

Bewertungs- zum Schutz v Fel

J.H. Bernhardt

Beurteilung der wissenschaftlichen Litera

Gesundheitsbezogene Richtlinien zum Schutz der Gesundheit vor elektromagnetischen Feldern (EMF) erfordern die Bewertung der gesundheitlich nachteiligen Wirkungen einer Exposition durch EMF auf der Basis des fundierten wissenschaftlichen und medizinischen Wissens. Eine solche Bewertung muss frei von wirtschaftlichen und politischen Interessen sein. Die internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP), in der als wissenschaftlich unabhängiger Organisation alle relevanten Disziplinen vertreten sind, ist dafür qualifiziert, die Aufgabe der Risikobewertung gemeinsam mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) durchzuführen. ICNIRP ist die formal von der WHO, der ILO und der EU anerkannte regierungsunabhängige Organisation (NGO) für den Schutz der Gesundheit vor einer Exposition mit nichtionisierender Strahlung (NIR). Die Abstimmung ihrer Empfehlungen erfolgt mit den vier ständigen Ausschüssen und den beratenden Experten der Kommission, mit den der IRPA (International Radiation Protection Assoziation) angeschlossenen nationalen Verbänden und über zusätzliche Experten. Der Beitrag fasst die Kriterien zur Begutachtung der wissenschaftlichen Literatur zusammen, geht auf die Charakterisierung der Wirkungen und der Exposition ein und beschreibt die Entwicklung von Richtlinien zur Begrenzung der Exposition.

grundsätze der ICNIRP für elektromagnetischen felder

Entstehung und Entwicklung von Expositionsbegrenzungen

1. Einleitung

Der Internationale Strahlenschutzverband (International Radiation Protection Association, IRPA) übernahm 1974 durch Einsetzung einer Arbeitsgruppe „Nichtionisierende Strahlung“ die Verantwortung für Aktivitäten zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NIR). Aus dieser Arbeitsgruppe entstand später, anlässlich der IRPA-Tagung in Paris 1977, das Internationale Komitee für nichtionisierende Strahlung (International Non-Ionizing Radiation Committee, IRPA/INIRC). Anlässlich des IRPA-Kongresses in Montreal (Canada) wurde dieses Komitee 1992 in die unabhängige International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) überführt. ICNIRP begutachtet die wissenschaftliche Literatur über gesundheitliche Beeinträchtigungen nach einer Exposition durch NIR. In Zusammenarbeit mit der Welt-

gesundheitsorganisation (World Health Organization, WHO) haben IRPA/INIRC bzw. ICNIRP und WHO Berichte über Umwelt- und Gesundheitskriterien für nichtionisierende Strahlung veröffentlicht. Die Berichte enthalten einen Überblick über die physikalischen Eigenschaften, Messungen und Methoden, Quellen und Anwendungen von NIR, eine Übersicht über die verfügbaren Standards und deren Begründungen sowie Bewertungen der gesundheitlichen Risiken der Exposition durch NIR. Diese Kriterien-Dokumente sowie zusätzliche, jeweils aktuelle Übersichten bilden die wissenschaftliche Datenbasis für die Entwicklung von Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition durch NIR sowie für Stellungnahmen über aktuelle Fragen zum Schutz vor NIR. Darüber hinaus werden in Zusammenarbeit mit dem internationalen Arbeitsamt



(International Labour Office, ILO) Leitlinien für den Arbeitsschutz entwickelt. Weitere Informationen über ICNIRP sowie eine Zusammenstellung aller Publikationen können der Internet Seite www.icnirp.org entnommen werden.

Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition sollten auf dem gesicherten wissenschaftlichen und medizinischen Wissen beruhen und frei von wirtschaftlichen und politischen Interessen sein. ICNIRP als unabhängige wissenschaftliche Organisation, die alle relevanten wissenschaftlichen Disziplinen umfasst, ist dazu qualifiziert, die Bewertung möglicher gesundheitsschädlicher Wirkungen als Folge einer Exposition durch NIR durchzuführen. ICNIRP ist die formal anerkannte nicht staatliche Organisation (NGO) zum Schutz vor nichtionisierenden Strahlen für die WHO, für die ILO sowie für die Europäische Union (EU). ICNIRP unterhält eine enge Verbindung und Beziehung zu internationalen Gremien, die mit dem Schutz vor NIR befasst sind. Die kritische Beurteilung der Arbeitsergebnisse von ICNIRP umfasst die ständigen Ausschüsse und die beratenden Experten der Kommission sowie weitere Sachverständige. Das Abstimmungsverfahren ist umfassend und schließt die nationalen Gesellschaften der IRPA (in Deutschland Fachverband für Strahlenschutz) und andere weltweite Organisationen und unabhängige Wissenschaftler ein. ICNIRP hat allgemeine Grundsätze zum Schutz vor NIR entwickelt, die im Frühjahr 2002 veröffentlicht wurden und die hier zusammengefasst werden [1].

2. Der Bewertungsprozess

Der Bewertungsprozess, wie er von ICNIRP benutzt wird, besteht aus drei Schritten. Es ist unvermeidlich, dass Teile dieses Prozesses einer wissenschaftlichen Beurteilung unterliegen, und dass Einzelheiten des Prozesses mit der behandelten Fragestellung variieren können. Deshalb ist die folgende Beschreibung eher als Gesamtrichtlinie anzusehen, und nicht als strenge Regel. Die drei Schritte sind folgende:

- Zunächst erfolgt die Beurteilung einzelner Studien im Hinblick auf ihre Relevanz auf Gesundheitsbeeinträchtigungen sowie auf die Qualität der verwendeten Methoden. International anerkannte Qua-

litätskriterien dienen als Richtschnur für diese Beurteilung. Diese können zum Ausschluss einiger Studien vor einer weiteren Verwendung führen oder zu einer Zuordnung unterschiedlicher Gewichtung der Studien, abhängig von ihrer methodischen Qualität.

