

Biologische Wirkungen schwacher HF-Felder und Empfehlungen zur Begrenzung der Expositionen durch Funksendeanlagen

H.-P. Neitzke, J. Osterhoff und H. Voigt

Das ECOLOG-Institut hat drei Jahre nach seinem letzten Bericht (Hennies et al. 2000) erneut eine umfassende Auswertung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen und biologischen Effekten hochfrequenter elektromagnetischer Felder vorgenommen (Neitzke et al. 2003). Die Auswertung basiert auf Arbeiten, die in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht wurden und den anerkannten Qualitätskriterien an wissenschaftliche Publikationen genügen (Hennies et al. 2000). Andere Arbeiten wurden nur ausnahmsweise herangezogen, wenn sie den wissenschaftlichen Qualitätskriterien genügen und wichtige Hinweise zur Beurteilung der biologischen Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder enthalten. In diesem Beitrag werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und Beispiele für relevante Forschungsergebnisse gegeben.

Bei der Klassifizierung der wissenschaftlichen Evidenz für Wirkungen und Effekte elektromagnetischer Felder wird das bereits in früheren Arbeiten des ECOLOG-Instituts benutzte Schema verwendet (s. EMF-Monitor 2/2001 S. 7, s. Kasten 1). In dem Bericht werden ferner drei Kategorien zur Klassifizierung der gesundheitlichen Relevanz von Wirkungen und Effekten unterschieden: Gesundheitliche Schäden, Beeinträchtigungen des Wohlbefindens und Effekte mit potentieller gesundheitlicher Relevanz (s. Kasten 2).

Kasten 1

Kategorien zur Klassifizierung der wissenschaftlichen Evidenz im Zusammenhang mit den gesundheitlichen Auswirkungen und biologischen Effekten elektromagnetischer Felder

Nachweis

Es liegen übereinstimmende Ergebnisse identischer Untersuchungen vor.

Konsistente Hinweise

Es liegen (starke) Hinweise aus unterschiedlichen Untersuchungsansätzen zum gleichen (patho-) physiologischen Endpunkt vor.

Starker Hinweis

Es liegen übereinstimmende Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen vor.

Hinweis

Es liegen ähnliche Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen vor.

Schwacher Hinweis

Es liegen einzelne Untersuchungsergebnisse vor.

Im Folgenden werden Werte für Leistungsflussdichten angegeben, bei denen verschiedene Wirkungen und Effekte beim Menschen beobachtet wurden oder bei denen ein Auftreten beim Menschen wahrscheinlich ist, weil z.B. die Ergebnisse aus Tierexperimenten auf den Menschen übertragen werden können oder weil es sich um elementare zelluläre Prozesse handelt. Soweit die Untersuchungen am Menschen durchgeführt wurden, wurden die entsprechenden Werte direkt übernommen. Bei In vivo-Untersuchungen an Tieren und In vitro-Untersuchungen wurde aus den angegebenen SAR-Werten abgeschätzt, welche Leistungsflussdichte bei einer Frequenz von 900 MHz erforderlich wäre, um beim Menschen die gleiche Ganzkörper-SAR zu erreichen. Diese Vorgehensweise ermöglicht zumindest eine grobe Abschätzung der möglicherweise relevanten Expositionen. Die angegebenen Werte für die Leistungsflussdichte sagen in der Regel nichts über mögliche Wirkungsschwellen aus, da entsprechende Untersuchungen bei den meisten Effekten und Wirkungen nicht vorliegen.

Kasten 2

Kategorien zur Klassifizierung der gesundheitlichen Relevanz von Wirkungen und Effekten elektromagnetischer Felder

Mit **Gesundheitliche Schäden** werden Wirkungen bezeichnet, die lebensbedrohlich sind, die Lebenserwartung reduzieren und/oder die Lebensqualität gravierend einschränken bzw. die Risiken hierfür erhöhen. Hierzu werden eine erhöhte Mortalität, Krebserkrankungen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Missbildungen bei Säuglingen und irreguläre Schwangerschaftsverläufe aber auch genotoxische Effekte und Störungen des Immunsystems gezählt.

Als **Beeinträchtigungen des Wohlbefindens** werden Wirkungen klassifiziert, die nicht lebensbedrohlich sind, aber die Lebensqualität und das Wohlbefinden erheblich einschränken. In diese Kategorie werden z.B. Kopfschmerzen, Schlafstörungen und andere unspezifische Gesundheitssymptome eingeordnet, die im Zusammenhang mit einer elektromagnetischen Hypersensitivität auftreten können.

Effekte mit potentieller gesundheitlicher Relevanz sind als Folge elektromagnetischer Expositionen messbar, es ist aber unklar, ob und wie sie sich gesundheitlich auswirken. In diese Kategorie gehören u.a. Effekte, die in In vitro-Experimenten nachgewiesen wurden und die – zumindest theoretisch – zu Störungen des Gesamtorganismus führen können, von denen man aber nicht weiß, ob und wie sie sich im lebenden Organismus auswirken, der sich durch Reparatur- und Anpassungsmechanismen auf unterschiedlichen physiologischen Ebenen schützen kann. Beispiele für solche Effekte sind Störungen des zellulären Calcium-Ionen-Haushalts, eine verstärkte Zell-Proliferation und die Aktivierung von Hitzeschock-Proteinen. Ferner werden als Effekte mit potentieller gesundheitlicher Relevanz Veränderungen im EEG, veränderte Reizwahrnehmung und Reizverarbeitung sowie Schwankungen im Hormonhaushalt gezählt, die sich in den Experimenten oftmals in der normalen Bandbreite gesunder Menschen bewegen, bei denen aber nicht klar ist, wie sie sich bei chronischen Expositionen auswirken.

