

# Übersicht über Studien zur Wirkung hochfrequenter Felder (mit Relevanz für die Mobilkommunikation und Daten)\*

Cindy Sage

Sage Associates,

1225 Coast Village Road, Suite G, Santa Barbara, California 93108, USA, [sage@silcom.com](mailto:sage@silcom.com)

## Einführung

Wissenschaftlich gesichertes Erkenntnis ist keine notwendige Voraussetzung für vernünftige Entscheidungsfindung in einem öffentlichen Prozess. Die Forschung muss jedoch den Rahmen vorgeben und den Wissensstand vertiefen, in wie weit und in welcher Weise bestimmte Expositionen ein Gesundheitsrisiko darstellen können.

Im Wesentlichen beruhen Entscheidungen über den Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern (HF Feldern) und gesundheitsschädigenden Effekten bei niedrigen Feldstärken auf zwei Schritten: Zum einen ist das gesamte wissenschaftliche Datenmaterial zu dieser Frage zu bewerten und der Öffentlichkeit schlüssig, verständlich und korrekt zu vermitteln.

Zum zweiten ist jener Grad an Sicherheit zu definieren, ab welchem es gerechtfertigt ist, provisorische oder permanente Schritte zur Risikoreduktion zu setzen. Endgültige wissenschaftliche Erkenntnis sollte weder implizit noch explizit die Voraussetzung dafür sein, dass die Gesellschaft Maßnahmen trifft. Im Falle, dass es sich um ein weltweites Problem handelt, das eine große Zahl von Personen betrifft, sind selbst geringe Risiken ausreichend, Minimierungsstrategien zu veranlassen.

In diesem Papier werden die wichtigsten Studien, die biologische Effekte und mögliche Gesundheitsschäden durch HF Feld-Exposition beschreiben, zusammengefasst. Im Bemühen, Wissenschaft verständlich zu präsentieren, werden die relevanten biologischen Effekte übersichtlich und tabellarisch aufbereitet. Dabei wird versucht die Informationen so zu gestalten, dass sie direkt (als Overheadfolien oder Dias) bei öffentlichen Hearings zu Mobilfunkanlagen verwendet werden können.

## Effekte auf das genetische Material (DNA)

Lai and Singh (1995) berichteten als erste über Strangbrüche in Nukleinsäuren unter RF Feldern niedriger Intensität. Sie fanden eine dosisabhängige Zunahme von Einzel- und Doppelstrangbrüchen in Hirnzellen, die über 2 Stunden gegenüber einem Feld von 2450 MHz mit einer spezifischen Absorptionsrate (SAR) von 0,6 und 1,2 W/kg exponiert waren. Dieser Effekt konnte mittels des sensitiven Komet-Assay sowohl bei gepulster als auch bei kontinuierlicher Bestrahlung nachgewiesen werden.

Phillips et al. (1998) berichteten über Einzelstrangbrüche unter Exposition mit Mobilfunkfrequenzen (813,5 und 836,5 MHz) niedriger Intensität (im Mittel 2,4 und 24  $\mu\text{W/g}$ ). Phillips nahm an, dass die Reparatur der DNA durch RF Felder beeinträchtigt werde. Gleichzeitig wies er darauf hin, dass auch niederfrequente Felder (60 Hz) eine signifikante Zunahme der Einzelstrangbrüche in 1G und Molt-4 Lymphblastomzellen bewirken. (Department of Energy Contractors Conference, Tucson, Arizona,

---

\*) Übersetzung: M. Kundi, H-P. Hutter, H. Moshhammer, Wien, Österreich; G. Oberfeld, Salzburg, Österreich

Abstract A-8, 1998). Er vermutete, dass niederfrequente Felder sowohl die Nukleinsäuren direkt schädigten als auch die Reparaturprozesse hemmten und so zum Zelltod (Apoptose) führten.

Es wird generell angenommen, dass Mikrowellen nicht direkt genotoxisch sind (das heißt, zu einem direkten Schaden an Genom oder DNA führen), wenn sie nicht durch hohe Intensität zu einer starken Gewebserwärmung führen (thermische Wirkung).