- Für jede zu beurteilende Gesundheitsbeeinträchtigung ist eine Begutachtung aller relevanten Informationen erforderlich. Zunächst erfolgt die Begutachtung getrennt für epidemiologische Untersuchungen, für Laborstudien an Freiwilligen, für Tierstudien und für in vitro Studien, mit weiterer Unterteilung entsprechend der zu prüfenden Hypothese.
- Schließlich ist es erforderlich, die Ergebnisse dieser Schritte in einer Gesamtbeurteilung zusammenzufassen, einschließlich einer Bewertung der Konsistenz der Humandaten, der tierexperimentellen Daten und der in vitro Daten.

In Bezug auf die Qualität wissenschaftlicher Arbeiten orientiert sich ICNIRP an den anerkannten Qualitätsstandards für gute Laborpraxis. Erforderlich ist dabei die Erfüllung von Mindestanforderungen an Objektivität, Kausalität und Reproduzierbarkeit [2,3]. Ein wichtiger Anhaltspunkt für die Güte eines Forschungsberichtes ist bereits, ob die Arbeit in einer anerkannten Fachzeitschrift publiziert wurde, die einem Begutachtungsprozess durch andere Wissenschaftler unterliegt (peer-review). In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass Erfahrungsberichte, wie z. B. Fallberichte mit Patienten, von ihrer Art her häufig nicht geeignet sind, einen ursächlichen Zusammenhang herzustellen, weil sie den Mindestanforderungen an Objektivität und Reproduzierbarkeit nicht genügen. Darüber hinaus sind viele Erfahrungsberichte nicht ausreichend dokumentiert und oft von subjektiven Eindrücken geprägt [4]. Sie können jedoch Anlass sein, wissenschaftliche Forschung durchzuführen. Wenn Datenmaterial über wissenschaftliche Informationen für die Bewertung gesundheitlicher Risiken herangezogen wird, kann die Verwendung anerkannter Qualitätskriterien bei der Beurteilung zum Vertrauen beitragen, dass die Ergebnisse und Schlussfolgerungen für eine Bewertung gesundheitlicher Beeinträchtigungen bei einer Exposition durch EMF ver-

wendbar sind. Einige wesentliche Qualitätskriterien für laborexperimentelle Untersuchungen, epidemiologische Studien sowie für Untersuchungen an Freiwilligen sind in [I] zusammengefasst.

3. Grundsätze bei der Beurteilung gesundheitlicher Risiken

3.1 Charakterisierung der Wirkungen

Die WHO definiert *Gesundheit als Zustand eines vollständigen physischen, geistigen und sozialen Wohlbefindens und nicht bloß einer Abwesenheit von Krankheit oder Schwäche*. Es müssen daher Kriterien entwickelt werden, um die durch eine EMF Exposition verursachten biologischen Wirkungen zu identifizieren, die als Gefahr für die menschliche Gesundheit, wie sie die WHO definiert, betrachtet werden können. In diesem Zusammenhang muss eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Schritten bei der Abfolge der Ereignisse nach einer EMF Exposition, nämlich der physikalischen Wechselwirkung, den biologischen Wirkungen, den wahrnehmbaren Effekten und echten Gefahren vorgenommen werden. Insbesondere muss die Qualität der biologischen Wirkungen beurteilt werden. Biologische Wirkungen können – müssen jedoch nicht – aktive Reaktionen des Körpers hervorrufen. Nachfolgend sind einige Definitionen aufgelistet, die bei der Bewertung von Wechselwirkungen, biologischen Wirkungen und gesundheitlichen Gefahren einer EMF Exposition hilfreich sein können:

- Eine Wechselwirkung als Folge einer Exposition durch EMF erfolgt je nach Frequenz durch Kraftwirkungen auf geladene Teilchen oder durch induktive und kapazitive Kopplung. Solche Wechselwirkungen können zu einer physikalischen Störung führen.
- Eine biologische Wirkung ist eine nachweisbare Veränderung in der Funktion oder in der Struktur oberhalb des molekularen Bereichs oder eine physiologische Veränderung. Lebende Systeme reagieren auf viele Reize als Teil des Lebensprozesses, solche Reaktionen sind Beispiele für biologische Wirkungen.
- Expositionen durch EMF, die zu messbaren biologischen Wirkungen führen, jedoch innerhalb des Nor-

malbereiches der physiologischen Kompensation des Körpers bleiben und das physische und geistige Wohlbefinden des Menschen nicht herabsetzen, sollten als nicht gefährlich betrachtet werden.

- EMF Expositionen, die zu biologischen Wirkungen außerhalb des Normalbereiches für die Kompensation durch den Körper führen, können als tatsächliche oder mögliche Gesundheitsgefahr angesehen werden.
- EMF Expositionen, die zu biologischen Wirkungen führen, welche die Fähigkeit eines Individuums vermindern, seine Funktionen in geeigneter Weise durchzuführen oder sich von einem Reiz zu erholen, sollten als gesundheitliche Gefahr angesehen werden.
- EMF Expositionen, die zu subjektiven Wirkungen führen, die klar bewiesen werden können (d.h., die Untersuchungen wurden in einer wissenschaftlichen Art und Weise durchgeführt, die Ergebnisse sind statistisch signifikant und weisen auf einen kausalen Zusammenhang hin) und die das physische und geistige Wohlbefinden in einer Person herabsetzen können, sollten als gesundheitliche Gefahr angesehen werden.