Gesundheitliche Schäden

Krebserkrankungen

Das ECOLOG-Institut bewertet die Ergebnisse der vorliegenden epidemiologischen Studien als Hinweise auf ein erhöhtes Leukämie- und Lymphomrisiko in der Umgebung von Hochfrequenzsendeantennen (s. z.B. Hocking et al. 1996). Hinweise auf eine kanzerogene Wirkung werden auch in den Ergebnissen einiger Tierexperimente gesehen (s. z.B. Repacholi et al. 1997). Einige epidemiologische Untersuchungen deuten zudem auf ein erhöhtes Risiko für verschiedene Tumoren im Kopfbereich bei Personen, die Mobiltelefone häufig und über lange Zeiten benutzt haben (s. Auvinen et al. 2002, Hardell et al. 2000, 2001, 2002, Muscat et al. 2002, Stang et al. 2001).

Bei der Bewertung des kanzerogenen Potentials hochfrequenter elektromagnetischer Felder sind auch die Ergebnisse zu Veränderungen am Erbgut sowie Beeinflussungen der Gen-Expression und dabei insbesondere die Aktivierung von Stress-Proteinen zu berücksichtigen, da diese Effekte eine Rolle bei der Kanzerogenese spielen können. Allerdings kann man aus dem Auftreten solcher Effekte nicht unmittelbar auf eine Zunahme des Krebsrisikos schließen. Deshalb basiert der Wert, bei dem eine kanzerogene Wirkung nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand nach den derzeit vorliegen-

den Forschungsergebnissen möglich erscheint, auf den epidemiologischen Untersuchungen zum Krebsrisiko in hochfrequenz-exponierten Bevölkerungsgruppen und von Untersuchungen zur Krebsrate bei hochfrequenz-exponierten Versuchstieren.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse werden als Hinweise auf eine kanzerogene Wirkung bei Leistungsflussdichten von $0,1 \text{ W/m}^2$ (epidemiologische Studien) bzw. $6,0 \text{ W/m}^2$ (Laborexperimente umgerechnet auf den Menschen) gewertet.

Beeinflussung des Immunsystems

Das ECOLOG-Institut wertet die derzeit bekannten Untersuchungsergebnisse als Hinweise auf mögliche Beeinträchtigungen des Immunsystems durch hochfrequente elektromagnetische Felder.

Einflüsse auf das Immunsystem wurden bei Versuchstieren bei Ganzkörper-SAR-Werten von mehr als $0,1 \text{ W/kg}$ festgestellt (s. Chou et al. 1992). Um beim Menschen einen entsprechenden SAR-Wert bei einer Frequenz von 900 MHz zu erreichen, wäre eine Leistungsflussdichte von rund $5,6 \text{ W/m}^2$ erforderlich.

Fesenko et al. (1999) und Novoselova et al. (1999) stellten in Experimenten an Ratten, die allerdings Frequenzen von 8,15 bis 18 GHz ausgesetzt waren, Einflüsse auf das Immunsystem bei mittleren Leistungsflussdichten von $0,01 \text{ W/m}^2$ (SAR-Werte von 0,002 bis $0,005 \text{ W/kg}$) fest. Ein SAR-Wert von $0,002 \text{ W/kg}$ würde beim Menschen durch ein 900 MHz-Feld mit einer Leistungsflussdichte von $0,1 \text{ W/m}^2$ erzeugt.

Aufgrund der Ergebnisse aus Tierexperimenten erscheinen Störungen des Immunsystems bei Leistungsflussdichten von $0,1 \text{ W/m}^2$ nicht ausgeschlossen.

Beeinflussung der Fortpflanzung

Das ECOLOG-Institut bewertet die Ergebnisse der vorliegenden wissenschaftlichen Studien als Hinweise auf eine Verminderung der Fertilität bei Männern sowie eine Zunahme irregulärer Schwangerschaftsverläufe und Schäden bzw. Auffälligkeiten bei Kindern von Frauen mit beruflich bedingten Hochfrequenz-Expositionen (s. z.B. Lerman et al. 2001). Belastbare Hinweise auf Fortpflanzungsstörungen beim Menschen als auch beim Tier gibt es bisher nur für Expositionen oberhalb der gültigen Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung.

Einzelne Untersuchungen am Tier deuten auf Schäden bzw. Auffälligkeiten bei den Nachkommen bei SAR-Werten in der Größenordnung von $0,1 \text{ W/kg}$ (Cobb et al. 2000, Dasdag et al. 2000). Um beim Menschen einen entsprechenden SAR-Wert bei einer Frequenz von 900 MHz zu erreichen, wäre eine Leistungsflussdichte von rund $5,6 \text{ W/m}^2$ erforderlich.

Magras und Xenos (1997) berichten über eine deutliche Abnahme der Fortpflanzungsfähigkeit von Mäusen bei sehr niedrigen Leistungsflussdichten ($0,00168 - 0,01053 \text{ W/m}^2$). Diese Untersuchung weist jedoch erhebliche methodische Schwächen auf, so dass eine Wiederholung des Experiments unbedingt erforderlich ist.

