

Umwelthygienische Fragen im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber radiofrequenten Wellen und Mikrowellen

Michael Kundi aus

Umwelt-Medizin-Gesellschaft 14. Jahrgang, Ausgabe 1/2001

Zum Schutz der menschlichen Gesundheit ist die Beschränkung auf das thermische Effektprinzip, wie es die Internationale Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung ICNIRP pflegt, nicht mehr haltbar. Es wird verwiesen auf die methodischen Mängel dieser Ableitung und auf die Fülle an wissenschaftlichen Daten, die biologische und gesundheitliche Effekte im nicht-thermischen Bereich belegen. Der Autor schlägt die Ableitung von vorläufigen Grenzwerten aus den vorliegenden Studien unter Anwendung von Sicherheitsfaktoren vor (*Red.*).

Einleitung

Obwohl es schon während des zweiten Weltkriegs Hinweise auf akute, durch hochfrequente (HF) EMF verursachte gesundheitliche Beeinträchtigungen gab, sah man keinen dringenden Handlungsbedarf, die Expositionen zu begrenzen. In erster Linie sah man ein Gesundheitsrisiko für Personen, die beruflich oder bei militärischen Anwendungen exponiert waren. Daher wurden die ersten Grenzwerte zur Begrenzung der Exposition an Arbeitsplätzen herausgegeben (ANSI 1966).

Während der 50er und 60er Jahre vermehrten sich aufgrund der Verbreitung von Radio- und Fernsehsendern weltweit die Quellen hochfrequenter Felder mit hohen Leistungen. Jedoch galt auch hier - wegen der normalerweise großen Entfernung zu Wohngebieten und der Höhe der Antennen - die Hauptsorge der beruflichen Exposition. Erst durch die steigende Verwendung von Mikrowellenherden seit den späten 60er Jahren wurde die Frage nach einem möglichen Risiko für die Allgemeinbevölkerung durch Leckstrahlung aufgeworfen.

In der westlichen Welt lag das Hauptaugenmerk auf der Gewebserwärmung durch Absorption elektromagnetischer Energie. Daher wurde ein Großteil der Forschungen der Untersuchung der Grundlagen dieses Vorgangs und den Parametern, die die Varianz der absorbierten Energie bestimmen, gewidmet. Gleichzeitig wurde die Dosimetrie entwickelt. In den späten 60er und beginnenden 70er Jahren wurden in einigen Oststaaten ebenfalls Expositionsgrenzwerte für Arbeitsplätze erlassen. Die darin enthaltenen Grenzwerte waren deutlich niedriger als die westlichen Standards. Die Ableitung basierte nicht nur auf der Gewebserwärmung, sondern auch auf Auswirkungen auf das Wohlbefinden und anderen Effekten, die aus Tierversuchen bekannt waren.

1971 erkannte die WHO die Notwendigkeit einer internationalen Zusammenarbeit und veranstaltete ein Arbeitsgruppentreffen in Den Haag. Es wurde empfohlen, den Schutz vor Gefahren durch die Exposition mit radiofrequenten Wellen und Mikrowellen im Bereich der nicht-ionisierenden Strahlung prioritär zu behandeln. Ein weiteres mit Unterstützung von der WHO veranstaltetes Symposium kam zum Ergebnis (1973), dass eine internationale Organisation die Forschung zu biologischen Effekten von HF EMF koordinieren und ein Programm zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung entwickeln sollte. Die internationale Strahlenschutzorganisation (IRPA) wurde damit betraut. 1981 wurde von einer WHO/IRPA Arbeitsgruppe die ersten Environmental Health Criteria zu radiofrequenten und Mikrowellen veröffentlicht (UNEP/WHO/IRPA 1981). Im Jahr 1992 ging aus der IRPA/INIRC eine unabhängige NGO, die ICNIRP (Internationale Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung) hervor. Seither dominiert die ICNIRP weltweit in Fragen zum Schutz

vor nicht-ionisierender Strahlung und bzgl. Der Grenzwertsetzung. Obwohl sie eine unabhängige Organisation ist, wurde ihr praktisch von der WHO und der ILO dieser Bereich überantwortet.