ICNIRP Richtlinien haben in erster Linie das Ziel, gesundheitlich nachteilige Wirkungen als Folge einer EMF Exposition zu beseitigen, wie sie in den letzten drei oben genannten Punkten aufgeführt wurden. Da gesundheitlich nachteilige Konsequenzen nach einer Exposition durch EMF über einen weiten Bereich von trivial bis lebensbedrohend variieren können, ist eine ausgewogene Beurteilung erforderlich, bevor über Begrenzungen der Exposition entschieden wird.

3.2 Beziehung zwischen biologisch wirksamen Größen und Wirkungen

Ein physikalisches Agens muss mit einem biologischen Objekt in Wechselwirkung treten, um einen biologischen Effekt zu erzeugen. Das äußere Agens und die biologischen Endpunkte sind in der Regel direkt messbar, die entscheidende Wechselwirkung beim Objekt normalerweise nicht. Es sind die Natur und die Wirksamkeit dieser Wechselwirkung (z. B. die



Induktion eines elektrischen Stromes), welche den biologischen Effekt bestimmen. Daher muss die äußere Exposition in eine biologisch wirksame Größe überführt werden, welche die Wirksamkeit charakterisiert, mit der ein bestimmter biologischer Effekt verursacht wird. Daraus ergibt sich, dass verschiedene Arten von Wirkungen durch verschiedene biologisch wirksame Größen charakterisiert werden. Dies kann deutlich in verschiedenen Teilen des NIR-Spektrums gesehen werden. Zusätzlich können verschiedene Wirkungen innerhalb eines NIR-Spektralbereiches durch verschiedene biologisch wirksame Größen charakterisiert werden. Ein gutes Verständnis der grundlegenden Wechselwirkung und eine dazu gehörige genaue Definition der biologisch wirksamen Größe sind erforderlich, wenn Ergebnisse aus tierexperimentellen oder in vitro Experimenten benutzt werden, um mögliche Reaktionen beim Menschen zu beurteilen. Eine biologische Wirkung kann aus einem von zwei Prozessen resultieren: deterministisch oder stochastisch. Bei ersterem ist die Stärke einer Wirkung mit dem Ausmaß der Exposition verknüpft und es kann

eine Schwelle definiert werden. Ein stochastischer Prozess, auf der anderen Seite, ist einer, bei dem die Exposition die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ereignisses (den biologischen Effekt) bestimmt, aber nicht die Stärke der Wirkung. Im Prinzip erfordert diese Unterscheidung das Verständnis des zu Grunde liegenden Wirkungsmechanismus. Eine andere wichtige Unterscheidung bei Wirkungen ist, dass einige eine Schwelle haben (d. h. ein Mindestmaß einer biologisch wirksamen Größe muss zur Anwendung kommen, bis der Effekt auftritt), bei anderen ist dies nicht der Fall. Zusätzlich können verschiedene Reparatur- und Schutzprozesse Wirkungen einer Exposition eliminieren oder erheblich mildern. Solche Prozesse können auf molekularer, zellulärer, Organ- oder Organismus-Ebene eintreten. Gesundheitsbeeinträchtigungen, die am deutlichsten als Konsequenz einer EMF Exposition beim Menschen gesichert sind, sind solche, die sich kurzzeitig entwickeln, d.h. sie manifestieren sich kurz nach einer akuten Exposition (bis zu einigen Tagen oder Wochen). Dies steht im Gegensatz zu Wirkungen, die nur

nach einer chronischen Exposition und/oder nach einer langen Verzögerung auftreten.

Wenn verschiedene Wirkungen auftreten, kann es möglich sein, sie in der Reihenfolge ihres Auftretens in Abhängigkeit von der Expositionsstärke anzuordnen. Der kritische Effekt ist der nachgewiesene gesundheitsschädliche Effekt, der bei der niedrigsten Exposition auftritt. In dieser Anordnung von Wirkungen und Definition kritischer Effekte kann es notwendig sein, zusätzliche Beurteilungen durchzuführen, die auf der Schwere der Wirkungen basieren.

3.3 Beurteilung der Daten

Da die Risikobewertung den Schutz der menschlichen Gesundheit zum Ziel hat, sollte sie auf Daten basieren, die aus Humanstudien abgeleitet wurden. Die Beziehung zwischen Exposition und gewissen kurzzeitigen biologischen Wirkungen kann manchmal aus Laborstudien an Freiwilligen abgeleitet werden, während Daten für Langzeitwirkungen beim Menschen nur aus epidemiologischen Studien abgeleitet werden können. Jedoch können, im Gegensatz zu ihrer Relevanz, die Ergebnisse epidemiologischer Studien selten genügende Beweise eines kausalen Zusammenhangs liefern ohne biologische Plausibilität oder unterstützende Daten aus experimentellen Untersuchungen, besonders dann, wenn die vermuteten Risiken klein sind.

Tierexperimentelle Untersuchungen sind wertvoll bei der Analyse der biologischen Effekte und der Mechanismen, da sie sich auf den ganzen Organismus beziehen, einschließlich aller relevanten in vivo Reaktionen. Tierexperimentelle Langzeitstudien sind nützlich, wenn gesundheitlich nachteilige Wirkungen beim Menschen betrachtet werden. Solche Untersuchungen können auch nützlich sein, um aufzuklären, ob ein kausaler Zusammenhang besteht. In vitro Studien können detaillierte Informationen über biophysikalische Mechanismen auf molekularer und zellulärer Ebene liefern.