Gentoxische Effekte

Das ECOLOG-Institut bewertet die vorliegenden Ergebnisse von Studien in exponierten Bevölkerungsgruppen, von In vivo-Untersuchungen an Säugetieren und In vitro-Untersuchungen zu Chromosomenaberrationen und zur Mikrokernbildung als konsistente Hinweise auf ein gentoxisches Potential hochfrequenter elektromagnetischer Felder bei nicht-thermischen Intensitäten (s. z.B. Lalic et al. 2001, Mashevich et al. 2003, Tice et al. 2002, Vijayalaxmi et al. 1997 a/1998). Zudem gibt es Hinweise auf eine Zunahme von DNA-Strangbrüchen bei exponierten Versuchstieren (Lai et al. 1997). Die Zwischenergebnisse des REFLEX-Programms stützen die Annahme eines gentoxischen Potentials hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks (Adlkofer und Dertinger 2002).

In verschiedenen experimentellen Arbeiten wurden eine Zunahme von Chromosomen-Schäden, der Mikrokern-Bildungsrate und von DNA-Strangbrüchen bei SAR-Werten zwischen 0,5 und 1,0 W/kg festgestellt. Um beim Menschen entsprechende SAR-Werte bei einer Frequenz von 900 MHz zu erreichen, wären Leistungsflussdichten von rund 30 bis 60 W/m² erforderlich. Bisher gibt es nur sehr schwache Hinweise auf gentoxische Wirkungen bei Leistungsflussdichten unterhalb der geltenden Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung (Balode 1996).

Beeinträchtigungen des Wohlbefindens

Befindlichkeitsstörungen

Das ECOLOG-Institut kommt zu dem Schluss, dass es deutliche Hinweise für das Auftreten von Befindlichkeitsstörungen als Folge von häufigen oder lang andauernden Expositionen durch hochfrequente elektromagnetische Felder gibt (s. z.B. Wilén et al. 2003). Die gesundheitlichen Auswirkungen der Veränderungen von Tiefschlaf- und REM-Phasen (s. z.B. Borbély et al. 1999) sind schwer abzuschätzen, aber es ist davon auszugehen, dass chronische Expositionen und Störungen der Schlafphasen zu gesundheitlichen Problemen führen können (Birbaumer und Lüdemann 2001).

Die vorliegenden wissenschaftlichen Ergebnisse werden bei Expositionen von 0,5 W/kg und mehr, wie sie beim Mobiltelefonieren auftreten, als starke Hinweise auf eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens bei einigen Personengruppen gewertet. Dieser SAR-Wert entspricht bei 900 MHz einer Leistungsflussdichte von 28 W/m². Bei niedrigeren Intensitäten fehlen bisher aussagekräftige Untersuchungen. Wenn sich die vorläufigen Ergebnisse der Untersuchung von Kundi (2001) bestätigen sollten, sind jedoch bestimmte Gesundheits- und Befindlichkeitsstörungen bei Expositionen von 0,002 W/m² nicht auszuschließen.

Elektrosensibilität

Zum Phänomen der 'Elektrosensibilität' bzw. der 'Elektromagnetischen Hypersensitivität' gibt es bisher nur sehr wenige Untersuchungen, bei denen meist auch nur qualitative Assoziationen mit Expositionsquellen ohne Angaben zu den Intensitäten nachgewiesen wurden.

Es ist beim derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand nicht möglich, den Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Expositionen und elektrosensiblen Reaktionen zu bewerten, Schwellen für diese Reaktionen anzugeben oder gar in Empfehlungen für Vorsorgewerte umzusetzen.

Effekte mit potentieller gesundheitlicher Relevanz

Beeinflussung des Nervensystems

Die vorliegenden Forschungsergebnisse aus Experimenten an Mensch und Tier werden als konsistente Hinweise auf Beeinflussungen der Gehirnfunktionen und kognitiver Funktionen bei Intensitäten unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte klassifiziert (s. z.B. Huber et al. 2002, Edelstyn und Oldershaw 2002). Die möglichen gesundheitlichen Auswirkungen werden vom ECOLOG-Institut im Hinblick auf die Veränderungen der Gehirnaktivitäten während des Schlafs als problematisch bewertet (s.o.). Auch wenn in einzelnen Experimenten Hochfrequenzexpositionen zu einer Verbesserung von Leistungsparametern, z.B. der Reaktionszeit, führten, bewertet das ECOLOG-Institut auch die Gesamtheit der Ergebnisse zu Beeinflussungen kognitiver Funktionen kritisch.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke werden als wissenschaftliche Hinweise auf eine physiologische Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder gewertet (s. z.B. Schirmacher et al. 2000, Salford et al. 2003). Die neuropathologische Relevanz einer erhöhten Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke wird von einigen Autoren als nicht sehr hoch eingeschätzt (s. z.B. Hossmann und Hermann 2003), da sie verglichen mit den Auswirkungen anderer No-

nen gering sei und relativ schnell wieder verschwinde. Problematisch könnte aber eine chronische Störung als Folge dauernder oder sehr häufiger Expositionen sein.

