenshilfen nicht mit Hilfe von Immissionsgrenzwerten zu regeln. Es handelt sich dabei um ein technisches Problem, das im Rahmen der elektromagnetischen Verträglichkeit von Geräten gelöst werden muss. Zusätzlich sieht sie eine wichtige Verantwortung für Hersteller dieser Geräte, die Ärzteschaft und die

Betreiber von felderzeugenden Anlagen, die Patienten über mögliche Risikosituationen zu informieren.

Die Arbeitsgruppe erachtet es als richtig, die Exposition von Patienten bei Diagnose und Therapie auszuklammern. Es ist die Aufgabe des behandelnden Arztes, den erwarteten Nutzen gegen allfällige Risiken abzuwägen.

2.3.2 Zugrundeliegende Datenbasis

Die ICNIRP hat eine umfangreiche Sichtung und Bewertung der wissenschaftlichen Literatur über die biologischen Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder vorgenommen. Als Basis für die Festsetzung der Grenzwerte wurden nur solche biologischen Wirkungen zugelassen, die wissenschaftlich erhärtet sind und die ein Gesundheitsrisiko darstellen. Als Konsequenz dieser Auswahlkriterien enthält die resultierende Datenbasis ausschliesslich Kurzzeit-Wirkungen. Es handelt sich um die Erregung von Nerven- und Muskelzellen, um die Erwärmung von Körpergewebe mit vielfältigen Folgen für verschiedene Körperfunktionen sowie um Schocks und Verbrennungen bei der Berührung leitfähiger Gegenstände in einem elektrischen Feld.

Die Hinweise aus epidemiologischen Studien auf erhöhte Krebsrisiken bei langdauernder Exposition in schwachen 50 oder 60 Hz-Magnetfeldern sowie Laboruntersuchungen an Zellkulturen wurden zwar auch evaluiert, aber nicht als genügend tragfähig erachtet, um daraus Grenzwerte abzuleiten.

Beurteilung

Gemäss Artikel 13 und 14 USG sind Immissionsgrenzwerte nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung festzulegen. Dabei sind auch besonders empfindliche Personengruppen zu berücksichtigen. Immissionen unter den Immissionsgrenzwerten dürfen

- a) Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume nicht gefährden²
- b) die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören.

Die ICNIRP hat sich auf die wissenschaftlich erhärteten Kenntnisse beschränkt. Diese stellen eine Auswahl aus allen wissenschaftlichen Beobachtungen dar. Es handelt sich ausschliesslich um akute Wirkungen mit erwiesenem Gefährdungscharakter.

² Wie bereits unter 2.3.1 ausgeführt, hat im Bereich der nichtionisierenden Strahlung der Schutz des Menschen Priorität.

Die ICNIRP-Grenzwerte sind deshalb wissenschaftlich begründete Kurzzeit-Gefährdungsgrenzwerte. Werden sie eingehalten, dann besteht bei kurzfristiger Exposition kein akutes Gefährdungsrisiko.

Negative gesundheitliche Wirkungen oder Belästigungen lassen sich bei lange dauernder Exposition nicht mit Sicherheit ausschliessen, selbst wenn die Grenzwerte zu jeder Zeit eingehalten sind. Der Sicherheitsfaktor von 50, den die ICNIRP bei der Ableitung der Grenzwerte eingebaut hat, berücksichtigt zwar unterschiedliche Empfindlichkeiten in der Bevölkerung sowie Unsicherheiten in der Dosimetrie, nicht jedoch mögliche unterschiedliche Expositionszeiten.

Die Arbeitsgruppe ist der Ansicht, dass sich niedrigere Immissionsgrenzwerte für langdauernde Exposition beim heutigen Stand des Wissens nicht festlegen lassen. Die den Grenzwerten zugrundeliegenden Ergebnisse und Modelle sind akuter Natur. Eine Extrapolation auf potentielle chronische Wirkungen, für welche unter Umständen andere Wirkungsmechanismen verantwortlich sind, wäre daher nicht statthaft. Diese Auffassung wird offenbar auch von der ICNIRP geteilt: Wurde noch in der alten 50/60 Hz-Richtlinie (IRPA 1990) zwischen verschiedenen Expositionszeiten (wenige Minuten pro Tag; wenige Stunden pro Tag; kontinuierlich) durch unterschiedlich hohe Grenzwerte unterschieden, so entfällt diese Unterscheidung in der neuen Richtlinie vollständig.

Gemäss USG soll neben dem Stand der Wissenschaft auch die Erfahrung über die Wirkungen elektromagnetischer Felder bei der Grenzwertsetzung berücksichtigt werden. Als Erfahrungen in diesem Kontext sind insbesondere die subjektiven Erfahrungen von Personen von Interesse, welche sich in besonderem Masse als elektrosensibel betrachten. Solche Beeinträchtigungen sollen angeblich bei Immissionen auftreten, welche um Grössenordnungen unter den nach wissenschaftlichen Kriterien festgelegten Kurzzeit-Grenzwerten liegen. Dieses Erfahrungswissen ist allerdings zur Zeit nicht systematisch erfasst. Die Arbeitsgruppe sieht hier eine Aufgabe für die Forschung, das Phänomen Elektrosensibilität mit wissenschaftlichen Methoden zu untersuchen. Sie ist mit der ICNIRP der Ansicht, dass es heute nicht möglich ist, subjektiv erfahrene Symptome im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern als Grundlage für Immissionsgrenzwerte zu verwenden.

2.3.3 Basisgrenzwerte und Referenzwerte

Mit einem Basisgrenzwert werden diejenigen Wirkgrössen begrenzt, welche beim Menschen direkt biologische Wirkungen auslösen. Es sind dies, je nach Frequenzbereich, die Stromdichte im Körper, die spezifische Absorptionsrate SAR (gemittelt über den ganzen Körper sowie lokal) und die Strahlungsleistungsdichte (für Effekte auf der Körperoberfläche). Mit Ausnahme der Strahlungsleistungsdichte sind diese Basisgrössen allerdings nicht direkt messbar.

Aus den Basisgrenzwerten hat die ICNIRP deshalb Referenzwerte für messbare Feldgrößen abgeleitet. Es handelt sich um die elektrische und magnetische Feldstärke, die magnetische Flussdichte und die Strahlungsleistungsdichte. Dieser Ableitung liegt die Annahme zugrunde, dass der ganze menschliche Körper einem homogenen elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feld ausgesetzt ist. Zur Vermeidung einer unzulässigen lokalen Erwärmung des Knöchels gibt die ICNIRP für den Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 110 MHz neu auch einen Referenzwert für den induzierten elektrischen Strom in den Beinen (Körperableitstrom) an. Zur Vermeidung von elektrischen Schocks und Verbrennungen bei der Berührung leitfähiger Gegenstände im elektrischen Feld findet sich in der Richtlinie ein Referenzwert für den Berührungsstrom.

Beurteilung

Die Arbeitsgruppe begrüsst die Festlegung von Basis- und Referenzwerten. Dieser Ansatz ist in der neuen Richtlinie konsequent und transparent durchgeführt und stellt eine Verbesserung gegenüber den alten Richtlinien dar.

Als Beurteilungsgrößen für die Praxis stehen die elektrische und magnetische Feldstärke, die magnetische Flussdichte sowie die Strahlungsleistungsdichte im Vordergrund des Interesses. Die Referenzwerte für die elektrische und magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte sowie die Strahlungsleistungsdichte (bei Frequenzen unterhalb von 10 GHz) sind allerdings nur anwendbar, wenn es sich um Immissionen handelt, welche über die Dimension des menschlichen Körpers einigermaßen homogen sind. Für sehr lokale oder inhomogene Immissionen, wie beispielsweise in unmittelbarer Nähe eines Mobiltelefons oder eines Haarföns, dürfen die Referenzwerte nicht verwendet werden. Für eine Beurteilung der Immissionen muss in diesem Fall auf die Basisgrenzwerte zurückgegriffen werden. Eine solche Beurteilung wird vorderhand nicht in breitem Ausmass erfolgen können, da hierzu Simulationsprogramme oder Labor-Messeinrichtungen notwendig sind.

Im Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 110 MHz sollte zusätzlich zur elektrischen und magnetischen Feldstärke auch der Körperableitstrom beurteilt werden. In diesem Frequenzbereich kann der Referenzwert für den Körperableitstrom je nach der konkreten Situation das strengere Kriterium darstellen als derjenige für die elektrische oder magnetische Feldstärke.

2.3.4 Referenzwerte für die elektrische und magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte

Für die elektrische Feldstärke ist der Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 300 GHz nun lückenlos abgedeckt. In denjenigen Frequenzbereichen, welche bereits Gegenstand der alten IRPA-Richtlinien (IRPA 1988 und 1990) und der Empfehlungen der

Arbeitsgruppe NIS (BUWAL 1990 und 1993) waren, haben die Referenzwerte für die elektrische Feldstärke keine Änderung erfahren.

Für die magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte liegt jetzt eine durchgehende Grenzwertkurve von 0 Hz bis 300 GHz vor. Der Grenzwert für statische Magnetfelder (0 Hz) wurde aus einer bereits früher publizierten ICNIRP-Richtlinie (ICNIRP 1994) übernommen. Im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 10 MHz hat die ICNIRP die Referenzwerte gegenüber der alten IRPA-Richtlinie (IRPA 1988) angehoben (um ungefähr das Siebenfache bei 100 kHz). Dies wird mit einer Inkonsistenz im dosimetrischen Konzept der alten IRPA-Richtlinie begründet: Der Grenzwertverlauf für die magnetische Feldstärke war seinerzeit proportional zu demjenigen für die elektrische Feldstärke gewählt worden. Für die Begrenzung der elektrischen Feldstärke in diesem Frequenzbereich war (und ist auch in der neuen Richtlinie) die Vermeidung von elektrischen Schocks und Verbrennungen bei der Berührung leitfähiger Gegenstände massgeblich. Dieser Effekt tritt jedoch in einem Magnetfeld nicht auf. Bei der Ableitung der Referenzwerte für die magnetische Feldstärke geht die ICNIRP jetzt konsequent von der spezifischen Absorptionsrate und der induzierten Körperstromdichte aus. Damit ergibt sich eine andere Frequenzabhängigkeit als für die elektrische Feldstärke.

Beurteilung

Die Arbeitsgruppe erachtet die von der ICNIRP vorgenommene Korrektur der Referenzwerte für die magnetische Feldstärke und Flussdichte im Rahmen der verwendeten Wirkmodelle und dosimetrischen Konzepte als folgerichtig. Als Konsequenz sollte der von ihr seinerzeit empfohlene Grenzwertverlauf zwischen ca. 1 kHz und 10 MHz (BUWAL 1990 und 1993) an die neue ICNIRP-Richtlinie angepasst werden. An den Referenzwerten unterhalb von 1 kHz und oberhalb von 10 MHz ändert sich nichts.

Der Erweiterung des Frequenzbereichs nach unten kann die Arbeitsgruppe ebenfalls zustimmen. Über die Wirkungen statischer Magnetfelder hat sie sich allerdings bisher noch nicht fundiert ins Bild gesetzt, so dass sie keine fachliche Beurteilung abgeben kann. Sie erachtet es als eher unwahrscheinlich, dass im Umweltbereich ein Bedarf für einen Grenzwert für das statische Magnetfeld gegeben ist. Einerseits sind wir dem statischen Erdmagnetfeld in der Grössenordnung von 50 μT seit jeher permanent ausgesetzt, andererseits gibt es in der zugänglichen Umwelt zur Zeit kaum Quellen, welche wesentlich stärkere statische Magnetfelder erzeugen.