Die Ergebnisse von Tier- und in vitro -Studien müssen gut verstanden sein, um sie auf den Menschen extrapolieren zu können. Vorausgesetzt, dass die Mechanismen im Zielorgan dieselben im Modell und im

menschlichen Körper sind, kann die Expositions-Wirkungsbeziehung, die im Modell gefunden wurde, für die Anwendung beim Menschen unter Benutzung der biologisch wirksamen Größe angepasst werden. Im Allgemeinen sind unterstützende Humandaten für eine vollständige Beurteilung der Relevanz der Ergebnisse von Tierstudien für die Gesundheit des Menschen von Bedeutung.

Auf Probleme bei klinischen Fallstudien wurde bereits hingewiesen.

Für die Gesamtbeurteilung muss eine Entscheidung getroffen werden, ob die betrachteten Daten die Identifizierung einer Expositionsgefahr erlauben, d.h. einer Gesundheitsbeeinträchtigung, verursacht durch eine Exposition durch EMF. Durch diese Identifizierung wird der Effekt „bestätigt“ in dem Sinne, wie er im nächsten Kapitel verwendet wird. Trotz des oben beschriebenen Bewertungsprozesses können in vergleichenden Beurteilungen der Literatur Unsicherheiten und Inkonsistenzen auftreten. Deshalb kann es erforderlich sein, dass diese Beurteilung zumindest teilweise auf wissenschaftlichen Bewertungen begründet ist. Für eine aktuelle Risikoabschätzung für die Allgemeinbevölkerung oder für eine spezifische Gruppe sollten die ausgesuchten Studien zusätzliche Informationen liefern wie

- die Definition einer biologisch wirksamen Größe, die mit dem Organ variieren kann,
- einer Expositions-Wirkungsbeziehung, und die Identifizierung einer Schwelle, wenn möglich,
- Expositionsverteilung und Identifizierung von Untergruppen mit hohen Expositionen,
- Unterschiede in den Empfindlichkeiten innerhalb einer Personengruppe.

4. Grundsätze der Entwicklung von Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition

Als Folge der Bewertung der Literatur kann es möglich sein, Gesundheitsbeeinträchtigungen auf Grund einer EMF Exposition zu identifizieren, die als gut bestätigt angesehen werden können. Die Existenz solcher bestätigten EMF Effekte bildet das Grundprinzip für die Expositionsrichtlinien von ICNIRP. Bei der Ent-

wicklung der Richtlinien betrachtet ICNIRP direkte und indirekte, akute und chronische gesundheitliche Effekte. Reduktionsfaktoren („Sicherheitsfaktoren“) werden verwendet, um Unsicherheiten in der wissenschaftlichen Datenbasis und biologische Variabilitäten bei der Reaktion zu berücksichtigen.

4.1 Die Natur der Expositions-Wirkungsbeziehungen

Im Idealfall kann, wenn ein Gefahrenpotential identifiziert wird und ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Exposition durch EMF und der Wirkung bestimmt werden kann, eine Empfehlung zur Begrenzung der Exposition entwickelt werden. Quantitative Zusammenhänge können die Form von Schwellenwerten und/oder von Expositions-Wirkungsbeziehungen haben. In diesen Fällen ist es möglich, den Expositionspegel anzugeben, unterhalb dessen die Gesundheitsbeeinträchtigung vermieden oder auf ein Maß reduziert werden kann, das definierbar ist. Solche Schwellenwerte bilden die Basis für ICNIRP's Expositionsbegrenzungen. Dabei werden geeignete Reduktionsfaktoren berücksichtigt (siehe unten). Wenn eine Gefahr als Folge einer Exposition durch EMF identifiziert wird, jedoch kein quantitativer Zusammenhang zwischen Exposition und gesundheitsschädlicher Wirkung ableitbar ist, können andere Strategien sinnvoll sein, um den Effekt zu vermeiden oder das Risiko zu begrenzen, *ohne* einen Grenzwert zu definieren. Die Akzeptanz solcher Risiken basiert jedoch auch auf sozialen und ökonomischen Überlegungen, die außerhalb der Verantwortung von ICNIRP liegen. Nationale Autoritäten, die für das Risikomanagement verantwortlich sind, können weitere Ratschläge über Strategien liefern, den Effekt zu vermeiden oder das Risiko zu begrenzen.


Das Vorhandensein seiner akuten Wirkung erleichtert die Entwicklung einer Empfehlung zur Begrenzung der Exposition, da die Gefahrenidentifizierung einfacher ist und eine Ursache-Wirkungs-Beziehung überzeugender entwickelt werden kann. Die quantitativen Zusammenhänge können leichter angegeben und bewertet werden. Wenn ein gesundheitsschädlicher Effekt durch eine EMF Exposition mit einer beträchtlichen zeitlichen Verzögerung erfolgt, kann die Gefahrenidentifi-

zierung und die wissenschaftliche Bewertung erschwert sein, besonders bei Abwesenheit eines bekannten Wirkungsmechanismus. Häufig kann im Falle einer identifizierten verzögerten Gefahr ein quantitativer Zusammenhang zwischen Exposition und Wirkung nur schwer erarbeitet werden, besonders dann, wenn das Expositionsmodell retrospektiv nicht bestimmt werden kann. Zusätzliche Überlegungen erfordern auch die Wirkung wiederholter schwacher akuter Wirkungen, wie z. B. Wahrnehmungseffekte, welche sich zu einem möglichen gesundheitsschädlichen Effekt über lange Zeit aufsummieren können. Grundsätzlich schützen die ICNIRP Richtlinien gegen die kritischen Effekte einer Exposition. Deshalb ist der Schutz auch gegen alle anderen Effekte gewährleistet, die bei höheren Expositionswerten auftreten. Der kritische Effekt ist jedoch mit einer spezifischen Definition der biologisch wirksamen Größe verknüpft, andere Effekte können unter anderen Expositionsbedingungen kritisch sein. Beispiele sind die Formulierungen von Expositionsbegrenzungen in Form von Spezifischer Energie Absorption (SA), Spezifischer Energie Absorptionsrate (SAR) oder induzierter Gewebestromdichte.