Beeinflussungen der Gehirnaktivität und kognitiver Funktionen beim Menschen können bei SAR-Werten 0,5 W/kg als belegt gelten. In einzelnen Experimenten wurden Effekte schon bei einem Zehntel dieses Wertes nachgewiesen (s. z.B. Jech et al. 2001). SAR-Werte von 0,5 und 0,05 W/kg würden beim Menschen bei einer Frequenz von 900 MHz durch Leistungsflussdichten von 28 bzw. 2,8 W/m² erreicht. Veränderungen der Durchblutung bestimmter Hirnregionen wurden beim Menschen bei SAR-Werten von 1 W/kg, das entspricht etwa 56 W/m², festgestellt (s. Huber et al. 2002).

Im Tierexperiment wurden Auswirkungen auf kognitive Funktionen bei SAR-Werten von 0,05 W/kg beobachtet (Sienkiewicz et al. 2000). Bei dem selben SAR-Wert wurden bei Versuchstieren Veränderungen der neuronalen Aktivität festgestellt (Beason und Semm 2002). In einem In vitro-Experiment wurden Veränderungen neuronaler Aktivitäten bereits bei SAR-Werten von 0,002 W/kg (Tattersall et al. 2001) nachgewiesen. Um beim Menschen einen Ganzkörper-SAR-Wert von 0,002 W/kg zu erreichen, wäre bei einer Frequenz von 900 MHz eine Leistungsflussdichte von mehr als 0,1 W/m² erforderlich. Bei Rindern, die hochfrequenten elektromagnetischen Feldern aus verschiedenen Quellen bei Leistungsflussdichten von weniger als 0,01 W/m² ausgesetzt waren, wurden Verhaltensauffälligkeiten beobachtet (Löscher und Käs 1998).

Bei einem SAR-Wert von 0,002 W/kg wurde auch eine erhöhte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Albumin festgestellt (Salford et al. 2003). In der gleichen Arbeit finden sich auch Hinweise auf Schäden an den Nervenzellen, die wahrscheinlich auf die verstärkte Albumin-Durchlässigkeit zurückzuführen sind.

Insgesamt werden die vorliegenden Untersuchungsergebnisse als konsistente Hinweise auf Beeinflussungen des Nervensystems bei Leistungsflussdichten über 0,1 W/m² gewertet. Es gibt einzelne Hinweise auf Beeinflussungen des Verhaltens von Tieren bei Leistungsflussdichten unter 0,01 W/m².

Die Auswirkungen der bei Menschen und Tieren festgestellten Effekte auf das Nervensystem auf die Gesundheit und geistige Leistungsfähigkeit können derzeit nicht eindeutig bewertet werden. Insbesondere ist nicht geklärt, wie sich lang andauernde Expositionen und chronische Beeinflussungen des Nervensystems auswirken.

Beeinflussung des Hormonsystems

Das ECOLOG-Institut kommt nach der Auswertung der Untersuchungen an Mensch und Tier zu dem Schluss, dass es zwar nur schwache Hinweise auf Störungen des Melatonin-Haushalts aber konsistente Hinweise auf Beeinflussungen des Stresshormon-Haushalts durch hochfrequente elektromagnetische Felder gibt.

Auswirkungen elektromagnetischer Felder mit einer Frequenz von 900 MHz und der 217 Hz-Pulsmodulation des GSM-Mobilfunks auf die Ausschüttung von Stresshormonen wurden beim Menschen für Leistungsflussdichten von 0,2 W/m² nachgewiesen (Mann et al. 1998).

Im Tierexperiment wurde eine vermehrte Ausschüttung von Stresshormonen durch ein 929 MHz-Feld bei mittleren Ganzkörper-SAR-Werten von 0,58 bis 0,8 W/kg festgestellt (Imaida et al. 1998 a). Um beim Menschen entsprechende SAR-Werte zu erreichen, wäre eine Leistungsflussdichte zwischen 32 und 45 W/m² erforderlich.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass hochfrequente elektromagnetische Felder den Stresshormon-Haushalt beeinflussen können. Nachgewiesen wurde dies bisher für Felder mit Leistungsflussdichten von 0,2 W/m².

Beeinflussung des Calcium-Ionen-Haushalts

Calcium-Ionen spielen eine zentrale Rolle bei der Steuerung zahlreicher biochemischer Prozesse in der Zelle und bei der Weiterleitung von Nervenimpulsen und ihrer Umsetzung in Aktionen von Muskelzel-

len. Es ist bekannt, dass toxische Umweltchemikalien Calcium-Ionen-gesteuerte Signalprozesse beeinflussen können, was zu Störungen verschiedener Zellfunktionen bis hin zum Zelltod führen kann (Kass und Orrenius 1999).

Das ECOLOG-Institut bewertet die vorliegenden Untersuchungsbefunde als Hinweise auf eine mögliche Störung des Calcium-Ionen-Haushalts durch hochfrequente elektromagnetische Felder mit Intensitäten unterhalb der thermischen Wirkungsschwelle.

Auswirkungen auf den Calcium-Ionen-Haushalt wurden in In vitro-Untersuchungen bei einem SAR-Wert von 0,005 W/kg beobachtet (Dutta et al. 1989). Um beim Menschen diesen SAR-Wert bei einer Frequenz von 900 MHz zu erreichen, wäre eine Leistungsflussdichte von rund 0,3 W/m² erforderlich.