2.3.5 Mittelungsdauer

Für Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 GHz sind die Immissionen während 6 Minuten zu mitteln. Für höhere Frequenzen nimmt die Mittelungsdauer kontinuierlich

bis auf 10 Sekunden bei 300 GHz ab. Zum Frequenzbereich unterhalb 100 kHz fehlt eine Aussage über Mittelungsdauern.

Beurteilung

Die Arbeitsgruppe erachtet die von der ICNIRP festgelegten Mittelungsdauern als sachgemäss. Massgeblich für die Beurteilung von Immissionen ist dasjenige Zeitintervall, während dem die gemittelten Immissionen am höchsten sind.

Die Arbeitsgruppe vermisst in der ICNIRP-Richtlinie eine diesbezügliche Aussage für den Frequenzbereich unter 100 kHz³. In diesem Frequenzbereich ist es die Erregung von Nerven- und Muskelzellen, welche die Höhe der Grenzwerte bestimmt. Dabei reicht im Prinzip eine Halbwelle der Schwingung aus, um den Effekt auszulösen. Es handelt sich somit um einen akuten Effekt, weshalb die Arbeitsgruppe der Ansicht ist, dass bei Frequenzen unter 100 kHz bei der Beurteilung keine zeitliche Mittelung vorgenommen werden sollte. Massgeblich für die Beurteilung ist somit der maximale Effektivwert.⁴

2.3.6 Zusammengesetzte Immissionen

Für Immissionen, die verschiedene Frequenzen gleichzeitig enthalten, schlägt die ICNIRP verschiedene Summierungsvorschriften vor (siehe Anhang 3, Summenformeln (5) bis (11)).

Beim gleichzeitigen Vorliegen eines niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldes sollen hingegen beide Feldstärken unabhängig voneinander beurteilt werden.

Beurteilung

Gemäss Artikel 8 USG sollen Einwirkungen sowohl einzeln als auch gesamthaft und nach ihrem Zusammenwirken beurteilt werden.

Die Arbeitsgruppe erachtet die vorgeschlagenen Summenausdrücke als pragmatische Lösung, um die kombinierte Wirkung mehrerer Frequenzen zu berücksichtigen. Sie sind im Rahmen der verwendeten Wirkungsmodelle folgerichtig.

³ Es findet sich lediglich der Hinweis, dass bei transienten oder sehr kurz gepulsten Feldern die induzierte Stromdichte nicht zeitlich gemittelt werden sollte.

⁴ Für die Praxis erachtet die Arbeitsgruppe auch Messverfahren als zulässig, welche nicht jede Schwingung auflösen, sondern eine gewisse Integrationszeit benötigen. Details werden in einer Messempfehlung auszuführen sein.

Die Arbeitsgruppe stellt fest, dass die ICNIRP eine kombinierte Beurteilung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder nicht für nötig hält. Die ICNIRP argumentiert, für Schutzbelange seien die elektrisch und magnetisch induzierten Ströme nicht als additiv zu betrachten. Für die Arbeitsgruppe besteht jedoch kein Zweifel, dass sich diese beiden Stromkomponenten im Körper überlagern. Dies war auch der Grund dafür, dass die Arbeitsgruppe in ihrem Bericht (BUWAL 1993) eine Summierungsvorschrift empfohlen hat, in welcher sowohl verschiedene Frequenzen wie auch elektrisches und magnetisches Feld kombiniert betrachtet werden. Sie hat dabei den ungünstigsten Fall angenommen, dass sich die Beträge der beiden Stromkomponenten addieren.

Bei detaillierter dosimetrischer Analyse zeigt sich, dass

- die induzierte Stromdichte stark von der betrachteten Stelle im Körper abhängt
- die vom Magnetfeld induzierten Ströme an der Körperperipherie am stärksten sind
- die durch das elektrische Feld erzeugten Ströme an den engsten Stellen, also im Hals und im Knöchelbereich, am stärksten sind
- die beiden Stromkomponenten eine Phasenverschiebung und unterschiedliche Richtung haben können.

Die beiden Stromkomponenten sind somit nicht an der gleichen Körperstelle maximal und ausserdem nicht in Phase. Eine Addition der absoluten Beträge würde somit einen "worst case" simulieren, der realistischerweise nicht zu erwarten ist.

Mit dieser präziseren Begründung kann die Arbeitsgruppe den Vorschlag der ICNIRP akzeptieren, die elektrische und magnetische Feldstärke unabhängig zu beurteilen.

2.3.7 Messunsicherheit

Die ICNIRP macht keine Aussage darüber, wie bei der Beurteilung von Immissionen die Messunsicherheit einzubeziehen ist.

Beurteilung

Die Arbeitsgruppe erachtet eine präzisierende Angabe als notwendig, weil die Messunsicherheit prinzipiell zu Gunsten oder zu Lasten der Exponierten ausgelegt werden kann.

Die ICNIRP hat die verwendeten Sicherheitsfaktoren allein mit biologisch/medizinisch/dosimetrischen Unsicherheiten sowie mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten verschiedener Personen begründet. Es ist somit davon auszugehen, dass die technisch bedingte Messunsicherheit in diesen biologischen Sicherheitsfaktoren nicht enthalten ist.

Die Arbeitsgruppe empfiehlt daher, die Messunsicherheit zugunsten der exponierten Person auszulegen. Dies entspricht der bisherigen Praxis (BUWAL 1992) und bedeutet, dass ein Grenzwert dann eingehalten ist, wenn die Summe von Messwert + Messunsicherheit kleiner als der Grenzwert ist

3. Biologische Wirkungen bei Immissionen unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte

3.1 Vorbemerkungen

Die ICNIRP-Grenzwerte basieren auf einer Auswahl der wissenschaftlichen Ergebnisse über die Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder. Daneben enthält die wissenschaftliche Literatur viele Berichte, die aus verschiedenen Gründen nicht als Basis für Grenzwerte akzeptiert wurden. In Anhang 2 sind diejenigen Publikationen zusammengestellt, welche die Arbeitsgruppe für die Beurteilung zusätzlich beigezogen hat. Es handelt sich um

- statistische Ergebnisse aus epidemiologischen Studien über die Beeinflussung des Krebswachstums beim Menschen
- biologische Wirkungen beim Menschen, im Tier- oder Zellversuch deren gesundheitliche Relevanz nicht gegeben ist oder Ergebnisse, die nur von einer Forschergruppe gefunden wurden
- psychovegetative Symptome, welche unter dem Sammelbegriff "Elektrosensibilität" zusammengefasst werden.

Einige der genannten Wirkungen wurden bei Feldstärken beobachtet, welche um Größenordnungen unter den Grenzwerten der ICNIRP liegen. Die Arbeitsgruppe stimmt mit der ICNIRP überein, dass diese Beobachtungen zur Zeit nicht als Basis für Grenzwerte dienen können. Es handelt sich erst um Hinweise und Verdachtsmomente. Es ist vorab die Aufgabe der Forschung, hier für mehr Klarheit zu sorgen. Die Arbeitsgruppe erachtet es jedoch als ihre Aufgabe, auf diejenigen Befunde besonders hinzuweisen, welche möglicherweise eine Neufassung der heutigen Grenzwerte nötig machen könnten. Nach ihrer Ansicht sind in diesem Zusammenhang die drei nachfolgend beschriebenen Gruppen von Beobachtungen besonders erwähnenswert.

3.2 Epidemiologische Untersuchungen über Krebsrisiken und 50/60 Hz Magnetfelder

In epidemiologischen Untersuchungen versucht man mit statistischen Methoden, Einflussgrößen zu identifizieren, welche mit einem Krankheitsbild im Zusammenhang stehen. Untersucht werden Bevölkerungsgruppen in ihrer realen Lebensumgebung mit allen Einflüssen, denen sie ausgesetzt sind.

Die epidemiologischen Studien im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern haben in erster Linie das Krebsrisiko in Abhängigkeit der Magnetfeldbelastung durch Hochspannungsleitungen oder an Arbeitsplätzen zum Inhalt. Die bis 1992 vorliegenden Ergebnisse wurden im Bericht (BUWAL 1993) ausführlich beschrieben und bewertet. Einige seither abgeschlossene Untersuchungen sind in Anhang A2.1 aufgeführt.

Die Arbeitsgruppe ist der Auffassung, dass sich das Bild auch mit den neuen Ergebnissen nicht wesentlich geändert hat. Aus einigen epidemiologischen Studien ergibt sich ein statistischer Zusammenhang zwischen der Krebshäufigkeit und schwachen niederfrequenten Magnetfeldern. Die Hinweise auf eine leukämiefördernde Wirkung im Kindesalter haben sich tendenziell bestätigt. Die Ergebnisse bei Erwachsenen hingegen deuten wie bereits vorher eher auf die Abwesenheit einer krebsfördernden Wirkung von Magnetfeldern im Wohnbereich hin. Die Untersuchungsmethodik ist zwar aufwendiger und sorgfältiger geworden als in den ersten derartigen Untersuchungen. Trotzdem bleibt die Bestimmung der Exposition der untersuchten Personen durch Magnetfelder nach wie vor recht ungenau.

Ein statistischer Zusammenhang zwischen Magnetfeldern und dem Leukämierisiko beweist noch nicht, dass tatsächlich das Magnetfeld die verantwortliche Einflussgröße ist. Dieser Nachweis kann erst dann als erbracht gelten, wenn in Zell- oder Tierexperimenten auch ein plausibles Wirkungsmodell identifiziert werden konnte. Dies ist bis heute nicht der Fall. Derartige statistische Hinweise haben aber eine wichtige Funktion als Frühwarnsystem der Art: "Vorsicht, hier könnte ein gesundheitliches Problem versteckt sein."

Falls 50/60-Hz Magnetfelder tatsächlich eine leukämiefördernde Wirkung bei Kindern haben sollten, dann liegt die Wirkungsschwelle unter $1 \mu\text{T}$ (je nach Untersuchung bzw. Auswertung im Bereich zwischen 0.1 und $0.3 \mu\text{T}$), wobei diese Schwellen für das Langzeitmittel der magnetischen Flussdichte bestimmt oder geschätzt sind.

Die Arbeitsgruppe ist der Ansicht, dass weitere epidemiologische Untersuchungen zur selben Fragestellung (Krebs durch 50/60 Hz-Magnetfelder) keine weitere Klärung mehr bringen werden. Die Verdachtsmomente liegen auf dem Tisch; jetzt muss in

erster Priorität nach möglichen Wirkungspfaden derartig schwacher Magnetfelder gesucht werden.⁵

3.3 Beeinflussung des Melatoninhaushalts

Ein möglicher Wirkungspfad für schwache elektromagnetische Felder ist die Beeinflussung der Ausschüttung von Melatonin. Melatonin ist ein körpereigenes Hormon der Zirbeldrüse, dessen Konzentration im Blut synchron mit der Tages-/Nacht-rhythmik ändert und das unter bestimmten Bedingungen für Tumorzellen wachstumshemmend wirkt. Der Melatoninhaushalt wird in erster Linie durch das Lichtregime gesteuert. Versuche mit Ratten haben aber ergeben, dass die Ausschüttung von Melatonin auch durch 50 Hz Magnetfelder beeinflusst wird und zwar in Richtung einer verringerten Ausschüttung. In Zellkulturen scheint die wachstumshemmende Wirkung von Melatonin in Gegenwart eines Magnetfeldes aufgehoben zu werden. Die Wirkungsschwelle liegt bei ca. 1 μ T. Einige dieser Untersuchungen sind im Anhang A2.2 aufgeführt.

Die Arbeitsgruppe erachtet diese Ergebnisse als beachtenswert, weil hier ein reproduzierter unterschwelliger Effekt vorliegt, der durch die bisherigen Grenzwertmodelle nicht beschrieben werden kann. Allerdings bestehen noch offene Fragen zur Bedeutung dieses Effekts: So ist nicht genügend geklärt, ob der Melatoninspiegel auch beim Menschen reduziert wird und welche Folgewirkungen dies haben kann. Ausserdem ist zu beachten, dass Melatonin in erster Linie durch die Lichtverhältnisse beeinflusst wird.