4.2 Charakterisierung der Exposition

Die biologische wirksame Größe beschreibt die Wirksamkeit, mit der eine äußere Exposition einen bestimmten biologischen Effekt verursacht. Diese quantitative Beziehung zwischen äußeren messbaren Expositionen und dem biologisch wirksamen Parameter beim Zielgewebe ist einmalig für eine einzelne Expositionsbedingung. Deshalb kann für ein gegebenes Maß einer Exposition jede Änderung der Expositionsbedingung die Wirksamkeit der Wechselwirkung beeinflussen, mit der ein bestimmter biologischer Effekt verursacht wird.

Bei einigen Situationen (beispielsweise wenn Effekte an der Körperoberfläche betrachtet werden), kann die biologisch wirksame Größe passend und direkt durch die Messung der äußeren Exposition bewertet werden. Dies ist generell der Fall für optische Strahlung und für Mikrowellen mit Frequenzen oberhalb von etwa 10 GHz sowie für elektrische Felder niedri-



ger Frequenzen. Für Expositionen durch niederfrequente Magnetfelder oder für elektromagnetische Felder höherer Frequenzen ist dies nicht der Fall. In solchen Fällen erfolgt eine konservative Abschätzung der Beziehung zwischen der identifizierten biologisch wirksamen Größe und der äußeren, leichter messbaren äußeren Exposition. Dies kann durch mathematische Modellierung oder durch eine Extrapolation aus den Ergebnissen von Laboruntersuchungen bei bestimmten Frequenzen unter konservativen Annahmen erfolgen.

Die generelle Strategie von ICNIRP ist es, eine Basisbegrenzung in Form der biologisch wirksamen Größe zu definieren und dann, wenn notwendig und wo möglich, diese mit einem Referenzwert in Form einer direkt messbaren äußeren Exposition zu verknüpfen (z. B. Leistungsflussdichte, Feldstärke, [5]). Auf diese Weise kann eine Begrenzung (Referenzwert) in Form einer äußeren Exposition ausgedrückt werden. Dieses Vorgehen erlaubt die Entwicklung gerechtfertigter Expositionsbegrenzungen, basierend auf biologisch relevanten Basisbegrenzungen, jedoch praktisch umgesetzt durch abgeleitete Grenzwerte (Referenzwerte). Bei der von ICNIRP entwickelten Strategie sind die abgeleiteten Grenzwerte (Referenzwerte) immer restriktiver als die Basisbegrenzungen, da die Zusammenhänge zwischen diesen bei den Größen für Situationen entwickelt wurden, die einer maximalen Kopplung zwischen den externen Feld- oder Strahlungsgrößen und der exponierten Person entsprechen (worst case). Als Folge ergibt sich, dass die Basisbegrenzungen nicht überschritten sind, wenn die abgeleiteten Grenzwerte eingehalten sind. Auf der anderen Seite hat dies zur Folge, dass, wenn die abgeleiteten Grenzwerte überschritten sind, dies nicht notwendigerweise bedeutet, dass auch die Basisbegrenzungen überschritten sind. Ob dies der Fall ist, muss durch eine detailliertere Untersuchung geprüft werden.

Die Anwendung dieses Verfahrens hat mehrere Vorteile:

- Die Basisbegrenzungen in Form biologisch wirksamer Größen haben einen engen Zusammenhang mit den biologischen Mechanismen, während

- die abgeleiteten Grenzwerte leichter überprüft werden können und leichter zu den Emissionswerten von Geräten oder Anlagen in Beziehung gesetzt werden können.

Zusätzlich werden komplizierte Variationen bei dosimetrischen Zusammenhängen für die Praxis des Schutzes vor EMF vermieden. Für den Erfolg dieses Prozesses ist es jedoch wichtig, dass die Expositionsmetrik sich als wirksam erweist und dass die biologischen Wirkungsmechanismen, die für die gesundheitsschädlichen Effekte relevant sind, verstanden und allgemein anerkannt sind.

Abgeleitete Grenzwerte werden also für Zwecke der praktischen Expositionsbewertung angegeben, um sicherzustellen, dass die Basisbegrenzungen nicht überschritten werden. ICNIRP empfiehlt die Anwendung dieser abgeleiteten Grenzwerte als generelle Richtlinie einer Expositionsbegrenzung für Arbeitnehmer und für die Allgemeinbevölkerung bei Expositionen durch nichtionisierende Strahlung.