Aktivierung von Hitzeschock-Proteinen

Die Aktivierung von Hitzeschock-Proteinen stellt eine universelle Stress-Reaktion von Zellen aller Lebewesen dar. Hitzeschock-Proteine sind aber auch bei der Transformation von Zellen in maligne Phänotypen wirksam, sie behindern das Absterben geschädigter Zellen, und sie können das Tumorbildungspotential von Krebszellen erhöhen, indem sie diese resistent gegen die Abtötung durch das Immunsystem machen, sie verstärken die Metastasierung und erhöhen die Widerstandskraft von Tumorzellen gegen chemotherapeutische Mittel (French et al. 2000).

Das ECOLOG-Institut ordnet die vorliegenden Befunde als konsistente Hinweise auf einen Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Aktivierung von Hitzeschock-Proteinen ein (s. z.B. de Pomerai et al. 2000, 2002, Kwee et al. 2001, Leszczynski et al. 2002, Shallom et al. 2002, s.a. EMF-Monitor 2/2002 S. 1-3). Die Ergebnisse zur Aktivierung von Hitzeschockproteinen durch hochfrequente elektromagnetische Felder wurden auch im Rahmen des laufenden REFLEX-Forschungsprogramms der EU bestätigt (Adlkofer und Dertinger 2002).

Eine verstärkte Aktivierung von Hitzeschock-Proteinen wurde bei SAR-Werten von 0,001 W/kg festgestellt (de Pomerai et al. 2000). Um beim Menschen einen SAR-Wert von 0,001 W/kg bei einer Frequenz von 900 MHz zu erreichen, wäre eine Leistungsflussdichte von etwas mehr als 0,05 W/m² erforderlich.

Beeinflussung der Zell-Proliferation

Wenn eine Noxe Wachstum und Teilung maligner Zellen fördert, erhöht sie die Ausbreitungstendenz und den Malignitätsgrad eines Tumors. Je stärker sich bösartige Zellen vermehren, desto weniger wirksam sind körpereigene Schutzmechanismen. Untersuchungen zur Zell-Vermehrung (Proliferation) können daher Hinweise auf ein kanzerogenes Potential einer Noxe geben.

Vom ECOLOG-Institut werden die vorliegenden Untersuchungsergebnisse als starke Hinweise auf eine verstärkte Zell-Proliferation unter dem Einfluss sehr schwacher elektromagnetischer Felder gewertet (s. z.B. Kwee und Raskmark 1998, 1999, Pacini et al. 2002, Stagg et al. 1997, Velizarov et al. 1999).

Eine Zunahme der Zell-Proliferation wurde mehrfach bei SAR-Werten zwischen 0,002 und 0,01 W/kg festgestellt. In einzelnen Experimenten (Kwee und Raskmark 1998) wurden Effekte auch noch bei einem SAR-Wert von 0,00002 W/kg beobachtet. Um beim Menschen bei einer Frequenz von 900 MHz SAR-Werte von 0,002 bzw. 0,00002 W/kg zu erreichen, wären Leistungsflussdichten von etwas mehr als 0,1 bzw. 0,001 W/m² erforderlich.

Vorsorgeempfehlungen

Die aktuelle Auswertung der wissenschaftlichen Literatur durch das ECOLOG-Institut hat die Hinweise auf gesundheitsschädliche Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder bei Leistungsflussdichten unterhalb der Grenzwerte der 26. BImSchV verstärkt. Das ECOLOG-Institut bekräftigt seine Forderung nach einer stärkeren Beachtung des Vorsorgeprinzips. Insbesondere im Zusammenhang

mit der weiten Verbreitung von Mobiltelefonen, dem Auf- und Ausbau der Mobilfunknetze aber auch im Hinblick auf den Aufbau der Senderinfrastruktur für den digitalen Rundfunk und das digitale Fernsehen sowie vor dem Hintergrund wachsender Expositionen durch die Emissionen von Anlagen, die nicht den Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes unterliegen, bestätigt das ECOLOG-Institut seine Vorsorgeempfehlungen:

1. Die Belastung der Bevölkerung durch hochfrequente elektromagnetische Felder sollte so gering wie möglich gehalten werden. Die Betreiber emittierender Anlagen sollten verpflichtet werden, das Prinzip der Expositionsminimierung bei der Auswahl von Standorten für Hochfrequenzanlagen, ihrer technischen und baulichen Ausführung sowie ihrem Betrieb anzuwenden und dies im Rahmen des Standortgenehmigungsverfahrens nachzuweisen.
2. Die Leistungsflussdichte der hochfrequenten Gesamtexposition sollte in sensiblen Bereichen (Wohngebiete, Schulen, Kindergärten, Spielplätze, Krankenhäuser) $0,01 \text{ W/m}^2$ nicht überschreiten. Dieser Vorsorgewert bezieht sich auf den Außenraum und die maximal möglichen Emissionen der Anlagen, deren Felder zur Exposition beitragen.

Zusätzlich empfiehlt das ECOLOG-Institut, angeregt durch die Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK 2001):

3. Die Immissionen durch einzelne Verursacher sollten deutlich unterhalb des Vorsorgewertes gehalten werden. Immissionen durch einzelne Technologien, wie Mobilfunk, Radio oder Fernsehen, sollten in der Summe auf maximal 30 Prozent des Vorsorgewertes begrenzt werden. Mit dieser zusätzlichen Empfehlung wird versucht, den verschiedenen Technologien jeweils eigene Immissionsspielräume einzuräumen, Spielraum für die Nutzung zukünftiger Technologien zu behalten und den steigenden Belastungen aus Quellen Rechnung zu tragen, die nicht unter die 26. BImSchV fallen (Handys, schnurlose Telefone, Bluetooth, W-LAN usw.).