3.4 Elektrosensitivität

Als elektrosensibel bezeichnen sich Personen, welche unter meist unspezifischen neurovegetativen Symptomen leiden und diese dem Einfluss schwacher elektrischer, magnetischer oder elektromagnetischer Felder zuschreiben. In medizinischer Terminologie sollte man eher von Elektrosensitivität sprechen, da es sich kaum um eine Sensibilisierung im Sinne einer Allergie handelt. Häufig genannt werden Schlafstörungen, Nervosität, Kopfschmerzen und Müdigkeit. Gemäss Angaben von Betroffe-

⁵ Im Gegensatz zu dieser Einschätzung erachtet die Weltgesundheitsorganisation WHO im Rahmen ihres EMF-Projekts zwei weitere grosse epidemiologische Studien als angezeigt. Laut WHO sollen vorgängig die Untersuchungsmethoden verfeinert und harmonisiert werden.

nen und ihren Beratern liegen die Intensitätsschwellen für solche Wirkungen um bis zu drei Größenordnungen unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte. Als besonders empfindliche Phase gilt der Schlaf. Als Störquellen werden elektrische Leitungen, elektrische Geräte, die elektrische Gebäudeinstallation und Sendeanlagen jeder Art genannt.

Es handelt sich bis heute weitgehend um individuelles Erfahrungswissen, gestützt auf Einzelbeobachtungen, welche nicht systematisch erfasst sind und wissenschaftlichen Untersuchungskriterien selten standhalten. Von besonderem Interesse sind Berichte von elektrosensitiven Personen, deren Beschwerden verschwanden, nachdem die elektrische Installation in ihrer Wohnung verändert und dadurch die Immissionen elektrischer oder magnetischer Felder verringert worden waren.

Neben Fallberichten gibt es auch erste Untersuchungen an grösseren Personengruppen mit statistischer Auswertung. So hat beispielsweise eine Befragung der Bevölkerung in der näheren Umgebung des Kurzwellensenders Schwarzenburg eine Häufung der selbst berichteten Schlafstörungen in Sendernähe ergeben. Dieses Ergebnis bestätigte sich in einem blind durchgeführten Experimentalbetrieb des Senders, welcher ein vom gewohnten Verlauf abweichendes Immissionsmuster erzeugte.

Eine kürzlich abgeschlossene europaweite Umfrage im Auftrag der EU-Kommission (DG V) bei Gesundheitsämtern und Selbsthilfegruppen hat ergeben, dass die Häufigkeit und die Art der von Elektrosensitiven genannten Symptome in verschiedenen Ländern Europas entsprechend landesspezifischen Bedingungen variieren. Neben den bereits erwähnten neurovegetativen Beschwerden sind vor allem in den skandinavischen Ländern Hautprobleme bei Bildschirmarbeit ein Dauerthema, welche von den Betroffenen den elektrischen und magnetischen Feldern des Bildschirms zugeschrieben werden. In mehreren Staaten gibt es bereits Selbsthilfegruppen von "Bildschirm- und Elektroschädigten".

Die genannten Symptome sind aus der Sicht des Gesundheitsschutzes ernst zu nehmen. Sie stellen unabhängig von der tatsächlichen Ursache für die betroffenen Personen eine signifikante Einschränkung der Lebensqualität dar und können, wenn sie chronisch vorhanden sind, zu Erkrankungen führen. Bisher nicht geklärt ist allerdings, durch welche Einflussfaktoren sie zustande kommen. Während die Betroffenen überzeugt sind, dass eine felderzeugende Quelle die Ursache für ihre Beschwerden darstellt, ist dieser Nachweis wissenschaftlich bisher nicht erbracht. Vorherhand muss man davon ausgehen, dass sowohl direkte biophysikalische Mechanismen wie auch andere Faktoren zum Zustandekommen dieser Beschwerden und der begleitenden Überzeugungshaltung beitragen können. Dies war auch eine der Schlussfolgerungen der genannten Untersuchung beim Kurzwellensender Schwarzenburg.

Die Arbeitsgruppe erachtet die wissenschaftliche Erforschung des Phänomens Elektrosensitivität als wichtig und dringend. Im Gefolge von selbsternannten Experten, die Panik verbreiten, und durch pauschalisierende Berichterstattung in den Medien wird die Bevölkerung zunehmend verunsichert und neigt zur Überzeugung, dass elektromagnetische Felder jeder Art a priori schädlich seien. Die Erfahrungen elektrosensitiver Personen konnten bei der Grenzwertsetzung bisher nicht einfließen, weil die Anforderungen, welche die Arbeitsgruppe bereits bei anderer Gelegenheit formuliert hat, nicht erfüllt sind⁶. Dies hat dazu geführt, dass diese wissenschaftlich begründeten Grenzwerte von besorgten Bürgern als unvollständig oder gar untauglich betrachtet werden. Eine rationale Auseinandersetzung ist nötig, kann aber erst stattfinden, wenn das Thema auch von wissenschaftlicher Seite ernst genommen und untersucht wird.

Untersuchungen sollten der Frage nachgehen, ob sich subjektiv erfahrene Beschwerden objektivieren lassen und ob sie auch unter kontrollierten Expositionsbedingungen überzufällig auftreten. Zeigt sich, dass schwache elektromagnetische Felder kausal eine Rolle bei der Entstehung der genannten Symptome spielen, dann müssen die bisher verwendeten Grenzwertmodelle ersetzt werden.

3.5 Nachbemerkung

Eine Übertragung der individuellen Beobachtungen über die fallspezifischen Expositionsbedingungen hinaus, beispielsweise auf andere Frequenzbereiche, andere Intensitäten oder andere Modulationsarten, ist nicht möglich, solange kein Wirkungsmodell vorliegt.

⁶ Siehe die früheren Berichte der Arbeitsgruppe: BUWAL (1990) und BUWAL (1993)

4. Empfehlung der Arbeitsgruppe NIS für den Schutz der Bevölkerung vor nichtionisierender Strahlung

4.1 Immissionsgrenzwerte

- Die Arbeitsgruppe empfiehlt, in der Schweiz die neue ICNIRP-Richtlinie 1998 zusammen mit den in Abschnitt 2.3 aufgeführten Präzisierungen als Grundlage für den Schutz der Bevölkerung vor nichtionisierender Strahlung zu verwenden. Bei Einhaltung der ICNIRP-Grenzwerte kann eine akute Gefährdung von Personen bei kurzfristiger Exposition ausgeschlossen werden. Niedrigere Grenzwerte für langdauernde Exposition lassen sich beim heutigen Kenntnisstand nicht angeben.
- Die Arbeitsgruppe zieht ihre seinerzeitigen Empfehlungen (BUWAL 1990, Kapitel 6 und BUWAL 1993, Kapitel 11 und 12) hiermit zurück, soweit diese im Widerspruch zur neuen ICNIRP-Richtlinie stehen.
- Für die Beurteilung von Immissionen, die über den menschlichen Körper homogen verteilt sind, dienen die Referenzwerte der ICNIRP für die elektrische und magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte und die Strahlungsleistungsdichte gemäss Tabelle 7 in Anhang 3. Diese Referenzwerte haben die Bedeutung von Immissionsgrenzwerten gemäss USG für kurzfristige Exposition. Im Frequenzbereich von 10 MHz bis 110 MHz sollte zusätzlich der Körperableitstrom beurteilt werden, da der Referenzwert für diese Grösse unter Umständen ein strengeres Kriterium darstellt als der Referenzwert für die Feldstärken.
- Für die Beurteilung von indirekten Wirkungen (Schocks und Verbrennungen) bei der Berührung leitfähiger Gegenstände in einem elektrischen Feld dienen die Referenzwerte für den Berührungsstrom (siehe Anhang 3, Tabelle 8).
- Für die Beurteilung von Immissionen, die über den menschlichen Körper sehr inhomogen verteilt sind, muss auf die Basisgrenzwerte der ICNIRP (Stromdichte im Körper sowie die lokale und körporgemittelte spezifische Absorptionsrate (SAR)) zurückgegriffen werden: (siehe Anhang 3, Tabelle 4).
- Immissionen mit verschiedenen Frequenzen werden anhand der Summenausdrücke (5) bis (11) von Anhang 3 beurteilt.
- Implantate und elektronische Lebenshilfen (z.B. Herzschrittmacher) können unter Umständen in ihrer Funktion beeinflusst werden, auch wenn alle Grenzwerte der ICNIRP-Richtlinie eingehalten sind. Hersteller solcher Geräte, die implantierenden

Ärzte sowie die Betreiber von felderzeugenden Anlagen tragen die Verantwortung dafür, die Patienten über Risikosituationen ins Bild zu setzen.

4.2 Vorsorgeaspekte

Sollten sich die jetzt vorliegenden Hinweise über gesundheitliche Wirkungen bei Dauerimmissionen und über besondere Empfindlichkeiten im Bereich unterhalb der Grenzwerte nicht bestätigen, dann wird man die Grenzwerte der ICNIRP als abschliessend bezeichnen können. Andernfalls müssten die heute empfohlenen Grenzwerte angepasst werden.

Bei dieser Sachlage erachtet die Arbeitsgruppe eine Politik der vorsorglichen Vermeidung und Verminderung von Expositionen elektromagnetischer Felder als sinnvoll, soweit dies technisch und betrieblich möglich, wirtschaftlich tragbar und ökologisch verträglich ist, auch im Bereich unterhalb der empfohlenen Grenzwerte. Das Schwergewicht sollte dabei auf diejenigen Situationen gelegt werden, wo Personen über längere Zeit exponiert sind.

Des weiteren sollte periodisch eine Neubeurteilung der gesundheitlichen Risiken vorgenommen werden.

5. Literaturverzeichnis

BUWAL 1990: Biologische Auswirkungen nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung auf den Menschen und seine Umwelt. 1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 121, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, Juni 1990

BUWAL 1992: Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung. 1. Teil: Frequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 164, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Mai 1992

BUWAL 1993: Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder. 2. Teil: Frequenzbereich 10 Hz bis 100 kHz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 214, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1993

ICNIRP 1994: Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health Phys. 66, 100-106

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

IRPA 1988: Guidelines on the limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Health Phys. 54, 115-123

IRPA 1990: Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Health Phys. 58, 113-122

Anhang 1 Verwendete Abkürzungen

BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique - Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
ELF	Extremely low frequency. In der Regel versteht man darunter den Frequenzbereich unterhalb von 300 Hz.
EMF	Elektromagnetische Felder. Wird häufig als Sammelbegriff für "elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder" verwendet.
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung)
IRPA	International Radiation Protection Association (Internationaler Strahlenschutz-Verband)
NIS	Nichtionisierende Strahlung
SAR	Spezifische Absorptionsrate (in W/kg Körpergewicht)
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungs-Anstalt
USG	Umweltschutzgesetz

Anhang 2 Verzeichnis der von der Arbeitsgruppe NIS evaluierten Untersuchungsberichte

In diesem Anhang sind diejenigen publizierten Untersuchungen aufgeführt, welche die Arbeitsgruppe NIS einer detaillierten Beurteilung unterzogen hat.