Blank und Goodman (1997) vermuteten, dass das elektromagnetische Signal an der Zellmembran über direkte Interaktion mit mobilen Ladungsträgern in Enzymen wirke. Jüngste Studien zeigen, dass innerhalb der Nukleinsäuren zwischen den Basenpaaren starke Elektronenflüsse möglich sind. Daher könnten elektromagnetische Magnetfelder die Transkription stimulieren und mit der DNA direkt interagieren. Ältere Arbeiten von Blank und Goodman über Hitze-Schock-Proteine (HSP) werden zitiert, die zeigen, dass EM Felder die gleichen Zellmechanismen auslösen wie Erwärmung, jedoch bei sehr viel niedrigerer Energiedosis (siehe Gentranskription und Induktion).

## **Chromosomale Schäden und Mikrokerne**

Garay-Vrhovac et al. (1999) berichten, dass bei Arbeitern, die chronisch HF Feldern von 1250-1350 MHz (bei lediglich 10-20  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) ausgesetzt waren, die Zahl der Mikrokerne erhöht war.

Vijayalaxmi et al (1997, 1998) zeigten den selben Effekt an peripheren Blutzellen und Knochenmarkszellen von Mäusen mit erhöhter Neigung zur Krebsentstehung unter 2450 MHz Bestrahlung. Ursprünglich (1997) erschien der Effekt nicht signifikant. In einer neuen Kalkulation (1998) korrigierten sie dies und zeigten, dass die Zunahme der Mikrokerne doch signifikant gewesen war.

Maes et al. (1993) exponierten menschliche Blutlymphozyten gegenüber 2450 MHz Feldern. Bei athermischen Feldstärken fiel eine deutliche Zunahme an Chromosomenschäden und Mikrokerneln auf. Die Chromosomenschäden nahmen mit der Dauer der Exposition zu. Eine Art der aufgetretenen Schäden, die Bildung dizentrischer Chromosomen, gilt als typisches Zeichen ionisierender Strahlen. Die Ergebnisse sind konsistent mit Schäden bei anderen Frequenzen und Feldstärken, die von anderen berichtet wurden (Leonard et al., 1983; Garaj-Vrhovac et al., 1990, 1991; d'Ambrosio et al., 1992).

Maes et al. (1995) berichteten über ein Experiment, in dem Vollblut dem Feld einer GSM-Basisstation ausgesetzt wurde. In einer Entfernung von weniger als 5 cm traten binnen 2 Stunden vermehrt Chromosomenschäden auf. Die selben Autoren untersuchten Kombinationswirkungen von 954 MHz Feldern und dem chemischen Mutagen Mitomycin C an menschlichen Lymphozyten. Die Blutproben wurden der Strahlung einer Basisstation (SAR ca. 1,5 W/kg) ausgesetzt. Dies verstärkte den schädigenden Effekt des Mutagens bezüglich Sister Chromatid Exchange (SCE) und Einzelstrangbrüchen.

## **Effekte auf die Ornithindecaboxylase (ODC)**

Litovitz et al. (1993, 1997a, 1997b) und Penafiel et al. (1997) untersuchten die zelluläre Produktion von ODC. Dieses Enzym wird in schnell wachsenden Geweben, insbesondere in Tumoren exprimiert. Amplitudenmodulierte (aber nicht frequenzmodulierte oder kontinuierliche) 835 MHz Felder hatten auf L929 Zellen ab einer SAR von ca. 2,5 W/kg einen signifikanten Effekt. Dieser trat bei mehreren Arten der Amplitudenmodulation auf, unter anderem auch bei der für das TDMA-Telefonsystem typischen. So wurde der Effekt bei Modulationsfrequenzen zwischen 16 und 65 Hz gefunden, nicht aber bei 6 oder bei 600 Hz. Wichtig war auch die Beobachtung, dass der Effekt der ODC-Stimulierung nur auftrat, wenn das Feld über 1 bis 10 Sekunden Zeitintervalle konstant blieb. Falls die Frequenz sich in Sekundenintervallen änderte, kam es zu keiner Stimulierung der ODC.