Der vom ECOLOG-Institut empfohlene Vorsorgewert soll die Bevölkerung vor gesundheitlichen Schäden und Beeinträchtigungen des Wohlbefindens schützen. Er basiert auf den Werten für die Leistungsflussdichte, bei denen es ernst zu nehmende wissenschaftliche Hinweise auf solche Wirkungen gibt. Der Vorsorgewert wurde als 1/10 des niedrigsten dieser Werte bestimmt (zum Vorsorgefaktor s. Kasten 3).

Kasten 3

Vorsorgefaktoren

Bei der Festsetzung von Grenzwerten wird in der chemischen Toxikologie meistens ein Faktor von 1/100 manchmal, z.B. bei lückenhafter Datenbasis, auch von 1/1000 angewandt. Der Grenzwert wird allerdings in der Regel auf die wissenschaftlich nachgewiesenen Wirkungsschwellen für gesundheitsschädliche Wirkungen und nicht auf wissenschaftliche Hinweise auf solche Wirkungen bezogen. Würde man diesen Weg (wissenschaftlich nachgewiesene Wirkungsschwelle für thermische Effekte in Kurzzeitversuchen am Menschen – Sicherheitsfaktor 1/100) bei der Festlegung von Grenzwerten für hochfrequente elektromagnetische Felder gehen, so ergäbe sich (bei 900 MHz) ein Grenzwert von $2,25 \text{ W/m}^2$. Das ECOLOG-Institut hält diese Vorgehensweise für nicht angemessen und im Hinblick auf den vorsorgenden Gesundheitsschutz für nicht ausreichend. Vielmehr müssen die vorliegenden ernst zu nehmenden wissenschaftlichen Hinweise auf gesundheitsschädliche Wirkungen bei sub-thermischen Intensitäten in einem Vorsorgekonzept berücksichtigt werden. Wenn man dies tut und von den niedrigsten Intensitäten ausgeht, bei denen es Hinweise auf solche Wirkungen gibt, erscheint ein zusätzlicher Vorsorgefaktor von 1/10 angemessen.

Bei der Formulierung des Vorsorgewertes konnten die Erfahrungsberichte einzelner Umweltmediziner und von Baubiologen über Personen, die auf extrem niedrige Leistungsflussdichten mit unterschiedlichen Symptomen reagieren, nicht berücksichtigt werden, da es bisher keine hinreichend dokumentier-

ten Untersuchungen gibt, die als Grundlage für eine wissenschaftlich fundierte Risikobewertung herangezogen werden könnten. Eine wissenschaftliche Überprüfung dieser Hinweise ist dringend erforderlich.

Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden die in der Literaturlauswertung aufgeführten Effekte mit potentieller gesundheitlicher Relevanz auf der zellulären Ebene. Diese sind vor allem deshalb von Bedeutung, weil sie

- a) zeigen, dass elementare biologische Prozesse durch hochfrequente elektromagnetische Felder mit Leistungsflussdichten, die zu gering sind, um thermisch wirksam zu sein, beeinflusst werden können;
- b) möglicherweise als Auslöser für die am lebenden Organismus festgestellten direkt gesundheitsrelevanten Wirkungen wirken.

Andererseits ist es bisher aber nicht möglich, das Schadenspotential abzuschätzen, das aus einer Beeinflussung des Calcium-Ionen-Haushalts, einer verstärkten Aktivierung von Hitzeschock-Proteinen oder einer verstärkten Zell-Proliferation folgt. Das gilt vor allem, solange diese Effekte nur in In vitro-Untersuchungen nachgewiesen wurden, in denen die Reparatur- und Verstärkungsmechanismen des lebenden Organismus nicht wirksam sind. Obwohl sie nicht explizit berücksichtigt wurden, sind die zellulären Effekte, für die belastbare wissenschaftliche Forschungsergebnisse vorliegen, durch die Grenzwertempfehlung abgedeckt.

Als Ergänzung zu den jetzt vorgelegten allgemeinen Empfehlungen arbeitet das ECOLOG-Institut derzeit an Vorsorgeempfehlungen zum Schutz der Bevölkerung für einzelne Technologiebereiche.