A2.1 Epidemiologische Untersuchungen über Krebsrisiken und 50/60 Hz Magnetfelder

R.W. Coghill et al. 1996: Extra low frequency electric and magnetic fields in the bedplace of children diagnosed with leukemia: a case-control study.
Europ. J. Cancer Prev. 1996, 5, 153

M. Feychting et al 1997: Occupational and residential magnetic field exposure and leukemia and central nervous system tumors.
Epidemiology 1997, 8, 384

C.-. Li et al 1997: Residential exposure to 60-Hertz magnetic fields and adult cancers in Taiwan.
Epidemiology 1997, 8, 25

M.S. Linet et al. 1997: Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children.
New Engl. J. Med. 1997, 337, 1-7

J. Michaelis et al. 1997: Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany.
Cancer Causes and Control 1997, 8, 167

P.K. Verkasalo 1996: Magnetic fields and leukemia - risk for adults living close to power lines.
Scand. J. Work Environ. Health 1996, 22, suppl 2.

A2.2 Beeinflussung des Melatoninhaushalts

- M. Kato et al 1993: Effects of exposure to a circularly polarized 50-Hz magnetic field on plasma and pineal melatonin levels in rats.
Bioelectromagnetics 1993, 14, 97
- R.P. Liburdy et al 1993: ELF magnetic fields, breast cancer, and melatonin: 60 Hz fields block melatonin's oncostatic action on ER⁺ breast cancer cell proliferation.
J. Pineal Res. 1993, 14, 89
- W. Löscher et al 1994: Effects of weak alternating magnetic fields on nocturnal melatonin production and mammary carcinogenesis in rats.
Oncology 1994, 51, 288
- M. Mevissen et al 1996: Study on pineal function and DMBA-induced breast cancer formation in rats during exposure to a 100-mG, 50 Hz magnetic field.
J. Toxicol. Environ. Health 1996, 48, 169
- B. Selmaoui und Y. Touitou 1995: Sinusoidal 50 -Hz magnetic fields depress rat pineal NAT activity and serum melatonin. Role of duration and intensity of exposure.
Life Sciences 1995, 57, 1351

A2.3 Elektrosensitivität

- I.L. Beale et al. 1997: Psychological effects of chronic exposure to 50 Hz magnetic fields in humans living near extra-high-voltage transmission lines.
Bioelectromagnetics 1997, 18, 584
- U. Bergqvist et al. 1997: Possible health implications of subjective symptoms and electromagnetic fields. A report prepared by a European group of experts for the European Commission, DG V.
ARBETE OCH HÄLSA VETENSKAPLIG SKRIFTSERIE 1997:19, National Institute for Working Life, Solna, Schweden.
- BEW 1995: Study on Health Effects of the Shortwave Transmitter Station of Schwarzenburg, Berne, Switzerland.
BEW-Schriftenreihe Nr. 55, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, August 1995

- U. Harlacher und J. Schahn: "Elektrosensitivität" - ein psychologisches Problem?
In "Umwelt und Gesundheit. Die Verbindung ökologischer und gesundheitlicher Ansätze", S.151-172. Hrsg. E. Kals.
Psychologische Verlagsunion, 1998
- C. Poole et al 1993: Depressive symptoms and headaches in relation to proximity of residence to an alternating-current transmission line right-of-way.
Am. J. Epidem. 1993, 137, 318

A2.4 Verschiedene Themen

- J.-L. Chagnaud et al 1996: Effects of pulsed microwaves on the immune system and on chemically-induced tumours in rats.
In: "Biological effects relevant to amplitude modulated RF fields". ed. Simunic. Proceedings of the COST 244 workshop, Kuopio, 3./4. Sept. 1995, S.2
- H. Dolk et al. 1997: Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain.
I. Sutton Coldfield transmitter: Am. J. Epidem. 1997, 145, 1
II: All high power transmitters: Am. J. Epidem. 1997, 145, 10.
- J.R. Goldsmith 1995: Epidemiologic evidence of radiofrequency radiation (microwave) effects on health in military, broadcasting and occupational studies.
Int. J. Occup. Environ. Health 1995, 1, 47
- J.R. Goldsmith 1996: Epidemiological studies of radio-frequency radiation: current status and areas of concern.
The Science of the Total Environment 1996, 180, 3
- B. Hocking et al 1996: Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers.
Med. J. Australia 1996, 165, 601
- O. Kolomytkin et al. 1994: Response of brain receptor systems to microwave energy exposure,
in: "On the nature of electromagnetic field interactions with biological systems", ed. A.H.Frey, R.G. Landes Company. S.195
- H. Lai und N.P. Singh 1995: Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells.
Bioelectromagnetics 1995, 16, 207

- H. Lai und N.P. Singh 1996: Single and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation.
Int. J. Radiat. Biol. 1996, 69, 513
- T.A. Litovitz et al. 1994: Temporally incoherent magnetic fields mitigate the response of biological systems to temporally coherent fields.
Bioelectromagnetics 1994, 15, 399
- K. Mann und J. Röschke 1996: Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep.
Neuropsychobiology 1996, 33, 41
- G. Maskarinec et al. 1994: Investigation of increased incidence in childhood leukemia near radio towers in Hawaii: preliminary observations.
J. Environ. Pathol., Toxicol. and Oncol. 1994, 13, 33
- M.A. Navakatikian und L.A. Tomashevskaya 1994: Phasic behavioral and endocrine effects of microwaves of nonthermal intensity.
In: "Biological effects of electric and magnetic fields", Vol 1, eds. D.O. Carpenter und S. Ayrapetyan. Academic Press 1994. S. 333
- M.H. Repacholi et al 1997: Lymphomas in E μ -*Pim1* transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields.
Rad. Res. 1997, 147, 631
- L.G. Salford et al. 1993: Experimental studies of brain tumour development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation.
Bioelectrochemistry and Bioenergetics 1993, 30, 313
- L.G. Salford et al 1994: Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50 and 200 Hz.
Microscopy Res. and Techn. 1994, 27, 535

Anhang 3 Auszug aus der ICNIRP-Richtlinie 1998

Vorbemerkung des Übersetzers

In diesem Anhang ist die ICNIRP-Richtlinie 1998 "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", publiziert in Health Physics, April 1998, 74, S. 494-522, auszugsweise in deutscher Übersetzung wiedergegeben. Ausgewählt wurden diejenigen Abschnitte, welche für die Praxis von Bedeutung sind. Die ausführliche Bewertung der biologischen Wirkungen ist hier nicht, die Literaturverweise sind nur soweit enthalten, wie sie in den ausgewählten Kapiteln vorkommen. Die Numerierung der Tabellen, Figuren und Summenformeln folgt derjenigen des englischen Originals.

Der Begriff "Bevölkerung" bezeichnet alle Personen mit Ausnahme von Arbeitskräften am Arbeitsplatz (englisch: "general population").

Richtlinie über die Begrenzung der Immissionen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Wechselfelder (bis 300 GHz).

Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung

(Auszug)

Ziel und Gegenstand der Richtlinie

Das Hauptziel dieser Publikation besteht darin, Richtlinien für die Begrenzung von Immissionen elektromagnetischer Felder festzulegen, welche den Schutz vor bekannten, gesundheitsgefährdenden Wirkungen gewährleisten. Eine gesundheitsgefährdende Wirkung hat eine feststellbare Beeinträchtigung der Gesundheit der exponierten Person oder deren Nachkommen zur Folge. Ein biologischer Effekt andererseits kann, muss aber nicht zu einer Beeinträchtigung der Gesundheit führen.

Es werden Untersuchungen sowohl über direkte als auch über indirekte Wirkungen von elektromagnetischen Feldern beschrieben. Direkte Wirkungen ergeben sich aus direkten Wechselwirkungen von Feldern und dem menschlichen Körper, bei indirekten Wirkungen sind Objekte mit vom Körper verschiedenen elektrischen Potentialen beteiligt. Es werden die Ergebnisse von Labor- und epidemiologischen Untersuchungen sowie Basisgrenzwerte und Referenzwerte für die Beurteilung von Gefährdungen vorgestellt. Die vorliegende Richtlinie ist für Expositionen am Arbeitsplatz und für die Bevölkerung anwendbar.

Richtlinien zum Hochfrequenzbereich und zu den Frequenzen 50/60 Hz wurden von IRPA/INIRC in den Jahren 1988 und 1990 publiziert. Die vorliegende Richtlinie deckt den ganzen Frequenzbereich von elektromagnetischen Wechselfeldern (bis hinauf zu 300 GHz) ab; sie ersetzt die beiden früheren Richtlinien. Statische Magnetfelder sind Gegenstand einer 1994 publizierten ICNIRP Richtlinie (ICNIRP 1994).

Die Kommission ist sich bewusst, dass bei der Festlegung von Grenzwerten eine Reihe unterschiedlicher Expertenmeinungen in Einklang gebracht werden muss.

Wissenschaftliche Berichte sind auf ihre Gültigkeit hin zu bewerten und Ergebnisse aus dem Tierversuch müssen auf den Menschen übertragen werden. Die Grenzwerte in dieser Richtlinie basieren einzig auf wissenschaftlichen Ergebnissen. Beim heutigen Stand des Wissens kann man davon ausgehen, dass diese Grenzwerte ein ausreichendes Schutzniveau gegen elektromagnetische Wechselfelder darstellen. In der Richtlinie finden sich zwei Gruppen von Beurteilungshilfen:

- **Basisgrenzwerte:** Es handelt sich um Begrenzungen, welche direkt von gesicherten gesundheitlichen Wirkungen abgeleitet sind. Je nach Frequenz des Feldes werden folgende physikalische Grössen begrenzt: die Stromdichte (J), die spezifische Absorptionsrate (SAR) und die Leistungsdichte (S). Einzig die Leistungsdichte in der Luft, ausserhalb des menschlichen Körpers, kann auf einfache Weise gemessen werden.
- **Referenzwerte:** Diese Werte bieten sich für die Beurteilung in der Praxis an. Sie geben die Schwelle für die Immissionen an, oberhalb der die Basisgrenzwerte wahrscheinlich überschritten sind. Einige Referenzwerte sind mit Hilfe von Messungen und Berechnungen von den zugrundeliegenden Basisgrenzwerten abgeleitet, andere berücksichtigen die Wahrnehmung und gefährdende indirekte Wirkungen von elektromagnetischen Feldern. Die abgeleiteten Grössen sind: die elektrische Feldstärke (E), die magnetische Feldstärke (H), die magnetische Flussdichte (B), die Leistungsdichte (S) sowie der elektrische Strom in den Gliedmassen (I_L). Grössen, welche stellvertretend für die Wahrnehmung von elektromagnetischen Feldern und andere indirekte Wirkungen stehen, sind der Berührungstrom (I_C) und, bei gepulsten Feldern, die spezifische Energieabsorption (SA). In einer gegebenen Immissionssituation können die berechneten oder gemessenen Werte dieser Grössen mit dem entsprechenden Referenzwert verglichen werden. Sind die Referenzwerte eingehalten, dann sind auch die relevanten Basisgrenzwerte eingehalten. Überschreitet ein gemessener oder berechneter Wert den Referenzwert, bedeutet dies nicht notwendigerweise, dass auch der Basisgrenzwert überschritten ist. In diesem Fall muss jedoch die Einhaltung des entsprechenden Basisgrenzwerts überprüft werden, und es sind gegebenenfalls zusätzliche Schutzmassnahmen zu treffen.

Produktenormen zur Begrenzung der Emissionen elektromagnetischer Felder unter definierten Testbedingungen sind in der vorliegenden Richtlinie nicht direkt angesprochen; auch die Messung der physikalischen Grössen, welche ein elektrisches, magnetisches oder elektromagnetisches Feld charakterisieren, ist nicht Gegenstand dieses Dokuments. Umfassende Darstellungen der Instrumentierung und der Messtechniken zur genauen Bestimmung dieser physikalischen Grössen finden sich bei NCRP 1981, IEEE 1992, NCRP 1993 und DIN VDE 1995.