## **Gen-Transkription und -Induktion**

Goswami et al. (1999) berichten erhöhte Fos mRNA-Levels in Fibroblasten unter Mobiltelefon RF Feldern. 835,62 MHz FM CW Felder führten zu einer statistisch signifikanten Verdoppelung der proto-oncogenen Fos mRNA-Level. Die 847,74 MHz (code division multiple access; CDMA) Tele-

fonfrequenz führte zu einer 40 bis 90% Zunahme von Fos mRNA, die auch statistisch signifikant war. Diese Daten zeigen, dass spezifische Gene (in diesem Fall Proto-Onkogene) von RF Signalen aus Mobiltelefonen beeinflusst werden können.

## Stressreaktion

Daniells et al. (1998) wiesen nach, dass Nematoden auf Mikrowellenstrahlung mit Stress reagieren, der dem der Einwirkung von Hitze oder toxischen Chemikalien entspricht. Das Nematodenmodell zeigte, dass Mikrowellenstrahlung bereits bei niedrigeren Energiedosen eine heftigere Stressantwort hervorrief als Hitze. Mikrowellen führten zu Schäden an intrazellulärem Protein und zur Induktion von Hitzeschockprotein. Der Schaden ähnelte dem von toxischen Metall-Ionen. Die Induktion der HSP wurde von den Autoren als klares Zeichen eines biologischen Effektes von Mikrowellen im Sinne einer Stress-Antwort gedeutet.

## Effekte der Mikrowellenstrahlung auf zellularer Ebene

Das Gleichgewicht der Kalzium-Ionen ist für die Zellkommunikation, Zellwachstum und andere lebenswichtige Prozesse sehr bedeutend. Einflüsse auf den Kalziumfluss an Zellmembranen wurden als einer der ersten Bioeffekte von RF Feldern untersucht. Die bahnbrechende Arbeit von Adey und seinem Team hat viele Einzelheiten aufgedeckt, wie RF Felder die Kaskade zellulärer Vorgänge beeinflussen. Hier kann nur eine kleine Auswahl dieser Arbeiten präsentiert werden. Eine ausführliche Zusammenfassung findet sich bei Adey (1997).

Adey (1993) bietet einen Überblick zu zellulären Bioeffekten von Mikrowellen, die nicht auf der Erwärmung des Gewebes beruhen (a-thermische Effekte). Besonders berücksichtigt er AM und PM Mikrowellen und diskutiert die Bedeutung freier Radikale im Gehirn und Gefäßsystem beim oxidativen Stress im Hinblick auf Erkrankungen wie Alzheimer, Parkinson, koronare Herzkrankheit, Zellalterung und Krebs. A-thermische Dosen von Mikrowellen-Strahlung können sowohl als Tumor-Promotor als auch als -Induktor wirken. Warnend weist Adey darauf hin, dass die gefundenen Bioeffekte bei niedrigen Feldstärken dringend nach weiteren Untersuchungen verlangen, insbesondere in Bezug auf nicht-lineare Dosis-Wirkungs-Beziehungen.

Dutta et al (1989) berichten über Veränderungen im Kalzium-Ionen-Haushalt sowohl in den Nervengewebe von Vögeln und Katzen wie auch in menschlichen Neuroblastom-Zellen. Bereits bei sehr niedrigen SAR (0,05 und 0,005 W/kg) fanden sich bei 147 MHz (amplitudenmoduliert mit 16 Hz) signifikante Effekte. Weiters wird berichtet, dass die Zunahme des Kalzium-Efflux bei 0,05 W/kg sowohl zwischen 13 und 16 als auch 57,5 und 60 Hz Modulationsfrequenz am höchsten war. Die Autoren schließen, dass AM RF in Nervenzellen verschiedenster Tierspezies (einschließlich des Menschen) Effekte hervorrufen. Diese Effekte seien im Einklang mit Ergebnissen anderer Studien am Vogel- und Katzenhirn und erlaubten, dass die gefundenen Effekte verallgemeinert werden können.

## Zelluläre Effekte am Immunsystem

Fesenko et al. (1999) berichteten, dass eine Ganzkörperbestrahlung männlicher Mäuse bei einem Leistungsfluss von 1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  das Immunsystem signifikant beeinflusste. Nach Novoselova et al. (1999) führte eine fünfstündige Bestrahlung bei 1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  zu einer Immunstimulierung der Makrophagen und T-Lymphozyten.