Die ICNIRP nahm den Vorschlag der IRPA aus dem Jahr 1984 auf, ausschließlich Kurzzeiteffekte durch die Absorption elektromagnetischer Energie und die dadurch auftretende Gewebserwärmung als Basis für die Grenzwertableitung im Bereich von 10 MHz bis 10 GHz heranzuziehen. Die Basisgrenzwerte der spezifischen Energieabsorptionsrate (SAR) für Ganzkörperexposition, die sich von einem Wert von 4 W/kg ableiten, der bereits 1984 festgesetzt worden war, blieben unverändert, obwohl seither zahlreiche Hinweise auf biologische und gesundheitlich relevante Effekte deutlich unterhalb dieses Wertes gesammelt wurden und experimentelle sowie epidemiologische Studien auf Schadwirkungen einer Langzeitexposition hinweisen.

Kritik an der Strategie der ICNIRP

Um die einmal getroffene Entscheidung, Kurzzeiteffekte durch Gewebserwärmung als die einzige Basis für die Ableitung von Grenzwerten zu verwenden, zu verteidigen, nimmt die ICNIRP Zuflucht in einer wissenschaftlich und ethisch fragwürdigen Strategie. Der Grund für diese verzweifelten Versuche könnte in der ungeheuren Komplexität der Expositionsbedingungen liegen, die von Richtlinien abgedeckt werden müssen. Seit Jahrzehnten ist bekannt, dass die Exposition gegenüber hohen Intensitäten hochfrequenter EMF zu einem Anstieg der Körpertemperatur führt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass biologische Systeme verlustbehaftete Dielektrika sind. Wenn elektromagnetische Wellen sich im Gewebe fortpflanzen, dann interagieren sie mit den Molekülen des Mediums und es findet eine Übertragung von Energie statt. Das Ergebnis ist eine Abschwächung des Feldes und eine Erhöhung der kinetischen Energie der Moleküle, die sich in einer Temperaturerhöhung niederschlägt. Es wurde nachgewiesen, dass hohe Intensitäten der Exposition entweder direkt infolge der Erwärmung zu gesundheitlich nachteiligen Effekten führen (Verbrennungen, Hämorrhagie, Gewebnekrosen) oder aufgrund eines Zusammenbruchs der systemischen oder lokalen Temperaturregulation. Sorgfältige Untersuchungen der Regulationsvorgänge und von Auswirkungen auf das Verhalten ergaben, dass eine Temperaturzunahme durch eine Exposition mit HF EMF, die 1°C übersteigt, zu einer Zunahme der Wahrscheinlichkeit unmittelbarer thermischer Effekte führen würde. Eine solche Temperaturzunahme würde dann auftreten, wenn ein ruhender Erwachsener einer SAR von etwa 4 W/kg eine halbe Stunde lang ausgesetzt wird. Deswegen scheint es plausibel zu sein, eine SAR von 4 W/kg als Grundlage für die Ableitung von Grenzwerten zu verwenden. Ein Vorteil dieser Philosophie liegt in der unmittelbaren Lösung des Problems der Komplexität der Expositionsbedingungen. Das geht darauf zurück, dass das Prinzip thermischer Effekte seinem Wesen nach ein Energieäquivalenzprinzip ist. Unabhängig von den unterschiedlichsten Expositionsparametern wird angenommen, dass verschiedene Expositionsbedingungen, denen die gleiche SAR zugeordnet ist, zu gleichen Effekten führen.

Obwohl im Prinzip die Übereinstimmung mit den Grenzwerten durch Messung der SAR sichergestellt werden muss, kann das für praktische Zwecke durch abgeleitete Grenzwerte (z.B. durch Messung der ungestörten Ersatzfeldstärke) geschehen. Diese abgeleiteten Grenzwerte werden aus den Basisgrenzwerten aufgrund der funktionalen Beziehung zwischen Expositionsparametern (z.B. der Frequenz der elektromagnetischen Wellen) und der SAR abgeleitet. Bei dieser Konzeption wurden jedoch eine Reihe von inhärenten Problemen übersehen:

*Die SAR ist eine Effektgröße, die aber praktisch nicht durch Messung an der exponierten Person bestimmt, sondern nur an Phantomen gemessen oder mittels mathematischer Modelle errechnet werden kann.

*Die Definition der SAR als zeitliche Ableitung des Energiezuwachses durch Absorption in einem infinitesimalen Massenelement, enthalten in einem Volumenelement gegebener Dichte macht nur Sinn, wenn dieser Grenzwert existiert. Das ist jedoch genaugenommen nicht der Fall. Reduktion des Volumenelements über alle Grenzen hinweg würde auf einen Übergang zu quantenmechanischen oder quantenelektrodynamischen Bedingungen hinauslaufen. Andererseits ist die Annahme eines Volumenelements von konstanter Dichte aber nicht quantentheoretisch zu behandelnder Ausdehnung biologisch unplausibel. Bei hohen Frequenzen wurde gezeigt, dass aufgrund der Heterogenität des Gewebeaufbaus sich die SAR in benachbarten Gewebeteilen extrem unterscheidet. Messungen an Phantomen können diese Unterschiede nicht abbilden. Computersimulationen haben aufgrund der Akkumulation der Fehler durch limitierte Rechengenauigkeit ihre Grenzen.