Literatur

- Adlkofer F. und Dertinger H. 2002: Summary of the findings obtained in the REFLEX-project and future perspectives. Tagung der Bioelectromagnetics Society, Québec 2002.
- Auvinen A., Hietanen M., Luukonen R. & Koskela R.-S. 2002: Brain tumors and salivary gland cancers among cellular telephone users. *Epidemiol.* 13 (3): 356-359.
- Balode Z. 1996: Assessment of radio-frequency electromagnetic radiation by the micronucleus test in bovine peripheral erythrocytes. *Sci. Total Environ.* 180: 81-85.
- Beason R. & Semm P. 2002: Responses of neurons to an amplitude modulated microwave stimulus. *Neurosci. Lett.* 333 (3): 175-178.
- Birbaumer N. & Lüdemann P. 2001: Mündliche Stellungnahme der beratenden Experten im Rahmen des Vorhabens 'Risikobewertung im wissenschaftlichen Dialog'. Workshop 'Kognitive Funktionen, EEG und Schlaf', Hannover, 26.9.2001.
- Borbély A.A., Huber R., Graf T., Fuchs B., Gallmann E. & Achermann P. 1999: Pulsed high-frequency electromagnetic fields affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neurosci. Lett.* 275 (3): 207-210.
- Chou C.-K., Guy A.W., Kunz L.L., Johnson R.B., Crowley J.J. & Krupp J.H. 1992: Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics* 13: 469-496.
- Cobb B.L., Jauchem J.R., Mason P.A., Dooley M.P., Miller S.A., Ziriac J.M. & Murphy M.R. 2000: Neural and behavioral teratological evaluation of rats exposed to ultra-wideband electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 21 (7): 524-537.
- Dasdag S., Akdag M.Z., Ayyildiz O., Demirtas Ö.C., Yayla M. & Sert C. 2000: Do cellular phones alter blood parameters and birth weight of rats? *Electro- Magnetobiol.* 19 (1): 107-113.
- Dutta S.K., Ghosh B. & Blackman C.F. 1989: Radiofrequency radiation-induced calcium ion efflux enhancement from human and other neuroblastoma cells in culture. *Bioelectromagnetics* 10: 197-202.
- Edelstyn N. & Oldershaw A. 2002: The acute effects of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention. *Neuro Report* 13 (1): 119-121.
- Fesenko E.E., Makar V.R., Novoselova E.G. & Sadovnikov V.B. 1999: Microwaves and cellular immunity I. Effect of whole body microwave irradiation on tumor necrosis factor production in mouse cells. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 49: 29-35.
- French P.W., Penny R., Laurence J.A. und McKenzie D.R. 2000: Mobile phones, heat shock proteins and cancer. *Differentiation* 67: 93-97.

- Hardell L., Hallquist A., Hansson Mild K., Carlberg M., Pahlson A. & Lilja A. 2002: Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumors. *Eur. J. Canc. Prev.* 11 (4): 377-386.
- Hardell L., Hansson Mild K., Pahlson A. & Hallquist A. 2001: Ionizing radiation, cellular telephones and the risk of brain tumors. *Eur. J. Canc. Prev.* 19: 523-529.
- Hardell L., Näsman A., Pahlson A. & Hallquist A. 2000: Case-control study on radiology work, medical X-ray investigations, and use of cellular telephones as risk factors. *Medscape General Med.* 2 (2).
- Hennies K., Neitzke H.-P. & Voigt H. 2000: Mobilfunk und Gesundheit – Bewertung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Gesundheitsschutzes. Gutachten im Auftrag der Fa. T-Mobil.
- Hocking B., Gordon I.R., Grain H.L. & Hatfield G.E. 1996: Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med. J. Austral.* 165: 601-605.
- Hossmann K.-A. & Hermann D.M. 2003: Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system. *Bioelectromagnetics* 24 (1): 49-62.
- Huber R., Treyer V., Borbély A.A., Schuderer J., Gottselig J.M., Landolt H.-P., Werth E., Berthold T., Kuster N., Buck A. & Achermann P. 2002: Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG. *J. Sleep Res.* 11 (4): 289-295.
- Imaida K., Taki M., Yamaguchi T., Ito T., Watanabe S., Wake K., Aimoto A., Kamimura Y., Ito N. & Shirai T. 1998 a: 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.
- Jech R., Sonka K. u.a. 2001: Electromagnetic field of mobile phones affects visual event related potential in patients with narcolepsy. *Bioelectromagnetics* 22 (7): 519-528.
- Kass G.E.N. & Orrenius S. 1999: Calcium signaling and cytotoxicity. *Environ. Health Persp.* 107, Suppl. 1: 25-35.
- Kundi M. 2001: Erste Ergebnisse der Studie über Auswirkungen von Mobilfunk-Basisstationen auf Gesundheit und Wohlbefinden. Institut für Umwelthygiene, AG für Arbeits- und Sozialhygiene, Kinderspitalgasse 15, A-1095 Wien.
- Kwee S. & Raskmark P. 1998: Changes in cell proliferation due to environmental non-ionizing radiation 2. Microwave radiation. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 44: 251-255.
- Kwee S. & Raskmark P. 1999: Radiofrequency electromagnetic fields and cell proliferation. in: Bersani (Hrsg.): *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, Kluwer, Dordrecht: 187-190.
- Kwee S., Raskmark P. & Velizarov S. 2001: Changes in cellular proteins due to environmental non-ionizing radiation. I. Heat-shock proteins. *Electro- Magnetobiol.* 20 (2): 141-152.
- Lai H., Carino M. & Singh N. 1997: Naltrexone blocks RFR-induced DNA double strand breaks in rat brain cells. *Wireless Networks* 3 (6): 471-476.
- Lalic H., Lekic A. & Radosevic-Stasic B. 2001: Comparison of chromosome aberrations in peripheral blood lymphocytes from people occupationally exposed to ionizing and radiofrequency radiation. *Acta Medica Okayama* 55 (2): 117-127.
- Lerman Y., Jacobovich R. & Green M.S. 2001: Pregnancy outcome following exposure to shortwaves among female phyiotherapists in Israel. *Am. J. Ind. Med.* 39: 499-504.
- Leszczynski D., Joenväärä S., Reivinen J. & Kuokka R. 2002: Non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: molecular mechanism for cancer- and blood-brain barrier-related effects. *Differentiation* 70 (2-3): 120-129.
- Löscher W. & Käs G. 1998: Auffällige Verhaltensstörungen bei Rindern im Bereich von Sendeanlagen. *Prakt. Tierarzt* 79 (5): 437-444.
- Magras I.N. & Xenos T.D. 1997: RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice. *Bioelectromagnetics* 18 (6): 455-461.
- Mann K., Wagner P., Brunn G., Hassan F., Hiemke C. & Röschke J. 1998 (2): Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on the neuroendocrine system. *Neuroendocrin.* 67: 139-144.
- Mashevich M., Folkman D., Kesar A., Barbul A., Kerenstein R., Jerby E. & Avivi L. 2003: Exposure of human peripheral blood lymphocytes to electromagnetic fields associated with cellular phones leads to chromosomal instability. *Bioelectromagnetics* 24 (2): 82-90.
- Muscat J.E., Malkin M.G., Shore R.E., Thompson S., Neugut A.I., Stelman S.D. & Bruce J. 2002: Handheld cellular telephones and risk of acoustic neuroma. *Neurology* 58: 1304-1306.