Lyle et al. (1983) fanden unter a-thermischen Feldstärken einer sinusförmig AM RF-Strahlung eine Reduktion der zellulären Immunfunktion. Ein 450 MHz RF-Feld wurde mit 60 Hz moduliert. Das unmodulierte Trägersignal selbst hatte keinen Effekt, und Modulationsfrequenzen von 3, 16 und 40 Hz führten zu zunehmend schwächeren Effekten als 60 Hz, welche die stärkste Unterdrückung der Lymphozytenaktivität bewirkten.

Veyret et al. (1991) entdeckten, dass sehr schwache gepulste Mikrowellen das Immunsystem signifikant beeinflussen, wobei sowohl starke Verstärkungen als auch Abschwächungen der Immunantwort bei bestimmten AM Frequenzen auftraten. Gepulste Mikrowellen von 9,4 GHz wurden zwischen 14 und 41 MHz amplitudenmoduliert. Die Leistungsflussdichte betrug  $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , die durchschnittliche Ganzkörper-SAR etwa  $0,015 \text{ W}/\text{kg}$ . Das Trägersignal ohne Modulation führte interessanterweise zu keinem Effekt.

Über einen Effekt von AM und CW RF Feldern berichten Elekes et al. (1996). Beide bewirkten eine mäßige Steigerung der Antikörper-Bildung in männlichen Mäusen (nicht hingegen in weiblichen). Die Trägerfrequenz betrug 2,45 GHz (die in industriellen Anwendungen gebräuchlich ist), die Modulationsfrequenz 50 Hz (ähnlich der Frequenz in einigen Mobiltelefon-Systemen wie TDMA). Die Leistungsflussdichte betrug  $0,1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ . Dies entspricht dem ungarischen Arbeitsplatz-Grenzwert für Langzeitexposition. Das Experiment fand unter Kurzzeit-Bedingungen statt und die Autoren weisen darauf hin, dass die Kürze der Exposition eventuell für die geringe Ausprägung des Effektes verantwortlich sei.

## Blut-Hirn-Schranke

Die Blut-Hirn-Schranke spielt eine wichtige Rolle, indem sie die Aufnahme von Toxinen aus dem Blut ins Gehirn verhindert und so das Gehirn vor Schäden schützt. Sie weist eine selektive Permeabilität auf, so dass einige Moleküle wie z.B. Glukose durchgelassen werden und andere nicht. So erfüllt sie neben der Schutzfunktion auch die Aufgabe der Aufrechterhaltung eines optimalen Nährstoffgleichgewichts in den Hirnflüssigkeiten.

Perrson et al. (1997) berichten über pathologische Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke unter 915 MHz Mobilfunk-Frequenz sowohl bei CW als auch gepulster RF Strahlung. Beim niedrigsten Expositionsniveau ( $0,0004 \text{ W}/\text{kg}$ ) wurde der stärkste Effekt gefunden. CW wirkte stärker als gepulste, letztere am stärksten bei einer Modulationsfrequenz von 8-50 Hz. 55% der CW-exponierten Ratten, nicht jedoch der PW-exponierten, zeigten pathologische Veränderungen der Blut-Hirn-Schranke bei höheren SAR von  $1,7\text{-}8,3 \text{ W}/\text{kg}$ .

Salford et al. (1994) zeigten, dass 915 MHz RF-Felder eine erhöhte Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke bewirken. Dies betrifft sowohl CW als auch gepulste Strahlung. 56 von 184 Ratten, die SAR war  $0,016$  bis  $5 \text{ W}/\text{kg}$ , zeigten pathologische Werte im Vergleich zu 5 von 62 Kontrollen. Ob dies ein unmittelbares Gesundheitsrisiko darstellt, sollte durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Die Tatsache, dass sowohl CW als auch PW Felder die Blut-Hirn-Schranke beeinträchtigen, sei jedenfalls besorgniserregend. Salford zitiert wenigstens 10 weitere Veröffentlichungen zu Effekten von RF Feldern auf die Blut-Hirn-Schranke.