*Weiters ist die SAR eine Rate! Eine Rate als Basis für Expositionsgrenzwerte ist nur dann sinnvoll, wenn man Kurzzeiteffekte betrachtet. Zur Zeit der Einführung des SAR-Konzeptes existierte keine einzige Untersuchung, die die Frage der Langzeitexposition beantwortet hätte. Selbst unter der alleinigen Berücksichtigung thermischer Effekte könnte eine Langzeitexposition zu nachteiligen Auswirkungen führen. Da Energie mit konstanter Rate absorbiert wird, kann ein Gleichgewicht nur durch regulatorische Prozesse aufrecht erhalten werden. Die beteiligten Temperaturregulationsmechanismen könnten erschöpft werden oder deren Belastung könnte langfristig zu nachteiligen Folgewirkungen führen. Offensichtlich konnte sich damals niemand langdauernde Expositionsbedingungen bei relativ hohen Intensitäten vorstellen.

*Ein anderes Problem geht auf die operationale Definition der SAR zurück. Diese beinhaltet eine Mittelung über die Zeit. Es wird implizit angenommen, dass komplexe Bedingungen mit intermittierender oder zeitlich variierender Exposition dieselben Effekte wie eine kontinuierliche, konstante Exposition mit der selben mittleren SAR haben. Also sind über die Annahme hinaus, dass das Prinzip thermischer Effekte gilt, eine Reihe anderer Annahmen notwendig, um das vorgeschlagene Konzept zu nutzen:

*das Kurzzeitexpositionsprinzip

*das Zeit-/Dosis-Reziprozitätsprinzip

*das Prinzip kontinuierlicher Welle

*und um kombinierte Expositionen aus mehreren Strahlungsquellen zu berücksichtigen:

*das Prinzip additiver Effekte.

Das letztere Prinzip behauptet, dass die Effekte einer kombinierten Exposition mit unterschiedlichen EMFs gleich der Summe der Effekte jeder der einzelnen EMFs sind. Obwohl diese Annahme biologisch naiv ist, könnte sie für Expositionen in der Nähe des Grenzwerts gelten. Aber sie könnte wegen nicht-linearer Wechselwirkungsprozesse auch vollkommen falsch sein. Eine Beurteilung ist derzeit nicht möglich, da es keine Untersuchungen gibt, die die Annahme additiver Effekte systematisch geprüft hätte.

Wie oben ausgeführt, können Expositionen, die einen Temperaturanstieg über 1°C bei einem ruhenden Erwachsenen bewirken, zu nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen führen. Das ist das Gesetz thermischer Effekte. Fast alle Wissenschaftler in diesem Bereich stimmen darin überein, dass solche Expositionen (bzw. dazu äquivalente, in denen die Temperaturregulation durch Umgebungsbedingungen, Arbeitsbelastungen etc. beansprucht ist oder bei Personen mit gestörter Temperaturregulation) vermieden werden sollen. Jedoch wurde das "Gesetz thermischer Effekte" zum "Prinzip thermischer Effekte" ausgeweitet, das besagt, dass eine notwendige und hinreichende Bedingung für das Auftreten gesundheitlich nachteiliger Effekte eine relevante Erhöhung der Körpertemperatur durch Absorption elektromagnetischer Energie ist.

Dieses Prinzip wird von einigen Wissenschaftlern in Frage gestellt. Es ist klar, dass der Nachweis von gesundheitlich relevanten Effekte unterhalb der Schwelle für eine relevante Temperaturerhöhung nicht bloß zu einer Korrektur der Grenzwerte, sondern zum totalen Zusammenbruch des gesamten Aufbaus der meisten derzeitigen Expositionsstandards und im Besonderen der Richtlinien der ICNIRP (1998) führen würde. Deshalb wird mit aller Kraft versucht, Hinweise für solche Effekte zurückzuweisen, was unter Anwendung der folgenden Strategie geschieht:

*Epidemiologische Untersuchungen werden - wegen angeblich unangemessener Expositionsbestimmung - nicht ernsthaft einbezogen (obwohl das eher ein Argument gegen Untersuchungen ist, die keinen Effekt berichten, da falsche Expositionsklassifikation eher zu falsch negativen als falsch positiven Resultaten führt).