Abhängig vom spezifischen biophysikalischen Mechanismus beim Wechselwirkungsprozess kann die Expositionsbedingung, die für den biologischen Effekt relevant ist, quantitativ entweder in Form eines Momentanwertes (oder der zeitlichen Ableitung davon) des biologisch wirksamen Parameters angegeben werden oder durch dessen zeitlich integrierten Wert. Wirkungsmechanismen, Gesundheitsbeeinträchtigungen, biologisch wirksame physikalische Größen und korrespondierende äußere Expositionsparameter (Referenzwerte) für verschiedene Teile des EMF Spektrums sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

4.3 Charakterisierung der zu schützenden Personen

In einigen Fällen ist es ratsam, zwischen Mitgliedern der Normalbevölkerung und solchen Personen zu unterscheiden, die aufgrund ihrer Arbeit oder während der Durchführung ihrer Arbeit exponiert sind (berufliche Exposition). In ihren Richtlinien definiert ICNIRP nur sehr allgemein die berufliche Exposition und die der Öffentlichkeit. Für die Anwendung der Richtlinien für spezielle Situationen ist es die Auffassung der ICNIRP, dass die zuständigen Autoritäten in jedem Land in Übereinstimmung mit den be-

Part of EMF spectrum	Relevant mechanism of Interaction	Adverse effect	Biologically effective physical quantity	External exposure, reference level
Static electric fields	Surface electric charges	Annoyance of surface effects, shock	External electric field strength	Electric field strength
Static magnetic fields	Induction of electric fields in moving fluids and tissues	Effects on the cardiovascular and central nervous system	External magnetic flux density	Magnetic flux density
Time-varying electric Fields (up to 10 MHz)	<ul style="list-style-type: none"> • Surface electric charges • Induction of internal electric fields and currents 	Annoyance of surface effects, Electric shock and burn Stimulation of nerve and muscle cells; effects on nervous systems functions	<p>External electric field strength</p> <p>Tissue electric field strength or current density</p>	Electric field strength
Magnetic fields (up to 10 MHz)	Induction of internal electric fields and currents	Stimulation of nerve and muscle cells; effects on nervous systems functions	Tissue electric field strength or current density Magnetic flux density	Electric field strength
Electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)	<ul style="list-style-type: none"> • Induction of internal electric fields and currents; Absorption of energy • > 10 GHz: Surface absorption of energy • Pulses < 30 us, 300 MHz to 6 GHz, thermo-acoustic wave propagation 	<p>Excessive heating, electric shock and burn</p> <p>Excessive surface heating</p> <p>Annoyance from microwave hearing effect</p>	<p>Specific energy absorption rate</p> <p>Power density</p> <p>Specific energy absorption</p>	<p>Electric field strength Magnetic field strength Power density Power density</p> <p>Peak electric field strength; Peak magnetic field strength</p>

Table 1: Relevant mechanisms of interaction, adverse effects, biologically effective physical quantities and reference levels used in different Parts of the electromagnetic field spectrum

stehenden nationalen Regeln oder Gesetzen bestimmen sollten, ob die Expositionsbegrenzungen für die berufliche Exposition oder für die Öffentlichkeit angewandt werden.

In einigen ICNIRP-Richtlinien sind die beruflichen Expositionsbegrenzungen höher angesetzt als die für die Öffentlichkeit. Gesundheitsbezogene Richtlinien für die berufliche Exposition haben zum Ziel, gesunde Erwachsene zu schützen, die bei der Durchführung ihrer Arbeit exponiert werden. Die am Arbeitsplatz exponierten Personen sind im allgemeinen unter bekannten Bedingungen exponiert und haben gelernt, sich der eventuellen Gefahr bewusst zu sein, und entsprechende Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen. Die Exposition ist auf die Arbeitszeit begrenzt und einer Kontrolle unterworfen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einer medizinischen Überwachung. Richtlinien für die Normalbevölkerung sollten auf breiteren Überlegungen basieren. Die Normalbevölkerung setzt sich aus Personen jeglichen Alters und Gesundheitszustandes zusammen und kann besonders empfindliche Gruppen und Individuen einschließen. In vielen Fällen ist sich die Bevölkerung der Exposition nicht bewusst. Ferner kann von einzelnen Mitgliedern der Bevölkerung normalerweise nicht erwartet werden, dass sie Vorkehrungen treffen, um die Exposition zu verringern oder zu vermeiden. In den meisten Fällen sind diese Überlegungen jedoch quantitativ bisher unzureichend erforscht, so dass die zusätzlichen Reduktionsfaktoren für Richtlinien für die Allgemeinbevölkerung nicht mit wissenschaftlicher Genauigkeit abgeleitet werden können. Für Patienten, die sich einer diagnostischen oder therapeutischen Behandlung in medizinischen Einrichtungen unterziehen, können die Expositionen durch verschiedene NIR manchmal absichtlich sehr hoch sein. Eine Bewertung dieser Expositionen fällt jedoch in die medizinische Bewertung von Nutzen und Risiko. Deshalb beziehen sich Richtlinien zur Begrenzung einer Exposition normalerweise nicht auf Patienten, bei dem ein Nutzen der Exposition erwartet wird. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass für das medizinische Personal, welches die Behandlung durchführt oder in den Räumlichkeiten arbeitet, ebenso für

andere Personen, die diese medizinischen Einrichtungen besuchen, die Richtlinien für berufliche Exposition Anwendung finden.