## Blutdruck

Lu et al. (1999) berichten, dass Ultraweitband-EM-Pulse in Ratten niedrigen Blutdruck bewirken. Im Zeitraum von 45 Minuten bis 3 Wochen nach einer Exposition von  $0,121 \text{ W}/\text{kg}$  kam es zu einer signifikanten Senkung des arteriellen Druckes ohne Beeinflussung der Herzfrequenz. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Blutdrucksenkung unter UBW-Strahlung ein sehr konsistenter, robuster und beständiger Effekt sei.

## Geschlechtsorgane

Dasdag et al. (1999) exponierten Mäuse gegenüber Mobiltelefon-Feldern und fanden deutliche strukturelle Veränderungen in den Hoden. Bei einer SAR von lediglich  $0,141 \text{ W}/\text{kg}$  sowohl im Sprach- als auch im Stand-by-Modus kam es zu Schrumpfungen der Samenkanälchen im Durchmesser. Die Exposition fand über ein Monat täglich in zwei Stunden drei mal je Stunde über eine Dauer von 1 Minute statt. Histologische Veränderungen traten aber nur im Sprach- nicht aber im Stand-By-Modus auf.

## Krebs

Von den genetischen Bausteinen des Lebens bis hin zum Gesamtorganismus wurden Effekte von nieder- und hochfrequenten EM Feldern gezeigt, die gesundheitsschädlich sein können. Alle Grundfunktionen des Körpers, welche das Zellwachstum und die Zellteilung kontrollieren, die Immunüberwachung sowie der Schutz vor Toxinen können betroffen sein, vielfach selbst bei umwelttypischen Feldstärken. Krebs als relevanter Endpunkt von RF Strahlung ist seit 20 Jahren untersucht worden und sowohl Tierexperimente als auch Untersuchungen am Menschen weisen auf einen Zusammenhang zwischen bestimmten Formen der Exposition und Krebs hin. Die größte Sorge bezüglich der Technologie der Mobiltelefonie besteht in deren raschen weltweiten Verbreitung, wodurch binnen kürzester Zeit Millionen Anwender einer potentiellen Gefahr ausgesetzt werden, wobei sich die Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für Hirntumore verdichten.

Im Auftrag der US Air Force untersuchten Guy et al. (1984) Ratten im ersten großen Programm, das sich mit Effekten von Mikrowellen auf die Gesundheit befasste. Zum damaligen Zeitpunkt gab es bereits mehr als 6000 Artikel zu biologischen Effekten von RF Feldern, aber keinen, der sich mit dem Gesundheitsrisiko geringer Feldstärken befasste. Historisch gesehen erbrachte diese Studie als erste Belege für Effekte unter Langzeitexposition. John Mitchell (1992) vom Brooks Air Force Base Armstrong Laboratory als Auftraggeber von Guys Rattenexperiment fasste zusammen: "Auf unser Ersuchen führte Bill Guy eine bedeutende Langzeit-Studie durch, die besser und gründlicher war als alle bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiet. Die Tiere kontinuierlich über 2 Jahre zu exponieren entsprach einem gänzlich neuen Konzept, für welches auch die gesamte technische Ausrüstung neu adaptiert werden musste."

Das Ziel der Studie war, Tiere während ihres gesamten natürlichen Lebens einer RF Strahlung von 450 MHz bei einer Flussdichte von 1 mW/cm<sup>2</sup> auszusetzen. Der Schwerpunkt des Interesses lag auf möglichen kumulativen Effekten auf Lebensdauer und allgemeinen Gesundheitsindikatoren.

Der erste Bericht über das Rattenexperiment erschien 1985 (US Air Force USAFSAM-TR-85-64 report "Effects of long-term low-level radiofrequency radiation exposure on rats"). Darin wird eine vierfache, statistisch signifikante Zunahme von Krebserkrankungen dokumentiert.

Anlässlich der Festschrift zu Guys Pensionierung berichten Chou et al. (1992) neuerlich über diese Ergebnisse. Sie geben die damalige SAR mit 0,15 – 0,4 W/kg an. Verwendet wurde ein 2450 MHz Feld mit einer Pulsmodulation von 8 Hz. Beachtlicherweise beträgt die gegenwärtige ICNIRP-Empfehlung zur SAR für die Allgemeinbevölkerung ebenfalls 0,4 W/kg.