*Von einigen Untersuchungen wird fälschlich behauptet, sie hätten keinen Effekt erbracht (z. B. KÄLLEN et al. 1982; BEALL et al. 1996).

*Tierversuche werden entweder auf vollkommen unangemessene Weise diskutiert (z.B. CHOU et al. 1992; mit einem völlig irrelevanten Hinweis auf gutartige Tumore), wegen angeblich methodischer Mängel zurückgewiesen (z. B. LAI & SINGH 1995; 1996) oder gar nicht erst berücksichtigt, weil sie noch nicht wiederholt worden sind (z. B. REPACHOLI et al. 1997). Auch wird fälschlich behauptet, Wiederholungsuntersuchungen wären erfolglos gewesen (z. B. KUES et al. 1985).

*Allgemein werden die Forschungsergebnisse aus verschiedenen Bereichen (epidemiologische, in vivo und in vitro Untersuchungen) getrennt behandelt. Es wird kein Versuch unternommen, die Implikationen der verschiedenen Befunde aufeinander zu berücksichtigen.

*Das Auftreten von negativen wie positiven Befunden wird als Hinweis gesehen, dass es keinen Effekt gibt. Damit werden grundlegende methodologische Prinzipien verletzt und zusätzlich wird keine der etablierten Methoden zur Aggregation der Resultate angewendet.

*Schließlich wird behauptet, dass die Ergebnisse aus experimentellen Studien schwierig zu beurteilen sind, weil die Implikationen für die menschliche Gesundheit unklar wären. Diese Strategie ist ihrem Wesen nach eine Immunisierungsstrategie, weil es kein denkbares Untersuchungsergebnis gibt, das schließlich zu einer Falsifikation des angewandten Prinzips führen würde. Von jedem experimentellen Resultat kann behauptet werden, dass seine Implikationen für die menschliche Gesundheit unklar wären (experimentellen Untersuchungen an Menschen sind aus ethischen Gründen Grenzen gesetzt) und epidemiologische Untersuchungen können niemals einen kausalen Zusammenhang zwischen

Exposition und Effekt nachweisen (prospektive Kohortenstudien, die unter idealen Bedingungen im Prinzip eine solche Beziehung nachweisen könnten, würden nicht vor 15 bis 30 Jahren zu Ergebnissen führen; außerdem besteht hier das Risiko, dass sich während so langer Zeit die Expositionsbedingungen grundlegend verändern und dadurch die Möglichkeit schwindet, kausale Faktoren zu entdecken). Obwohl die ICNIRP feststellt, es “gäbe keine überzeugenden

Hinweise, dass typische Expositionen zu nachteiligen Effekten auf die Fortpflanzung oder zu einem erhöhten Krebsrisiko bei exponierten Personen führt” (ICNIRP, 1998, S. 507) wird nicht mitgeteilt, was diese “überzeugenden Hinweise” wären. Ohne eine solche Aussage über Fakten, die als Falsifikation der von der ICNIRP betrachteten Grundprinzipien angesehen würden, muss die Vorgangsweise als wissenschaftlich unhaltbar angesehen werden.