Neitzke H.-P., Osterhoff J. und Voigt H. 2003: Biologische Wirkungen schwacher HF-Felder und Empfehlungen zur Begrenzung der Expositionen durch Funksendeanlagen. ECOLOG-Bericht 2/2003.

Novoselova E.G., Fesenko E.E., Makar V.R. & Sadovnikov V.B. 1999: Microwaves and cellular immunity II. Immunostimulating effects of microwaves and naturally occurring antioxidant nutrients. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 49: 37-41.

Pacini S., Ruggiero M., Sardi I., Aterini S., Gulisano F. & Gulisano M. 2002: Exposure to global system for mobile communication (GSM) cellular phone radiofrequency alters gene expression, proliferation and morphology of human skin fibroblasts. *Oncol. Res.* 13 (1): 19-24.

Pomerai D. de, Daniells C., David H. u.a. 2000: Non-thermal heat-shock response to microwaves. *Nature* 405: 417-418.

Pomerai D.I. de, Dawe A., Djerbib L., Allan J., Brunt G. & Daniells C. 2002: Growth and maturation of the nematode *Caenorhabditis elegans* following exposure to weak microwave fields. *Enzyme Microbial Technol.* 30: 73-79.

Repacholi M.H., Basten. A., GebSKI V., Noonan D., Finnie J. & Harris A.W. 1997: Lymphomas in μ -Pim 1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat. Res.* 147: 631-640.

Salford L.G.; Brun a.E., Eberhardt J.L., Malmgren L. & Persson B.R.R. 2003: Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ. Health Persp.* Online 29. Jan.: 1-17.

Schirmacher A., Winters S., Fischer S. u.a. 2000: Electromagnetic fields (1,8 GHz) increase the permeability to sucrose of the blood-brain barrier in vitro. *Bioelectromagnetics* 21: 338-345.

Shallom J.M., Di Carlo A.L., Ko D.J., Penafiel L.M., Nakai A. & Litovitz T.A. 2002: Microwave exposure induces hsp70 and confers protection against hypoxia in chick embryos. *J. Cell. Biochem.* 86 (3): 490-496.

Sienkiewicz Z.J., Blackwell R.P., Haylock R.G.E., Saunders R.D. & Cobb B.L. 2000: Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice. *Bioelectromagnetics* 21: 151-158.

SSK – Strahlenschutzkommission – 2001: Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlung der Strahlenschutzkommission.

Stagg R.B., Thomas W.J., Jones R.A. & Adey W.R. 1997: DNA synthesis and cell proliferation in C6 glioma and primary glial cells exposed to a 836,55 MHz modulated radiofrequency field. *Bioelectromagnetics* 18 (3): 230-236.

Stang A., Anastassiou G., Ahrens W., Bromen K., Bornfeld N. & Jöckel K.-H. 2001: The possible role of radiofrequency radiation in the development of uveal melanoma. *Epidemiol.* 12 (1): 7-12.

Tattersall J.E.H., Scott I.R., Wood S.J. u.a. 2001: Effects of low intensity radiofrequency electromagnetic fields on electrical activity in rat hippocampal slices. *Brain Res.* 904: 43-53.

Tice R.R., Hook G.G., Donner M., McRee D.I. & Guy A.W. 2002: Genotoxicity of radiofrequency signals. I. Investigation of DNA damage and micronuclei induction in cultured human blood cells. *Bioelectromagnetics* 23 (2): 113-126.

Velizarov S., Raskmark P. & Kwee S. 1999: The effects of radiofrequency fields on cell proliferation are non-thermal. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 48: 177-180.

Vijayalaxmi, Frei M.R., Dusch S.J., Guel V., Meltz M.L. & Jauchem J.R. 1997 a: Frequency of micronuclei in the peripheral blood and bone marrow of cancer-prone mice chronically exposed to 2450 MHz radiofrequency radiation. *Radiat. Res.* 147: 495-500.

Vijayalaxmi, Frei M.R., Dusch S.J., Guel V., Meltz M.L. & Jauchem J.R. 1998: Correction of an error in calculation in the article "Frequency of micronuclei in the peripheral blood and bone marrow of cancer-prone mice chronically exposed to 2450 MHz radiofrequency radiation". *Radiat. Res.* 149: 308.

Wilén J., Sandström M. & Mild K.H. 2003: Subjective symptoms among mobile phone users - a consequence of absorption of radiofrequency fields? *Bioelectromagnetics* 24 (3): 152-159.