Auch bei Einhaltung der vorliegenden Richtlinie können Beeinflussungen von oder Auswirkungen auf medizintechnische Geräte wie Metallprothesen, Herzschrittmacher

und Defibrillatoren sowie Cochlea-Implantate nicht ausgeschlossen werden. Herzschrittmacher können bei Immissionen unterhalb der Referenzwerte beeinflusst werden. Hinweise, wie sich solche Probleme vermeiden lassen, würden den Rahmen dieses Dokumentes sprengen; solche finden sich bei UNEP/WHO/IRPA 1993.

Diese Richtlinie wird periodisch angepasst und nachgeführt werden, wenn Fortschritte beim Nachweis gesundheitsgefährdender Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Wechselfelder zu verzeichnen sind.

Zugrundeliegende Datenbasis

Diese Richtlinie über die Begrenzung der Immissionen wurde nach einer umfassenden Bewertung der gesamten publizierten wissenschaftlichen Literatur verfasst. Im Rahmen dieser Bewertung kamen Beurteilungskriterien zur Anwendung, mit denen sich die Glaubwürdigkeit der beschriebenen Ergebnisse einschätzen lässt (Repacholi und Stolwijk 1991, Repacholi und Cardis 1997). Nur gesicherte Wirkungen wurden als Basis für die vorgeschlagene Begrenzung der Immissionen verwendet. Dass langzeitige Exposition durch elektromagnetische Felder Krebs auslösen kann, wurde als nicht gesichert betrachtet. Demzufolge basiert diese Richtlinie auf akuten gesundheitlichen Wirkungen wie der Erregung peripherer Nerven und Muskeln, Schocks und Verbrennungen bei der Berührung leitfähiger Gegenstände und einer infolge von Absorptionsvorgängen erhöhten Gewebetemperatur. Aus der epidemiologischen Forschung ergibt sich zwar ein Hinweis, aber kein überzeugender Beweis für einen Zusammenhang zwischen eventuellen kanzerogenen Wirkungen und der Exposition durch 50/60 Hz-Magnetfelder bei Flussdichten wesentlich unterhalb der in der vorliegenden Richtlinie empfohlenen Referenzwerte. Die ICNIRP kam diesbezüglich zum Schluss, dass die verfügbaren Daten über eventuelle Langzeitwirkungen, wie beispielsweise ein erhöhtes Krebsrisiko, als Basis für Immissionsgrenzwerte nicht ausreichen.

Es werden *in vitro* Effekte bei kurzzeitiger Exposition durch ELF- oder ELF- amplitudenmodulierte elektromagnetische Felder zusammengefasst. Vorübergehende Reaktionen von Zellen und Gewebeproben auf die Exposition durch elektromagnetische Felder sind beobachtet worden, allerdings ohne klare Expositions-Wirkungsbeziehung. Für die Bewertung gesundheitlich relevanter Effekte sind diese Befunde von eingeschränktem Wert, weil viele dieser Reaktionen *in vivo* nicht nachgewiesen sind. Es wurde deshalb befunden, dass die Ergebnisse von *in-vitro* Untersuchungen allein keine primäre Basis für die Bewertung gesundheitlicher Wirkungen von elektromagnetischen Feldern darstellen.

Richtlinie über die Begrenzung von Immissionen elektromagnetischer Felder

Immissionsbegrenzung am Arbeitsplatz und für die Bevölkerung

Wenn Personen am Arbeitsplatz exponiert werden, so handelt es sich um Erwachsene, und die Exposition geschieht in der Regel unter bekannten Bedingungen. Die exponierten Personen kennen allfällige Risiken und sind instruiert, geeignete Sicherheitsmassnahmen zu treffen. Im Gegensatz dazu gehören der Bevölkerung Personen jeglichen Alters und unterschiedlicher Gesundheit an, eingeschlossen besonders empfindliche Gruppen oder Einzelpersonen. Häufig ist dem Bürger eine Exposition durch elektromagnetische Felder nicht bekannt. Des weiteren kann man nicht erwarten, dass Personen aus der Bevölkerung Vorsichtsmassnahmen ergreifen, um die Immissionen zu reduzieren oder zu verhindern. Aus diesen Überlegungen heraus wird für die Bevölkerung eine strengere Immissionsbegrenzung angestrebt als für exponierte Personen am Arbeitsplatz.

Basisgrenzwerte und Referenzwerte

Die Begrenzungen der Auswirkungen von Immissionen stützen sich auf gesicherte gesundheitliche Wirkungen. Sie werden als Basisbegrenzungen bezeichnet. Die Basisbegrenzung wird, je nach Frequenz, durch Basisgrenzwerte für die folgenden physikalischen Grössen spezifiziert: Stromdichte, SAR und Leistungsdichte. Um den Schutz vor schädlichen gesundheitlichen Wirkungen zu gewährleisten, dürfen diese Basisgrenzwerte nicht überschritten werden.

Für die Beurteilung von Immissionen dienen Referenzwerte, mit denen die Messwerte physikalischer Grössen zu vergleichen sind. Wenn alle in der vorliegenden Richtlinie angegebenen Referenzwerte eingehalten sind, dann sind auch die Basisgrenzwerte eingehalten. Ist ein Messwert höher als der Referenzwert, so müssen die Basisgrenzwerte nicht notwendigerweise überschritten sein; es muss in diesem Fall aber im Detail abgeklärt werden, ob die Basisgrenzwerte eingehalten sind.

Allgemeine Bemerkungen zu Sicherheitsfaktoren

Die Kenntnisse über biologische und gesundheitliche Wirkungen von Immissionen elektromagnetischer Felder, denen die Bevölkerung und Versuchstiere ausgesetzt sind, bilden keine belastbare Grundlage, um für den ganzen Frequenzbereich und alle Modulationen Sicherheitsfaktoren abzuleiten. Zum Teil stammt die Ungewissheit über angemessene Sicherheitsfaktoren auch daher, dass das zutreffende Dosis-

mass nicht bekannt ist (Repacholi 1998). Bei der Festlegung der Sicherheitsfaktoren für den Hochfrequenzbereich wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Wirkungen von Immissionen elektromagnetischer Felder unter extremen Umweltbedingungen (hohe Temperatur etc.) und/oder bei hohem Aktivitätsniveau;
- Eventuell erhöhte Empfindlichkeit gewisser Bevölkerungsgruppen auf thermische Belastungen, beispielsweise von Alten und Gebrechlichen, Säuglingen und Kleinkindern, kranken Personen oder bei der Einnahme von Medikamenten, welche die Wärmetoleranz beeinträchtigen.

Bei der Herleitung der Referenzwerte für den Hochfrequenzbereich wurden zusätzlich die folgenden Faktoren einbezogen:

- Unterschiedliches Absorptionsverhalten für elektromagnetische Energie durch Personen verschiedener Grösse und verschiedener Orientierung gegenüber dem Feld;
- Reflexionen, Fokussierung und Streuung der einfallenden Strahlung, was zu einer lokal erhöhten Absorption von hochfrequenter Energie führen kann.

Basisgrenzwerte

Für die Festlegung der Basisgrenzwerte wurden je nach Frequenzbereich unterschiedliche wissenschaftliche Grundlagen beigezogen:

- Zwischen 1 Hz und 10 MHz werden Basisgrenzwerte für die Stromdichte angegeben, um Wirkungen auf Funktionen des Nervensystems zu verhindern.
- Zwischen 100 kHz und 10 GHz werden Basisgrenzwerte für die SAR angegeben, um Wärmestress des ganzen Körpers und übermässige lokale Erwärmung von Körpergewebe zu verhindern. Im Bereich zwischen 100 kHz und 10 MHz bestehen Basisgrenzwerte sowohl für die Stromdichte als auch für die SAR.
- Zwischen 10 GHz und 300 GHz werden Basisgrenzwerte für die Leistungsdichte angegeben, um übermässige Erwärmung von Gewebe an oder nahe der Körperoberfläche zu verhindern.

Im Frequenzbereich zwischen einigen Hz und 1 kHz werden die Schwellen, oberhalb denen die Erregbarkeit des Zentralnervensystems akut verändert wird oder andere akute Effekte wie eine Umkehr visuell evozierter Potentiale auftreten, bei einem Wert für die Stromdichte von 100 mA/m^2 überschritten. Im Lichte der obgenannten Überlegung zu den Sicherheitsfaktoren wurde für berufliche Exposition im Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 1 kHz ein Sicherheitsfaktor von 10 festgelegt, d.h. die Im-

missionen bei der Exposition am Arbeitsplatz sollen so begrenzt werden, dass eine Stromdichte von weniger als 10 mA/m^2 induziert wird. Für die Bevölkerung wird ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 5 eingebaut, womit der Basisgrenzwert 2 mA/m^2 beträgt. Unterhalb von 4 Hz und oberhalb von 1 kHz steigt der Basisgrenzwert für die induzierte Stromdichte an, da auch die Schwelle für die Stimulation von Nerven in diesen Frequenzbereichen zunehmend höher wird.

Tabelle 4 Basisgrenzwerte für elektrische und magnetische Wechselfelder für Frequenzen bis 10 GHz ^{a)}

Expositionsbedingung	Frequenzbereich	Stromdichte in Kopf und Rumpf (mA m^{-2}) (Effektivwert)	SAR über den ganzen Körper gemittelt (W kg^{-1})	SAR lokal (Kopf und Rumpf) (W kg^{-1})	SAR lokal (Gliedmassen) (W kg^{-1})
Arbeitsplatz	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
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:

- f ist die Frequenz in Hertz.
- Wegen der elektrischen Inhomogenität des Körpers sollen Stromdichten über einen Querschnitt von 1 cm^2 , senkrecht zur Stromrichtung, gemittelt werden.
- Bei Frequenzen unter 100 kHz ergibt sich der Spitzenwert der Stromdichte durch Multiplikation des Effektivwerts mit dem Faktor $\sqrt{2}$ (~ 1.414). Bei Pulsen mit Pulsdauer t_p sollte bei der Ermittlung des Basisgrenzwerts eine äquivalente Frequenz von $f = 1/(2t_p)$ eingesetzt werden.
- Für Frequenzen unter 100 kHz und für gepulste Magnetfelder kann der Spitzenwert der durch einen Puls induzierten Stromdichte ausgehend von der Anstiegs-/Abfallzeit der Pulsflanke und der maximalen zeitlichen Änderung der magnetischen Flussdichte berechnet werden. Diese induzierte Stromdichte wird anschliessend mit dem zutreffenden Basisgrenzwert verglichen.
- Alle SAR-Werte sind während Perioden von jeweils 6 Minuten zu mitteln.
- Bei der Beurteilung der lokalen SAR ist die SAR über je 10 g zusammenhängendes Gewebe zu mitteln. Massgeblich für die Beurteilung ist der höchste so resultierende SAR-Wert.
- Bei Pulsen mit Pulsdauer t_p soll bei der Ermittlung des Basisgrenzwerts eine äquivalente Frequenz von $f = 1/(2t_p)$ eingesetzt werden. Bei gepulsten Immissionen im Frequenzbereich von 0.3 bis 10 GHz und bei lokaler Exposition des Kopfs wird ein zusätzlicher Basisgrenzwert für die spezifische Absorption SA empfohlen. Damit sollen "Höreffekte", ausgelöst durch thermoelastische Expansionen, begrenzt oder vermieden werden. Die SA soll bei beruflicher Exposition 10 mJ kg^{-1} , für die Bevölkerung 2 mJ kg^{-1} nicht überschreiten, je gemittelt über 10 g Gewebe.