Obwohl Guy dringend eine Überprüfung und Reproduktion seiner Ergebnisse einmahnte, wurde über mehr als ein Jahrzehnt keine weitere vergleichbare Untersuchung in Angriff genommen.

Repacholi et al. (1997) fanden bei transgenen Mäusen unter 900 MHz GSM-Frequenz eine signifikante 2,4-fache Erhöhung der Lymphominzidenz. Es ist bemerkenswert, dass normale GSM-Signale über nur zwei mal je eine halbe Stunde täglich verwendet wurden. Geschäftsreisende telefonieren derzeit oft mehr als 3 Stunden täglich.

Eine zweite Mäuse-Studie von Repacholi (Harris et al, 1998) fand bei 50 Hz EM-Feldern keine Zunahme von Krebserkrankungen. Bezugnehmend auf die andere, positive Studie und epidemiologische Untersuchungen, die mit der Nähe zu Hochspannungsleitungen eine erhöhte Krebsinzidenz fanden, diskutieren die Autoren, dass für die Wirkung der Hochspannungsleitungen nicht die 50/60 Hz Felder, sondern transiente Hochfrequenzfelder verantwortlich seien. Im 50 Hz Mäuseexperiment erfolgte die Exposition derart, dass transiente Hochfrequenzfelder minimiert waren.

Hardell berichtete 1999 über ein erhöhtes Risiko für Hirntumoren bei Benutzern von Mobiltelefonen. Hierbei handelte es sich zumeist um Glioblastome sowie um Meningeome und Neurinome. Ein erhöhtes, allerdings nicht statistisch signifikantes Risiko fand sich bei analogen Telefonen für maligne Hirntumore an jener Seite des Kopfes, an welcher das Telefon üblicherweise gehalten wurde. Für

GSM-Telefone war die Expositionszeit noch zu kurz für abschließende Aussagen. Auf Akustikus-Neurinome fand sich kein Einfluss.

Adey et al. (1999) beschrieben einen schwachen protektiven Effekt von Mobiltelefon-Feldern auf die Entwicklung von Hirntumoren bei Ratten. Verwendet wurde ein TDMA Signal mit 836,55 MHz. Der erwartete tumorpromovierende Effekt wurde nicht gefunden, hingegen (nicht signifikante) Tendenzen zu einer Tumorprotektion.

## **Subjektive Symptome bei Benutzern von Mobiltelefonen**

Mild et al. (1998) berichten über eine Schwedisch-Norwegische Gemeinschaftsstudie zu Mobilfunkbenutzern (sowohl analoge als digitale Telefonie). Es fand sich ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Gesprächszeit bzw. der Zahl der Gespräche pro Tag und der Prävalenz bestimmter Symptome wie Wärmegefühl hinter und um das Ohr, Kopfschmerz und Müdigkeit. GSM-Telefone zeigten allerdings eine schwächere Wirkung, insbesondere in den schwedischen Daten.

Hocking (1998) untersuchte, ob die normale Benutzung von Mobiltelefonen unmittelbar zu Beschwerden im Kopf-Hals-Bereich führt. 40 Teilnehmer mit ausstrahlenden Schmerzen berichteten über sehr unterschiedliche Latenzzeiten und zeitliche Verläufe der Beschwerden (bei Wenigen Schmerzen binnen 5 Minuten ab Telefonat, bei 12 eine Zunahme der Beschwerden über den ganzen Tag). Alle berichteten, dass sie diese Schmerzen von sonstigen „üblichen“ Kopfschmerzen unterscheiden könnten. 11 gaben weiters vorübergehende Beeinträchtigungen der Sehschärfe an. 15 klagten über Übelkeit und Schwindelgefühl. Eine Person hatte bereits zuvor unter Tinnitus gelitten. Nach einem längeren Gespräch über Mobiltelefon seien jedoch eine Taubheit und ein Schwindelgefühl aufgetreten und hätten 5 Stunden angehalten. 3 Personen trugen das Telefon am Gürtel. Einer beschrieb nächtliche Schmerzen an dieser Stelle und ein anderer ein Kältegefühl an der Hüfte. Beim dritten imponierten die Beschwerden wie Muskelschmerzen. 28 hatten die Beschwerden bei Benutzung eines GSM-Telefones, 10 mit einem analogen. Von den ersteren berichteten 13, dass sie zuvor ein analoges Gerät problemlos benutzt hatten. 22 meinten, sie würden ihr Telefon mehr als 5 mal am Tag benutzen. 34 hatten ihr Telefonverhalten auf Grund der Beschwerden verändert.