Eine alternative Vorgehensweise

Nicht nur die ICNIRP und andere Organisationen, die mit Grenzwerten befasst sind, sondern auch einige Übersichtsartikel von unabhängigen Wissenschaftlern (z. B. VERSCHAEVE & MAES 1998; HERMANN & HOSSMANN 1997) kommen, obwohl sie Hinweise auf einige bedeutsame Befunde mit möglichen gesundheitlichen Implikationen geben, zum Schluss, dass die Exposition mit HF EMF kein erhöhtes Risiko zu bewirken scheint. Solche Beurteilungen könnten auf die Erwartung zurückgehen, dass EMF in Analogie zu chemischen Substanzen beurteilt werden könnten. Es gibt jedoch wenig Berechtigung anzunehmen, dass die Vielzahl von unterschiedlichen Expositionsbedingungen von HF EMF als eine Einheit angesehen werden könne. Die toxikologische Bewertung aller Kohlenwasserstoffe in einer Aussage wäre sinnlos. Sogar eine einzige chemische Verbindung kann aufgrund von Isomerismus stark unterschiedliche Wirkungen haben (z. B. Benzpyren, Tertachlordibenzodioxin). Die Annahme, dass Expositionen, die sich in Frequenz, Modulationsart, Modulationscharakteristika und einer Vielzahl anderer Bedingungen unterscheiden, ähnliche Effekte haben und deshalb konsistente Resultate über verschiedene Untersuchungen hinweg zeigen sollten, scheint etwas weit hergeholt, zumal sich die Untersuchungen in den Endpunkten und den betrachteten biologischen Systemen unterscheiden (was zusätzliche Parameter wegen spezifischer Wechselwirkungen mit den Feldbedingungen einführt). Die Dominanz des Prinzips thermischer Effekte hat zu einem Forschungszusammenhang geführt, der möglicherweise von den falschen Fragen geleitet war. Die wesentliche Frage hätte sein müssen: Wenn es nicht die Energie des Feldes ist, das sich im Gewebe fortpflanzt, die (bei niedrigen Intensitäten) gefährlich ist, was könnte es dann sein? Man hätte rasch erkannt, dass die experimentellen Paradigmata, die bisher benutzt worden waren, mehr oder weniger zur Beantwortung dieser Frage unbrauchbar sind. Hätte man die Resultate epidemiologischer Untersuchungen, die konsistent ein kleines, aber erhöhtes Risiko für verschiedene Karzinome zeigen, ernst genommen, dann wäre man zur Erkenntnis gekommen, dass die weltweit in Experimenten eingesetzt Expositionsbedingungen mit den realen Expositionen nur sehr wenig gemeinsam haben. Es gibt nur ganz wenige Studien, die in situ Feldbedingungen untersuchten (z. B. HAIDER et al. 1994; MAGRAS & XENOS 1997). Es soll darauf hingewiesen werden, dass das Weglassen von bestimmten Expositionselementen einer komplexen Expositionsbedingung viel stärkere Beweiskraft für kausale Wirkungen als die Durchführung von Expositionsstudien hat (siehe z. B. die Untersuchungen zum Beitrag des Erdmagnetfelds von Blackman).

Anstatt alle HF EMF als eine Einheit zu betrachten, sollte man in erster Annäherung die Expositionen in verschiedene praktisch bedeutsame Bereiche einteilen, so wie es in der Toxikologie bei chemischen Substanzen üblich ist. Solche Bereiche könnten die niederfrequent amplitudenmodulierten Felder der verschiedenen Frequenzbänder sein, die für Rundfunk und Fernsehen verwendet werden, sowie die moderne Mobilkommunikation,

Mikrowellen bei 2,45 GHz (Mikrowellenherd), Radar und verschiedene Expositionen, die an Arbeitsplätzen auftreten (z.B. Kurzwellendiathermie). Zur Ableitung eines Richtwerts könnten die Forschungsergebnisse zu den jeweiligen Bereichen analysiert und nach einer in der Umwelthygiene gebräuchlichen Vorgangsweise bewertet werden: Dieser Prozess besteht aus mehreren Schritten. Ausgehend vom LOAEL (lowest observed adverse effect level) oder dem NOAEL (no observed adverse effect level) werden durch Anwendung von verschiedenen empirisch ermittelten oder durch Konvention festgelegten Faktoren, Unterschiede zwischen und innerhalb der Spezies, die Möglichkeit unbegrenzter Expositionsdauer, kombinierter Expositionen und von Effekten ohne Schwelle berücksichtigt. Das Resultat einer solchen Vorgangsweise kann unmittelbar auf die empirischen Ergebnisse zurückverfolgt und leicht mit wachsendem Kenntnisstand verändert werden.

Wenn wir diese Methode zur Ableitung vorläufiger Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinbevölkerung vor möglichen nachteiligen Auswirkungen der Emissionen von Mobilfunk-Basisstationen anwenden wollen, stehen wir allerdings vor dem Problem, dass es keine einzige Studie gibt, die gesundheitliche Auswirkungen einer solchen Exposition untersucht hat. Bisher gibt es nur eine in vitro Untersuchung der Auswirkungen einer kurzzeitigen Exposition in der Nähe einer Basisstation (MAES et al. 1996).