Die gesicherten biologischen und gesundheitlichen Wirkungen im Frequenzbereich von 10 MHz bis zu einigen GHz stehen in Übereinstimmung mit den Reaktionen auf eine Erhöhung der Körpertemperatur um mehr als 1°C. Eine solche Temperaturerhöhung ergibt sich bei der Exposition von Personen unter gemässigten Umweltbedingungen bei einer Ganzkörper-SAR von ungefähr 4 W kg^{-1} während ca. 30 Minuten. Deshalb wurde ein Wert von 0.4 W kg^{-1} als Basisgrenzwert für die über den ganzen Körper gemittelte SAR gewählt, welcher ausreichenden Schutz bei beruflicher Exposition gewährt. Für den Schutz der Bevölkerung wurde ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 5 eingeführt, womit der Grenzwert für die über den ganzen Körper gemittelte SAR 0.08 W kg^{-1} beträgt.

Die niedrigeren Basisgrenzwerte für die Bevölkerung berücksichtigen allfällige Unterschiede in Alter und Gesundheitszustand im Vergleich mit Arbeitskräften.

Zurzeit liegen nur wenige Angaben über gesundheitliche Wirkungen von transienten Strömen im Niederfrequenzbereich vor. Die ICNIRP empfiehlt deshalb, die Basisgrenzwerte für die durch Transienten oder sehr kurze Pulse induzierten Stromdichten als Momentanwerte zu betrachten und keine zeitliche Mittelung vorzunehmen.

Die Basisgrenzwerte für die Stromdichte, die über den ganzen Körper gemittelte SAR sowie die lokale SAR für Frequenzen zwischen 1 Hz und 10 GHz finden sich in Tabelle 4, jene für die Leistungsdichte im Frequenzbereich zwischen 10 und 300 GHz in Tabelle 5.

Tabelle 5 Basisgrenzwerte für die Leistungsdichte im Frequenzbereich zwischen 10 und 300 GHz ^{a)}

Expositionsbedingung	Leistungsdichte (W m^{-2})
Arbeitsplatz	50
Bevölkerung	10

a) Anmerkungen:

- 1 Leistungsdichten sind über je 20 cm^2 der exponierten Oberfläche und während Perioden von jeweils $68 / f^{1.05}$ Minuten zu mitteln, wobei f die Frequenz in GHz bedeutet. Damit wird der mit zunehmender Frequenz kürzeren Eindringtiefe Rechnung getragen.
- 2 Lokale Maxima der Leistungsdichte, gemittelt über eine Fläche von 1 cm^2 , sollen das 20fache der obigen Werte nicht übersteigen.

Referenzwerte

Die Referenzwerte wurden, soweit möglich und sinnvoll, mit Hilfe von mathematischen Modellen und durch Extrapolation von Laborergebnissen bei spezifischen Frequenzen aus den Basisgrenzwerten abgeleitet. Sie gelten für maximale Kopplung zwischen dem Feld und exponierten Personen und gewährleisten somit bestmöglichen Schutz. In den Tabellen 6 und 7 sind die Referenzwerte für berufliche Exposition und für die Exposition der Bevölkerung zusammengefasst und in den Figuren 1 und 2 grafisch dargestellt. Die Referenzwerte beziehen sich auf die über den ganzen Körper der exponierten Person gemittelten Feldgrößen. Dabei dürfen aber die Basisgrenzwerte für lokale Exposition nicht überschritten werden.

Tabelle 6 Referenzwerte für die Exposition durch elektrische und magnetische Wechselfelder am Arbeitsplatz (ungestörte Effektivwerte) ^{a)}

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke E ($V\ m^{-1}$)	Magnetische Feldstärke H ($A\ m^{-1}$)	Magnetische Flussdichte B (μT)	Äquivalente Leistungsdichte S_{eq} ($W\ m^{-2}$)
bis 1 Hz	--	1.63×10^5	2×10^5	--
1 - 8 Hz	20'000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	--
8 - 25 Hz	20'000	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^4 / f$	--
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 - 2'000 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 Spalte "Frequenzbereich" angegeben.
- 2 Die Feldstärkewerte dürfen überschritten werden, sofern die Basisgrenzwerte eingehalten sind und gefährdende indirekte Wirkungen ausgeschlossen werden können.
- 3 Für Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 GHz sind S_{eq} , E^2 , H^2 und B^2 während Perioden von jeweils 6 Minuten zu mitteln.
- 4 Für Spitzenwerte bei Frequenzen unter 100 kHz siehe Tabelle 4, Bemerkung 3.
- 5 Für Spitzenwerte bei Frequenzen über 100 kHz siehe Figuren 1 und 2. Zwischen 100 kHz und 10 MHz erhält man die Spitzenwerte für die Feldstärken durch Interpolation zwischen 100 kHz (Spitzenwert 1.5fach) und 10 MHz (Spitzenwert 32fach). Für Frequenzen über 10 MHz wird vorgeschlagen, dass der Spitzenwert der äquivalenten Leistungsdichte, gemittelt während der Pulsdauer, das 1000fache des Referenzwerts für S_{eq} , und derjenige der Feldstärken das 32fache der Referenzwerte für die Feldstärken in der Tabelle nicht überschreitet.
- 6 Bei Frequenzen über 10 GHz sind S_{eq} , E^2 , H^2 und B^2 während Perioden von jeweils $68 / f^{1.05}$ Minuten zu mitteln (f in GHz).
- 7 Für elektrische Felder unter 1 Hz - es handelt sich praktisch um statische elektrische Felder - wird kein Referenzwert angegeben. Elektrische Schocks von Quellen mit niedriger Impedanz lassen sich mit bewährten elektrischen Sicherheitsmassnahmen an solchen Einrichtungen vermeiden.

Tabelle 7 Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch elektrische und magnetische Wechselfelder (ungestörte Effektivwerte) ^{a)}

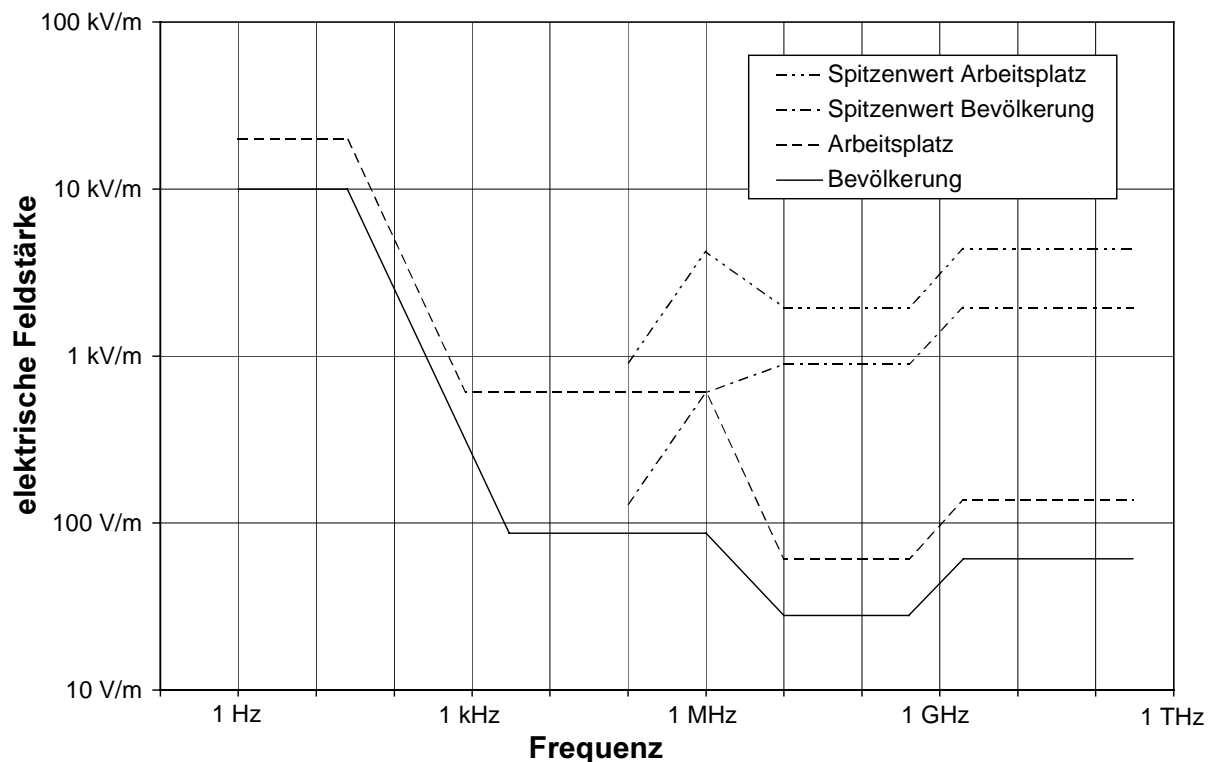
Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke E ($V\ m^{-1}$)	Magnetische Feldstärke H ($A\ m^{-1}$)	Magnetische Flussdichte B (μT)	Äquivalente Leistungsdichte S_{eq} ($W\ m^{-2}$)
bis 1 Hz	--	3.2×10^4	4×10^4	--
1 - 8 Hz	10'000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	--
8 - 25 Hz	10'000	$4'000 / f$	$5'000 / f$	--
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 - 2'000 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:

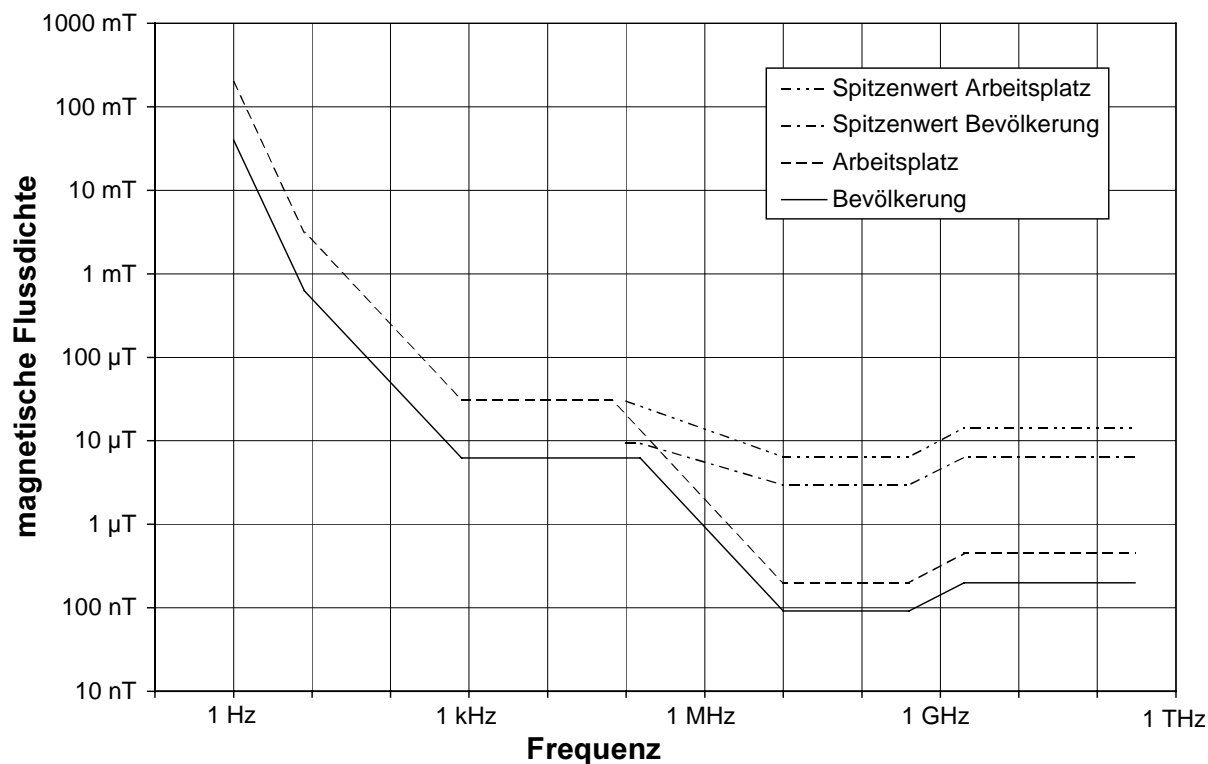
- 1 f wie in der Spalte "Frequenzbereich" angegeben.
- 2 Die Feldstärkewerte dürfen überschritten werden, sofern die Basisgrenzwerte eingehalten sind und gefährdende indirekte Wirkungen ausgeschlossen werden können.
- 3 Für Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 GHz sind S_{eq} , E^2 , H^2 und B^2 während Perioden von jeweils 6 Minuten zu mitteln.
- 4 Für Spitzenwerte bei Frequenzen unter 100 kHz siehe Tabelle 4, Bemerkung 3.
- 5 Für Spitzenwerte bei Frequenzen über 100 kHz siehe Figuren 1 und 2. Zwischen 100 kHz und 10 MHz erhält man die Spitzenwerte für die Feldstärken durch Interpolation zwischen 100 kHz (Spitzenwert 1.5fach) und 10 MHz (Spitzenwert 32fach). Für Frequenzen über 10 MHz wird vorgeschlagen, dass der Spitzenwert der äquivalenten Leistungsdichte, gemittelt während der Pulsdauer, das 1000fache des Referenzwerts für S_{eq} , und derjenige der Feldstärken das 32fache der Referenzwerte für die Feldstärken in der Tabelle nicht überschreitet.
- 6 Bei Frequenzen über 10 GHz sind S_{eq} , E^2 , H^2 und B^2 während Perioden von jeweils $68 / f^{1.05}$ Minuten zu mitteln (f in GHz).
- 7 Für elektrische Felder unter 1 Hz - es handelt sich praktisch um statische elektrische Felder - wird kein Referenzwert angegeben. Die meisten Personen nehmen elektrische Oberflächenladungen bei Feldstärken unter $25\ kV\ m^{-1}$ nicht als belästigend wahr. Belästigende Funkenentladungen sollen vermieden werden.