4.4 Die Anwendung von Reduktionsfaktoren als Vorsichtsmaßnahme

Ein Reduktionsfaktor ist das Verhältnis zwischen einem höheren Schwellenwert für eine Gesundheitsbeeinträchtigung als Folge einer EMF Exposition und einem niedrigeren Richtwert zum Schutz gegen diese Beeinträchtigung. Reduktionsfaktoren sollten sich auf die Genauigkeit der wissenschaftlichen Daten beziehen und den Umfang der bestätigten Informationen über biologische und gesundheitliche Wirkungen einer Exposition durch EMF wiedergeben. Demnach können solche Reduktionsfaktoren als Vorsichtsmaßnahmen gegen verschiedene Ungenauigkeiten in den Richtlinien oder ihrer praktischen Anwendung angesehen werden, den ungenauen Kenntnisstandes über Schwellenwerte oder Intensitäts-Wirkungsbeziehungen (einschließlich individueller Variationen), ungenauer



Kenntnis bezüglich der Extrapolationen beobachteter Wirkungen innerhalb einiger Frequenz- oder Wellenlängenbereiche, oder ungenauen Expositionsbewertungen. Daher können Reduktionsfaktoren als praktische Methode angesehen werden, sowohl Unsicherheiten als auch Variabilitäten zu berücksichtigen. ICNIRP ist jedoch der Auffassung, dass Überlegungen über andere Ungenauigkeiten, wie Messunsicherheiten bei Expositionsbewertungen, in den Zuständigkeitsbereich internationaler Gremien fallen, die für die technische Standardisierung zuständig sind, oder auch in den Zuständigkeitsbereich nationaler Regulierungsorganisationen. Es sei noch angemerkt, dass die Anwendung von Referenzwerten in vielen Fällen in einer zusätzlichen Reduktion resultiert, da sie mit den Basisbegrenzungen nur unter maximaler Absorption oder Kopplung verknüpft sind.

Als Folge unzureichender Informationen über biologische und gesundheitliche Wirkungen einer Exposition durch EMF gibt es keine strenge wissenschaftliche Basis, um genaue Reduktionsfaktoren abzuleiten. Im allgemeinen basieren Reduktionsfaktoren auf einer konservativen Werteabschätzung durch Experten. In Fällen, bei denen die Zusammenhänge zwischen den Expositionsgrößen und den resultierenden Wirkungen genauer definierbar sind, sind weniger konservative Reduktionsfaktoren erforderlich. Beispiele dafür sind indirekte Wirkungen (z. B. als Folge von Körperströmen bei Berührung leitfähiger Objekte) oder viele Wirkungen im optischen Wellenlängenbereich. Der Unterschied zwischen niedrigeren Expositionsbegrenzungen für die Öffentlichkeit und höheren Richtwerten für die berufliche Exposition, wie sie in einigen Teilen des NIR Spektrums verwendet werden, ergibt sich durch zusätzliche Sicherheitsfaktoren für die Öffentlichkeit aus Gründen, wie sie in Abschnitt 4.3 angegeben wurden. Ebenso wie die Beurteilung von Gesundheitsbeeinträchtigungen in der wissenschaftlichen Literatur sollte die Festlegung von Reduktionsfaktoren frei von wirtschaftlichen und politischen Interessen sein.

Die Reduktionsfaktoren sollten unter Berücksichtigung des derzeitigen Wissensstandes auch ausreichend für normale Variationen in individuellen Empfindlich-

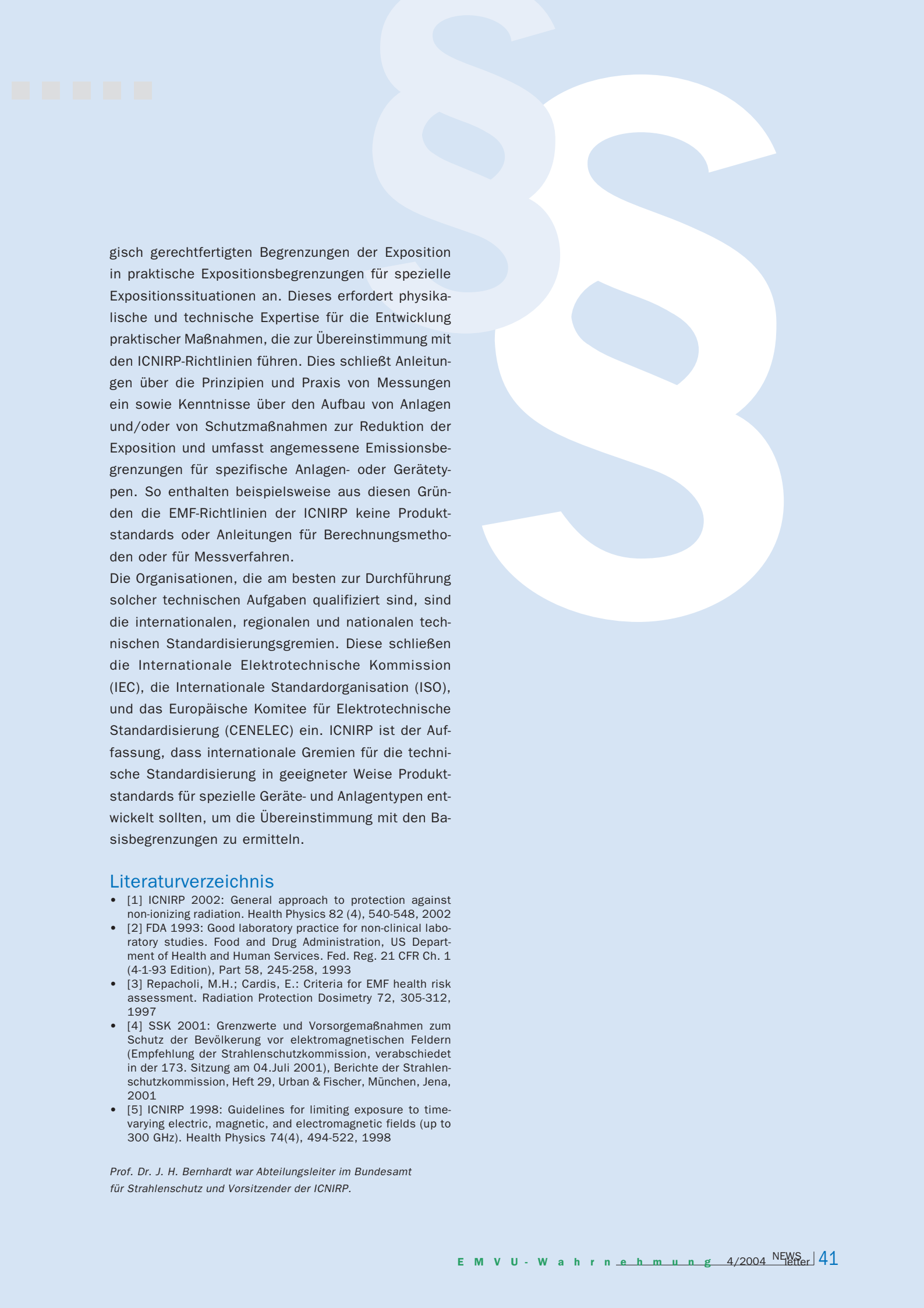
keiten sein. Dennoch können sie keine Sicherheit in Fällen einer extremen oder pathologischen Empfindlichkeit bieten. Solchen Personengruppen kann in Ergänzung zur Einhaltung der generellen Richtlinien individuelle Hilfestellung angeboten werden.