Einige Untersuchungen, die zwar den Auswirkungen einer Exposition durch Mobiltelefone gewidmet waren, können jedoch mit Vorsicht einbezogen werden, weil sie im Fernfeld exponiert haben. Ein anderes Problem entsteht durch die Unsicherheit über den zugrundeliegenden Mechanismus. Dieser Mangel erschwert eine Beurteilung von Endpunkten, die in Experimenten an Menschen untersucht werden, im Hinblick darauf, ob sie als gesundheitlich nachteilig eingestuft werden können. Zur Illustration sind etwa die Untersuchungen der Auswirkungen gepulster HF EMF auf den Schlaf (MANN & RÖSCHKE 1996; WAGNER et al. 1998; BORBELY et al. 1999) zu nennen. Obwohl die berichteten Effekte keineswegs direkt einen Zusammenhang mit der Gesundheit nahe legen (man kann - schon wegen der kurzen Dauer der Experimente - längst nicht daraus folgern, dass gesundheitlich relevante chronische Schlafstörungen auftreten könnten) und ähnlich den Auswirkungen einer leichten Barbiturat- oder anti-depressiven Therapie sind, kann man die beobachteten Effekte auf eine Interaktion des Feldes mit zentralnervösen Prozessen zurückführen. Diese Phänomene stellen eine mögliche Gefahr dar, wenn eine solche Interaktion nicht auf Strukturen beschränkt bliebe, die die Schlafarchitektur steuern. Daher wird die Interpretation hinsichtlich Gesundheit von Details des (unbekannten) Mechanismus abhängen und nicht vom beobachteten Endpunkt.

Hunderte Millionen Menschen auf der ganzen Welt sind heute Mikrowellen von Mobiltelefonen und Basisstationen ausgesetzt. Im Gegensatz zu diesem enormen Erfolg der Telekommunikationswirtschaft und dem noch immer anhaltende Wachstum ist der Umfang der Forschung zu möglichen biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von Emissionen der Handys und besonders der Basisstationen sehr bescheiden. Bis jetzt wurden zu diesen Fragen lediglich etwa 40 Studien veröffentlicht, wobei viele dieser Studien wegen gravierender Mängel gar nicht in die Beurteilung einbezogen werden können. Unter diesen Mängeln sind unangemessene Dosimetrie und nicht streng genug kontrollierte Expositionsbedingungen noch das geringste Problem.

Aufgrund der kurzen Expositionsdauer ist es noch zu früh, dass epidemiologische Untersuchungen einen Effekt zeigen könnten (ROTHMAN et al. 1996). Hinsichtlich des

älteren analogen Mobilfunksystems konnten Hardell et al. (2000) einen Zusammenhang der Lokalisation von Gehirntumoren mit der Seite, an der überwiegend telefoniert wurde, feststellen. Jedoch ist es auch hier noch zu früh, um Schlüsse zu ziehen. Dieses Resultat unterstreicht allerdings die Bedeutung der gegebenen Empfehlungen für einen vernünftigen Umgang mit der Technologie. Eine Verallgemeinerung dieses Befundes auf Basisstationen ist nicht möglich.

Einige experimentelle Untersuchungen am Menschen ergaben sowohl positive wie negative Resultate. Alle diese Untersuchungen waren zu Effekten einer Kurzzeitexposition. Die Bereiche, die untersucht wurden, umfassten kognitive Leistungen, EEG Parameter, Schlaf, Blutdruck und das humorale System. Tierversuche und speziell Untersuchungen zur Krebsentstehung sind schwierig zu beurteilen, da nicht bekannt ist, in welchem Stadium der Karzinogenese die Exposition einen Effekt hätte. Nur eine Untersuchung wurde bislang ohne Beschränkung auf eine bestimmte Stufe der Karzinogenese durchgeführt (REPACHOLI et al. 1997). Chagnaud et al. (1999) untersuchten Effekte auf die Tumorprogression, Imaida et al. (1998a, b) auf die Promotion und Adey et al. (1999) sowohl auf die Transformation wie auf die Tumorentwicklung. Mit Ausnahme der Untersuchungen von Repacholi et al. (1997) und Chagnaud et al. (1999) wurden diese Untersuchungen im Nahfeld durchgeführt und können deshalb für die Beurteilung von Basisstationen nicht herangezogen werden.

Die oben skizzierte Vorgangsweise zur Ableitung von Expositionsrichtwerten soll am Beispiel der Untersuchung von Repacholi et al. (1997) erläutert werden: Das Ergebnis dieser Untersuchung war eine mehr als doppelt so hohe Inzidenz von Lymphomen bei den exponierten Tieren im Vergleich zu den Kontrolltieren. Das ist sicherlich ein gesundheitlich relevanter Effekt, obwohl die Lymphomtypen bei Mäusen von denen bei Menschen verschieden sind. Berücksichtigt man die zeitliche Entwicklung von Lymphomen, dann lässt sich ein effektiver Wert der SAR von 0,5 W/kg abschätzen. Da die Untersuchung keine Dosis-Wirkungs-Beziehung beinhaltet, lässt sich der NOAEL nicht direkt ermitteln. In solchen Fällen wird üblicherweise der NOAEL aus dem LOAEL durch Anwendung eines Faktors, der gleich der Wurzel aus 10 gesetzt wird, abgeschätzt. Da im gegebenen Fall der beobachtete Effekt in mehr als einer Verdopplung der Lymphominzidenz bestand (und daher nicht gleich dem niedrigsten Anstieg der Inzidenz ist, der in einer solchen Studie detektiert werden kann), wird dieser Faktor aber auf 10 gesetzt.