Für niederfrequente Felder wurden mehrere Berechnungs- und Messmethoden entwickelt, mit denen sich Referenzwerte für die Feldstärken aus den Basisgrenzwerten ableiten lassen. Diese Modelle arbeiten bis heute mit Vereinfachungen: sie tragen beispielsweise der Inhomogenität und der Anisotropie der elektrischen Leitfähigkeit sowie anderer Gewebeparameter, die für solche Berechnungen von Bedeutung sind, nicht Rechnung.

Die Referenzwerte für die Feldstärken sind frequenzabhängig. Diese Frequenzabhängigkeit ergibt sich einerseits aus den Daten über die biologischen Wirkungen, andererseits aus der Kopplung des Körpers mit dem Feld.



Figur 1 Referenzwerte für die elektrische Feldstärke (siehe Tabellen 6 und 7)



Figur 2 Referenzwerte für die magnetische Flussdichte (siehe Tabellen 6 und 7)

Die Modelle für die Kopplung mit Magnetfeldern nehmen vereinfachend an, dass die Leitfähigkeit des Körpers homogen und isotrop ist, und verwenden einfache kreisförmige Leiterschleifen, um induzierte Ströme in verschiedenen Organen und Bereichen des Körpers, z.B. dem Kopf, abzuschätzen. Für ein reines sinusförmiges Magnetfeld der Frequenz f folgt aus dem Faradayschen Induktionsgesetz:

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

wobei B die magnetische Flussdichte und R der Radius der für die Induktion von Strömen zur Verfügung stehenden Schleife bedeuten. Komplexere Modelle verwenden ellipsoide Körpermodelle und bilden so den Rumpf oder den ganzen Körper für die Abschätzung von induzierten Stromdichten an der Körperperipherie nach (Reilly 1989, 1992).

Wird vereinfachend eine homogene Leitfähigkeit von 0.2 S m^{-1} angenommen, so erzeugt ein 50 Hz-Magnetfeld mit einer Flussdichte von $100 \text{ } \mu\text{T}$ Stromdichten in den peripheren Bereichen des Körpers zwischen 0.2 und 2 mA m^{-2} (CRP 1997). Einer anderen Analyse zufolge (NAS 1996) entsprechen $100 \text{ } \mu\text{T}$ eines 60 Hz-Feldes im Mittel einer Stromdichte von 0.28 mA m^{-2} und im Maximum von ungefähr 2 mA m^{-2} . Realistischere Berechnungen, gestützt auf anatomisch und elektrisch verfeinerte Modelle (Xi und Stuchly 1994) ergaben maximale Stromdichten von über 2 mA m^{-2} für ein $100 \text{ } \mu\text{T}$ Magnetfeld bei 60 Hz. Die Anwesenheit biologischer Zellen beeinflusst die räumliche Verteilung der induzierten Ströme und Felder. Dadurch kommt es zu beträchtlichen Abweichungen sowohl der Beträge (um einen Faktor 2 oder mehr) als auch der räumlichen Muster der induzierten Ströme verglichen mit den Voraussagen aus vereinfachten Modellen (Stuchly und Xi 1994).

Modelle für die Kopplung mit elektrischen Feldern müssen berücksichtigen, dass die Ladungsdichte auf der Körperoberfläche je nach Expositionsbedingungen sowie Grösse, Form und Lage des Körpers im Feld beträchtlich variieren kann. Dies führt zu einer veränderlichen und nicht uniformen Verteilung von Strömen im Innern des Körpers. Für sinusförmige elektrische Felder bei Frequenzen unterhalb ungefähr 10 MHz steigt die im Innern des Körpers induzierte Stromdichte mit der Frequenz an. Die induzierte Stromdichte variiert in umgekehrtem Verhältnis zum Körper-Querschnitt und kann im Hals und in den Fussgelenken verhältnismässig hoch sein. Der Referenzwert der elektrischen Feldstärke für die Bevölkerung von 5 kV m^{-1} entspricht unter ungünstigsten Bedingungen einer induzierten Stromdichte von ungefähr 2 mA m^{-2} im Hals und Rumpf des Körpers, sofern der Vektor des elektrischen Feldes parallel zur Körperachse ausgerichtet ist (ILO 1994; CRP 1997). Somit ist der Basisgrenzwert für die induzierte Stromdichte bei einer elektrischen Feldstärke von 5 kV m^{-1} unter realistischen "worst-case" Bedingungen eingehalten.

Um die Einhaltung der Basisgrenzwerte zu belegen, können die Referenzwerte für die elektrische und magnetische Feldstärke unabhängig voneinander angewendet werden. Eine additive Betrachtung ist nicht nötig, weil sich, soweit es um Schutzbelange geht, die vom elektrischen und magnetischen Feld induzierten Ströme nicht addieren.

Bei beruflicher Exposition darf der Referenzwert für die elektrische Feldstärke bei Frequenzen unter 100 kHz im Einzelfall um einen Faktor 2 überschritten werden, unter der Bedingung, dass indirekte Gefährdungen durch Berührung von elektrisch geladenen Leitern ausgeschlossen werden können.

Bei Frequenzen über 10 MHz wurden die Referenzwerte für die elektrische und magnetische Feldstärke vom Basisgrenzwert der Gesamtkörper-SAR unter Verwendung von Berechnungsmodellen und von experimentellen Daten abgeleitet. Die Kopplung erreicht unter ungünstigsten Bedingungen ein Maximum zwischen 20 MHz und einigen hundert MHz. In diesem Frequenzbereich sind die abgeleiteten Referenzwerte am niedrigsten. Die Referenzwerte für die magnetische Feldstärke wurden unter Annahme von Fernfeldbedingungen ($E/H = 377 \text{ Ohm}$) aus denjenigen für die elektrische Feldstärke berechnet. Im Nahfeld ist die Frequenzabhängigkeit der SAR nicht mehr gültig. Dazu kommt, dass die Beiträge der elektrischen und magnetischen Feldkomponenten gesondert betrachtet werden müssen. Für eine konservative Beurteilung kann man auch in Nahfeldsituationen die Referenzwerte für die Feldstärken anwenden, weil die Energie, die vom elektrischen oder magnetischen Feldbeitrag eingekoppelt wird, den Basisgrenzwert für die SAR nicht überschreiten kann. Für eine weniger konservative Beurteilung wird man die Basisgrenzwerte für die über den ganzen Körper gemittelte SAR und die lokale SAR zugrundelegen.

Die Referenzwerte für die Bevölkerung folgen aus denjenigen für berufliche Exposition unter Verwendung - je nach Frequenzbereich - unterschiedlich hoher Faktoren. Diese Faktoren wurden auf der Basis derjenigen Wirkungen festgelegt, welche für die einzelnen Frequenzbereiche typisch und bedeutsam sind. Generell folgen diese Faktoren den Basisgrenzwerten über den gesamten Frequenzbereich und ihre Werte entsprechen der mathematischen Beziehung zwischen einem Basisgrenzwert und den abgeleiteten Größen, wie nachfolgend beschrieben:

- Im Frequenzbereich bis 1 kHz beträgt der Referenzwert der elektrischen Feldstärke für die Bevölkerung die Hälfte desjenigen bei beruflicher Exposition. Beim Referenzwert von 10 kV m^{-1} bei 50 Hz, bzw. 8.3 kV m^{-1} bei 60 Hz für berufliche Exposition können Stimulationseffekte durch Berührungsströme unter allen denkbaren Bedingungen mit genügender Sicherheit ausgeschlossen werden. Die Hälfte dieses Wertes wurde als Referenzwert für die Bevölkerung gewählt, d.h. 5 kV m^{-1} bei 50 Hz bzw. 4.2 kV m^{-1} bei 60 Hz. Damit werden gefährdende indirekte Wirkungen für über 90% der exponierten Personen vermieden.

- Im Niederfrequenzbereich unter 100 kHz werden die Referenzwerte für die magnetische Feldstärke für die Bevölkerung 5 mal niedriger angesetzt als bei beruflicher Exposition.
- Im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 10 MHz sind die Referenzwerte für die magnetische Feldstärke für die Bevölkerung gegenüber der IRPA-Richtlinie von 1988 angehoben worden. In jener Richtlinie waren die Referenzwerte für die magnetische Feldstärke aus denjenigen für die elektrische Feldstärke mit Hilfe der Fernfeldbeziehung zwischen E und H berechnet worden. Diese Referenzwerte sind zu konservativ, weil von Magnetfeldern bei Frequenzen unter 10 MHz kein nennenswertes Risiko für Shocks, Verbrennungen oder Oberflächenladungseffekte ausgeht, welche in diesem Frequenzbereich die hauptsächlich Basis für die Begrenzung elektrischer Felder bei beruflicher Exposition darstellen.
- Im Hochfrequenzbereich zwischen 10 MHz und 10 GHz sind die Referenzwerte für elektrische und magnetische Felder für die Bevölkerung um den Faktor 2.2 niedriger als für berufliche Exposition. Der Faktor 2.2 entspricht dem Wert $\sqrt{5}$ und ist gleichzeitig der Sicherheitsfaktor zwischen den Basisgrenzwerten für berufliche und allgemeine Exposition. Die Quadratwurzel reflektiert die Beziehung zwischen "Feldstärke" und "Leistungsdichte".
- Im Hochfrequenzbereich zwischen 10 und 300 GHz sind die Referenzwerte für die Bevölkerung für die gleiche Grösse wie der Basisgrenzwert, nämlich für die Leistungsdichte, angegeben. Sie sind fünfmal niedriger als diejenigen für berufliche Exposition.
- Obschon nur wenige Angaben über die Beziehung von Spitzenwerten gepulster Felder und biologischen Wirkungen vorliegen, wird folgende Begrenzung vorgeschlagen: Bei Frequenzen über 10 MHz soll S_{eq} , gemittelt während der Pulsdauer, das 1000fache der Referenzwerte, bzw. die Feldstärken das 32fache der Referenzwerte gemäss Tabelle 6 und 7 sowie Figur 1 und 2 nicht überschreiten. Bei Frequenzen zwischen ungefähr 0.3 GHz und einigen GHz und bei lokaler Exposition des Kopfs muss die spezifische Absorption von Pulsen begrenzt werden, um Höreffekte, welche durch thermoelastische Ausdehnung zustande kommen, zu begrenzen oder zu verhindern. In diesem Frequenzbereich beträgt der Schwellenwert der SA für den genannten Effekt $4-16 \text{ mJ kg}^{-1}$. Dies entspricht bei einem $30 \mu\text{s}$ Puls einem Spitzenwert der SAR im Gehirn von $130-520 \text{ W kg}^{-1}$. Zwischen 100 kHz und 10 MHz sind die Spitzenwerte für die Feldstärken den Figuren 1 und 2 zu entnehmen. Sie folgen aus einer Interpolation zwischen 100 kHz (Spitzenwert 1.5fach) und 10 MHz (Spitzenwert 32fach).
- In den Tabellen 6 und 7 und ebenso in den Figuren 1 und 2 liegen die Knickpunkte der Kurven für berufliche und allgemeine Exposition bei unterschiedlichen Frequenzen. Dies ist eine Folge der Anwendung unterschiedlicher Faktoren bei der Herleitung der Referenzwerte für die Bevölkerung, während gleichzeitig die

Frequenzabhängigkeit der Kurven sowohl für berufliche wie für allgemeine Exposition grundsätzlich gleich bleiben sollte.