4.5 Praktische Umsetzung der Expositionsbegrenzungen

Die Bewertungen gesundheitsschädlicher Wirkungen einer Exposition durch EMF und ICNIRP's gesundheitsbezogene Richtlinien zur Begrenzung der Exposition durch EMF basieren auf bestätigten wissenschaftlichen Daten und sind frei von wirtschaftlichen und politischen Interessen. Als internationales wissenschaftliches Beratungsgremium berücksichtigt ICNIRP daher keine politischen, sozialen und ökonomischen Überlegungen in ihren Beratungsergebnissen.

Für manche vermuteten Gesundheitsbeeinträchtigungen, für deren Existenz zwar keine ausreichenden wissenschaftliche Nachweise vorliegen, für die aber in der Öffentlichkeit oder von Interessengruppen trotzdem zusätzliche Schutzmaßnahmen gefordert werden, gibt es einige Ansätze im Rahmen eines Risikomanagements. Diese Ansätze konzentrieren sich generell darauf, unnötige Expositionen durch die verdächtigsten Quellen zu reduzieren. ICNIRP weist jedoch auf die Notwendigkeit hin, dass die praktische Anwendung solcher Ansätze im Rahmen des Risikomanagements zur Verminderung einer Exposition nicht so begründet werden sollte, dass sie die wissenschaftlich begründeten Expositionsbegrenzungen unterläuft. Es ist die Auffassung der ICNIRP, dass die Durchführung der Prüfung der Übereinstimmung einer Exposition mit den Expositionsbegrenzungen sowie die Bewertung des sozialen und ökonomischen Einflusses in der Verantwortlichkeit der nationalen Regierungen und ihrer zuständigen Behörden liegt. Verschiedene wissenschaftliche Beratungsgremien können jedoch wichtige Hintergrundinformationen bereitstellen, wie z. B. über das Ausmaß einer Schädigung, die einer Exposition zugeschrieben wird, über das *Ausmaß* der Expositionen oder mögliche Risikogruppen usw..

ICNIRP erkennt jedoch die Notwendigkeit für technische Hilfestellungen bei der Umsetzung von biolo-



gisch gerechtfertigten Begrenzungen der Exposition in praktische Expositionsbegrenzungen für spezielle Expositionssituationen an. Dieses erfordert physikalische und technische Expertise für die Entwicklung praktischer Maßnahmen, die zur Übereinstimmung mit den ICNIRP-Richtlinien führen. Dies schließt Anleitungen über die Prinzipien und Praxis von Messungen ein sowie Kenntnisse über den Aufbau von Anlagen und/oder von Schutzmaßnahmen zur Reduktion der Exposition und umfasst angemessene Emissionsbegrenzungen für spezifische Anlagen- oder Gerätetypen. So enthalten beispielsweise aus diesen Gründen die EMF-Richtlinien der ICNIRP keine Produktstandards oder Anleitungen für Berechnungsmethoden oder für Messverfahren.

Die Organisationen, die am besten zur Durchführung solcher technischen Aufgaben qualifiziert sind, sind die internationalen, regionalen und nationalen technischen Standardisierungsgremien. Diese schließen die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC), die Internationale Standardorganisation (ISO), und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Standardisierung (CENELEC) ein. ICNIRP ist der Auffassung, dass internationale Gremien für die technische Standardisierung in geeigneter Weise Produktstandards für spezielle Geräte- und Anlagentypen entwickelt sollten, um die Übereinstimmung mit den Basisbegrenzungen zu ermitteln.

Literaturverzeichnis

- [1] ICNIRP 2002: General approach to protection against non-ionizing radiation. Health Physics 82 (4), 540-548, 2002
- [2] FDA 1993: Good laboratory practice for non-clinical laboratory studies. Food and Drug Administration, US Department of Health and Human Services. Fed. Reg. 21 CFR Ch. 1 (4-1-93 Edition), Part 58, 245-258, 1993
- [3] Repacholi, M.H.; Cardis, E.: Criteria for EMF health risk assessment. Radiation Protection Dosimetry 72, 305-312, 1997
- [4] SSK 2001: Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern (Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 173. Sitzung am 04. Juli 2001), Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 29, Urban & Fischer, München, Jena, 2001
- [5] ICNIRP 1998: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 74(4), 494-522, 1998

Prof. Dr. J. H. Bernhardt war Abteilungsleiter im Bundesamt für Strahlenschutz und Vorsitzender der ICNIRP.