Im nächsten Schritt wird meistens ein Interspeziesfaktor angewendet (der auch berücksichtigt, dass in Tierversuchen Auswirkungen auf das Wohlbefinden nicht untersucht werden können), der im Allgemeinen auf einen Wert von 3 gesetzt wird. Jedoch wurde dieser Faktor hier wegen der niedrigeren metabolischen Rate bei Mäusen weggelassen. Da eine Ganzkörper-SAR von 0,5 W/kg bei 900 MHz einer Exposition von 28 W/m₂ beim Menschen entspricht, erhalten wir einen NOAEL von 2,8 W/m₂. Interindividuelle Unterschiede in der Empfindlichkeit werden - wiederum aufgrund von Konventionen - durch Anwendung eines Faktors von 10 berücksichtigt, was einen NOAEL für Einzelexposition empfindlicher Personen von 0,28 W/m₂ ergibt. In Fällen, für die keine Informationen zur Beziehung zwischen Expositionsdauer und Effekt zur Verfügung stehen, wird eine lineare Beziehung angenommen. Im gegenständlichen Fall (mit einer Stunde Exposition) ergibt sich daher ein Faktor von 24. Das Resultat ist ein NOAEL für unbegrenzte Exposition von 11,67 mW/m₂. Nach Einführung eines weiteren Faktor von 10 für mögliche kombinierte Expositionen erhält man als Gesamtergebnis einen Referenzwert von 1,17 mW/m₂ für die Allgemeinbevölkerung. Ähnliche Berechnungen lassen sich für verschiedene andere Untersuchungen durchführen, was auf Referenzwerte zwischen 1 und 10 mW/m₂ führt.

Abschließende Bemerkungen

Die bisher durchgeführten Untersuchungen lassen keine endgültigen Schlüsse zu. Jeder Vorschlag für einen Referenzwert muss als vorläufig betrachtet werden. Ein Hauptproblem ist die unsystematische und erratische Art der wissenschaftlichen Studien. Trotz der Forderung der WHO, die Forschung international zu koordinieren, hat weder die ICNIRP noch das WHO EMF Modellprojekt diese Aufgabe erfüllt. Der Forschungsbedarf, welcher von diesen Organisationen festgestellt wurde, ist lediglich eine Reaktion auf bereits berichtete beunruhigende Resultate und nicht strategisch oder vorausschauend angelegt. Das scheint darauf zurückzugehen, dass man Resultaten, die nicht im Einklang mit dem Prinzip thermischer Effekte stehen, keinen Glauben schenkt. Die ganze Energie wird daher in den Nachweis gesteckt, dass diese Befunde falsch sind. Es ist unwahrscheinlich, dass sich aus einer solchen defensiven Strategie ein wissenschaftlicher Fortschritt ergibt. Alle Bemühungen sollten sich darauf konzentrieren, das Problem der Natur der Wechselwirkung zwischen EMF und dem menschlichen Körper einer Lösung näher zu bringen. Ich habe den Eindruck, dass die wichtigsten Fragen noch nicht einmal formuliert wurden, geschweige denn, dass sie beantwortet worden wären.

(Vortrag auf der Internationalen Konferenz "Situierung von Mobilfunksendern", 7./8. Juni 2000 in Salzburg; Nachdruck aus dem Tagungsband mit freundlicher Genehmigung des Herausgebers)

Nachweise

ADEY, W. R., BYUS, C.V., CAIN, C.D., HIGGINS, R.J., JONES, R.A., KEAN, C.J., KUSTER, N., MACMURRAY, A., STAGG, R.B., ZIMMERMAN, G., PHILLIPS, J.L. & W. HAGGREN (1999): Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumors of the central nervous system in Fischer 344 rats chronically exposed to 836 MHz modulated microwaves. *Radiat Res* 152: 293-302.

ANSI (1966): Safety level of electromagnetic radiation with respect to personnel. New York (USAS C. 95.I-1966)

BEALL, C., DELZELL, E., COLE, P. & I. BRILL (1996): Brain tumors among electronics industry workers. *Epidemiology* 7: 125-130.