Referenzwerte für Berührungsströme und induzierte Ströme

Für Frequenzen bis zu 110 MHz (einschliesslich des UKW Radiobandes) werden in Tabelle 8 Referenzwerte für den Berührungsstrom (bei punktförmigem Kontakt) angegeben. Bei Überschreitung dieser Werte ist hinsichtlich einer Gefährdung durch Schocks und Verbrennungen Vorsicht geboten. Die Schwellenwerte für biologische Reaktionen auf Berührungsströme sind bei Kindern ungefähr halb und bei erwachsenen Frauen etwa zwei Drittel so hoch wie bei erwachsenen Männern. Aus diesem Grund sind die Referenzwerte des Berührungsstroms für die Bevölkerung halb so hoch angesetzt wie für berufliche Exposition.

Tabelle 8 Referenzwerte für den Strom bei der Berührung leitfähiger Gegenstände ^{a)}

Expositionsbedingung	Frequenzbereich	Höchster Berührungsstrom (mA)
Arbeitsplatz	bis 2.5 kHz	1.0
	2.5 - 100 kHz	0.4 <i>f</i>
	100 kHz - 110 MHz	40
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

Für den Frequenzbereich von 10 bis 110 MHz sind in der Tabelle 9 Referenzwerte für den Strom in den Gliedmassen angegeben. Bei ihrer Einhaltung sind die Basisgrenzwerte für die lokale SAR unterschritten.

Tabelle 9 Referenzwerte für den pro Gliedmasse induzierten Strom für Frequenzen zwischen 10 und 110 MHz ^{a)}

Expositionsbedingung	Strom (mA)
Arbeitsplatz	100
Bevölkerung	45

a) Anmerkungen:

- 1 Der Referenzwert für die Bevölkerung ist um den Faktor $\sqrt{5}$ niedriger als für berufliche Exposition.
- 2 Diesen Referenzwerten liegt die Einhaltung der Basisgrenzwerte für die lokale SAR zugrunde. Massgeblich für die Beurteilung ist die Wurzel aus dem während einer Periode von jeweils 6 Minuten quadratisch gemittelten induzierten Strom.

Gleichzeitige Exposition in Feldern mit mehreren Frequenzen

In Immissionssituationen, wo Felder verschiedener Frequenz gleichzeitig vorhanden sind, ist es entscheidend, ob diese Immissionen hinsichtlich ihrer Wirkungen additiv sind. Das Zusammenwirken soll für thermische Wirkungen und für die elektrische Erregung getrennt beurteilt werden, und die nachstehenden Basisgrenzwerte sollen eingehalten sein. Die folgenden Berechnungsformeln sind für die in praktischen Immissionssituationen relevanten Frequenzen konzipiert.

Hinsichtlich der elektrischen Erregung - relevant für Frequenzen bis 10 MHz - sollen die induzierten Stromdichten wie folgt summiert werden:

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

Hinsichtlich der thermischen Wirkungen - relevant oberhalb von 100 kHz - sollen die SAR und die Leistungsdichte wie folgt summiert werden:

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

Dabei bezeichnen

J_i die induzierte Stromdichte bei der Frequenz i

$J_{L,i}$ den Basisgrenzwert für die induzierte Stromdichte bei der Frequenz i gemäss Tabelle 4

SAR_i die resultierende SAR infolge Exposition bei der Frequenz i

SAR_L den Basisgrenzwert für die SAR gemäss Tabelle 4

S_L den Basisgrenzwert für die Leistungsdichte gemäss Tabelle 5

S_i die Leistungsdichte bei der Frequenz i .

Bei der Anwendung der Basisbegrenzungen in der Praxis sollen bezüglich der Referenzwerte für die Feldstärken die folgenden Summenkriterien angewendet werden.

Hinsichtlich der Wirkungen induzierter Stromdichten und elektrischer Erregung - relevant für Frequenzen bis 10 MHz - sollen für die Feldstärken die folgenden beiden Bedingungen angewendet werden:

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

und

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

Dabei bezeichnen

E_i die elektrische Feldstärke bei der Frequenz i

$E_{L,i}$ den Referenzwert für die elektrische Feldstärke gemäss Tabelle 6 und 7

H_j die magnetische Feldstärke bei der Frequenz j

$H_{L,j}$ den Referenzwert für die magnetische Feldstärke gemäss Tabelle 6 und 7.

a beträgt 610 Vm^{-1} für berufliche Exposition und 87 Vm^{-1} für die Exposition der Bevölkerung

b beträgt 24.4 Am^{-1} ($30.7 \text{ }\mu\text{T}$) für berufliche Exposition und 5 Am^{-1} ($6.25 \text{ }\mu\text{T}$) für die Exposition der Bevölkerung.

Es werden beim elektrischen Feld oberhalb von 1 MHz und beim magnetischen oberhalb von 65 kHz die konstanten Werte a bzw. b eingesetzt, weil die induzierten Stromdichten die Basis für die Summierung bilden. Dieses Kriterium darf nicht mit thermischen Kriterien vermischt werden, welche die Basis für $E_{L,i}$ oberhalb von 1 MHz und für $H_{L,j}$ oberhalb von 65 kHz darstellen (gemäss Tabelle 6 und 7).

Hinsichtlich thermischer Wirkungen - relevant oberhalb von 100 kHz - sollen für die Feldstärken die beiden folgenden Bedingungen angewendet werden:

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

und

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

Dabei bezeichnen

- E_i die elektrische Feldstärke bei der Frequenz i
 $E_{L,i}$ den Referenzwert für die elektrische Feldstärke gemäss Tabelle 6 und 7
 H_j die magnetische Feldstärke bei der Frequenz j
 $H_{L,j}$ den Referenzwert für die magnetische Feldstärke gemäss Tabelle 6 und 7.
 c beträgt $610 / f \text{ Vm}^{-1}$ (f in MHz) für berufliche Exposition und $87 / f^{1/2} \text{ Vm}^{-1}$ für die Exposition der Bevölkerung
 d beträgt $1.6 / f \text{ Am}^{-1}$ (f in MHz) für berufliche Exposition und $0.73 / f \text{ Am}^{-1}$ für die Exposition der Bevölkerung.

Für Ströme in den Gliedmassen und Berührungsströme sollen die folgenden Anforderungen angewendet werden:

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

Dabei bezeichnen

- I_k den Strom pro Gliedmasse bei der Frequenz k
 $I_{L,k}$ den Referenzwert für den Strom in den Gliedmassen gemäss Tabelle 9
 I_n den Berührungsstrom bei der Frequenz n
 $I_{C,n}$ den Referenzwert für den Berührungsstrom bei der Frequenz n gemäss Tabelle 8.

Den obenstehenden Summenformeln liegen worst-case Annahmen über die Felder der einzelnen Quellen zugrunde. In typischen Immissionsituationen können daher weniger strenge Begrenzungen als gemäss den obigen Formeln für die Referenzwerte ausreichend sein.

Schutzmassnahmen

Die ICNIRP merkt an, dass die Verantwortung für die Einhaltung aller Aspekte dieser Richtlinie bei denjenigen Industriezweigen liegt, welche Immissionen elektrischer und magnetischer Felder erzeugen.

Zu den Schutzmassnahmen für Arbeitskräfte gehören technische und administrative Massnahmen, persönliche Schutzprogramme und medizinische Überwachung (ILO 1994). Wenn durch Expositionen am Arbeitsplatz die Basisgrenzwerte überschritten werden, müssen geeignete Schutzmassnahmen getroffen werden. In einem ersten Schritt sollten wo immer möglich technische Massnahmen zur Reduktion der Feldemissionen von Geräten getroffen werden. Dazu gehören ein gutes Sicherheitskonzept und, wo nötig, der Einbau von automatischen Abschaltssystemen oder vergleichbaren Schutzvorrichtungen.

Administrative Massnahmen, wie beispielsweise Zutrittsbeschränkungen oder der Einsatz von akustischen und optischen Warnhinweisen, sollten in Kombination mit technischen Massnahmen ergriffen werden. Persönliche Schutzmassnahmen wie Schutzanzüge können zwar unter gewissen Umständen nützlich sein; sie sollten aber erst als letzte Möglichkeit in Betracht gezogen werden, um die Sicherheit der Arbeitskräfte zu gewährleisten. Technische und administrative Massnahmen sollten wo immer möglich an erster Stelle stehen. Auf jeden Fall ist darauf zu achten, dass die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden, auch wenn Personen zum Schutz vor Hochfrequenz-Shocks und -verbrennungen beispielsweise mit isolierenden Handschuhen ausgestattet werden; diese Isolation schützt nämlich nur vor den indirekten Wirkungen der Felder.

Mit Ausnahme von Schutzanzügen und weiteren persönlichen Schutzmassnahmen können zum Schutz der Bevölkerung die gleichen Massnahmen eingesetzt werden, wenn Anhaltspunkte dafür bestehen, dass die Referenzwerte für die Bevölkerung überschritten werden. Wichtig ist auch, dass Verfahren erarbeitet und eingeführt werden, mit denen

- Beeinflussungen von medizintechnischen Einrichtungen und Geräten (einschliesslich Herzschrittmachern)
- die Auslösung von elektro-explosiven Zündvorrichtungen
- Feuer und Explosionen, ausgelöst durch die Entzündung brennbarer Materialien durch Funken aufgrund von induzierten Strömen, Berührungsströmen oder Funkenüberschlägen

vermieden werden können.

Literaturreferenzen

- 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.
- DIN VDE 0848, Teil 1, Sicherheit in elektromagnetischen Feldern, Mess- und Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag, Berlin, 1995.
- 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 Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. Health Physics 66: 100-106; 1994.
- 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.
- 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 of 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 radiofrequency fields. Washington, DC, National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 119; 1993.
- 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.; Cardis, E. Criteria for EMF health risk assessment. *Rad. Protect. Dosim.*; 72:305-312; 1997.

Repacholi, M.H.; Stolwijk, J.A.J. Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. *Rad. Protect. Austral.*; 9:79-84; 1991.

Stuchly, M.A.; Xi, W. Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields. *Phys. Med. Biol.*; 39:1319-1330; 1994.

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.

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.