BLACKMAN, C.F. (2000): Veränderungen der Kalzium-Ionen-Aktivität durch extrem niederfrequente und radiofrequente elektromagnetische Felder. In OBERFELD, G. (Hrsg.): Internationale Konferenz Situierung von Mobilfunksendern, Tagungsband, (Land Salzburg & Universität Wien)

BORBELY, A.A., HUBER, R., GRAF, T., FUCHS, B., GALLMANN, E. & P. ACHERMANN (1999): ulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neurosci Lett* 275: 07-210.

CHAGNAUD, J.-L., MOREAU, J.-M. & B. VEYRET (1999): o effect of short-term exposure to GSM-modulated low-power microwaves on benzo(a)pyrene-induced tumours in rat. *Int. J. Radiat. Biol.* 75: 251-1256.

CHOU, C.-K., GUY, A. W., KUNZ, L. I., JOHNSON, R. B., CROWLEY, J. J. & J.H. KRUPP (1992): Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics* 13: 69-496.

HAIDER, TH., KANSMÜLLER, S., KUNDI, M. & M. HAIDER (1994): Clastogenic effects of radiofrequency radiation on chromosomes of *Tradescantia*. *Mutat. Res.* 324: 65-68.

HARDELL, L., NASMAN, A., PAHLSON, A. & A. HOLLQUIST (2000): Case-control study on radiological work, medical X-ray investigations, and use of cellular telephones as risk factors for brain tumors. *MedGenMed*, May 4, 2000.

HERRMAN, D.M. & K.-A. HOSMANN (1997): Neurological effects of microwave exposure related to mobile communication. *J. Neurol. Sci.* 182: 1-14.

ICNIRP (1998): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 74(4): 494-522.

IMAIDA, K., TAKI, M., YAMAGUCHI, T., ITO, T., WATANABE, S., WAKE, K., AIMOTO, A., KAMIMURA, Y., ITO, N. & T. SHIRAI (1998a): Lack of promoting effects of the electromagnetic near-field used for cellular phones (929,2 MHz) on rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay. *Carcinogenesis* 19(2), 311-314.

IMAIDA, K., TAKI, M., WATANABE, S., KAMIMURA, Y., ITO, T., YAMAGUCHI, T., ITO, N. & T. SHIRAI (1998b): The 1,5 GHz electromagnetic near-field used for cellular phones does not promote rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay. *Jpn J Cancer Res* 89(10), 995-1002.

IRPA (1984): Interim guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Physics* 54, 115-123.

KÄLLEN, B., MALMQUIST, G. & U. MORITZ (1982): Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: Is non-ionizing radiation a fetal hazard? *Arch. Environ. Health* 37: 81-85.

KUES, H. A., HIRST, L. W., LUTTY, G. A., D'ANNA, S. A. & G.R. DUNKELBERGER (1985): Effect of 2,45-GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics* 6: 177-188.

LAI, H. & N.P. SINGH (1995): Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 16: 207-210.

LAI, H. & N.P. SINGH (1996): Single-and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int J Radiation Biol* 69: 513-521.

MAES, A., COLLIER, M., SLAETS, D. & L. VERSCHAEVE (1996): 954 MHz microwaves enhance the mutagenic properties of mitomycin. *Environ. Mol. Mutagen.* 28: 26-30.

MAGRAS, I.N. & T.D. XENOS (1997): RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice. *Bioelectromagnetics* 18: 455-461.

MANN, K. & J. RÖSCHKE (1996): Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology* 33: 41-47.

REPACHOLI, M.H., BASTEN, A., GEBSKI, V., NOONAN, D., FINNIE, J. & A.W. HARRIS (1997): Lymphomas in $E\mu$ -Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiation Res.* 147: 631-640.

ROTHMAN, K. J., LOUGHLIN, J. E., FUNCH, D. P. & N.A. DREYER (1996): Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology* 7: 303-305.

UNEP/WHO/IRPA (1981): Radiofrequency and microwaves. *Environmental Health Criteria* 16, (World Health Organization) Geneva

VERSCHAEVE, L. & A. MAES (1998): Genetic, carcinogenic and teratogenic effects of radiofrequency fields. *Mutat. Res.* 410: 141-165.

WAGNER, P., RÖSCHKE, J., MANN, K., HILLER, W. & C. FRANK (1998): Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: A polysomnographic study using standardized conditions. *Bioelectromagnetics* 19, 199-202.

Adresse des Verfassers:

Prof. Dr. Michael Kundi
Universität Wien
Institut für Umwelthygiene,
Kinderspitalgasse 15
A-1095 Wien
Österreich
michael.kundi@univie.ac.at