## **Neurologische Effekte**

Neurologische Effekte von RF Feldern sind auf verschiedenen Ebenen an lebenden Organismen untersucht worden. Auf molekularer Ebene existieren Untersuchungen, die bereits bei a-thermischen Intensitäten Wirkungen beschreiben und replizieren. Darunter fallen Änderungen des Kalziumhaushalts und der Neurotransmitter-Sekretion. Auf höheren Ebenen finden sich unter anderem Befunde zur Verhaltensmodifikation und zur Beeinflussung des Schlafs.

Lai (1994a) erstellte eine Literaturübersicht zu neurologischen Effekten von RF Feldern auf das ZNS. Sie bietet eine präzise Übersicht, wie das Zentralnervensystem (ZNS) normalerweise arbeiten sollte und wie RF Felder die Funktion des ZNS stören. Das ZNS koordiniert und kontrolliert die Reaktionen des Organismus auf Umweltreize mittels autonomer und willkürlicher Motorik sowie auf neurohumoralem Wege. Verhaltensänderungen könnten zu den sensitivsten Effekten von RF Feldern zählen.

Verschiebungen der Kalzium-Ionen im Nervengewebe werden von RF Feldern beeinflusst. Kalzium-Ionen spielen in vielen Vorgängen von der Freisetzung von Neurotransmittern bis zur neuronalen Reizweiterleitung eine Rolle. Änderungen ihrer Funktion kann daher zu relevanten Gesundheitsschäden führen.

## **Psychoaktive Pharmaka**

Die Wirkung der Psychopharmaka beruht auf der physiologischen Rolle der Neurotransmitter. RF Felder beeinträchtigen manche Funktionen der Neurotransmitter und somit auch von Psychopharmaka. Lai berichtet, dass RF Felder bei 0,6 W/kg die Pentobarbital-induzierte Narkose und Hypothermie bei Ratten beeinflussen. Das Nervensystem wird empfindlicher gegenüber krampfauslösenden Stoff-

fen wie Pentylentetrazol. Die Empfindlichkeit gegenüber Curare-artigen Medikamenten, die zur Muskelrelaxation bei chirurgischen Eingriffen verwendet werden, wird hingegen durch RF Felder gesenkt. Die Wirkung von Anxiolytika wie Valium und Librium wird durch RF Felder potenziert. Lai (1992) vermutete, dass endogene Opiode durch schwache RF Felder aktiviert werden. Dies könnte erklären, dass Ratten unter RF-Bestrahlung mehr Alkohol zu sich nahmen und Morphin-abhängige Ratten geringere Entzugssymptome zeigten. Interaktionen zwischen RF Feldern und Psychopharmaka können selektiv unterbunden werden, wenn man die Tiere zuvor mit Opiat-Antagonisten behandelt (Lai et al., 1986).

## Serotonin

Es wird berichtet, dass die Serotoninaktivität von RF Feldern beeinflusst wird. Medikamente, die die Serotoninspeicher leeren (wie Fenfluramin) werden in ihrer Wirkung durch RF Felder verstärkt (Panksepp, 1973 in Lai, 1994). Lai (1984) berichtet, dass Hyperthermie durch RF Felder durch eine Vorbehandlung mit Serotonin-Antagonisten geblockt werden kann. Die Hyperthermie dürfte daher auf einer Aktivierung des serotonergen Systems durch RF Felder beruhen. Medikamente, die die Serotonin-Ausschüttung reduzieren, unterdrücken die Aggressivität (Panksepp, 1973 in Lai, 1994). Serotonin beeinflusst Schlaf, Lernprozesse, Hormonregulation, autonome Steuerungen, Stressreaktionen und die Motorik (Lai et al., 1984). Ein Krankheitsbild beim Menschen, genannt „Serotonin-Irritations-Syndrom“, umfasst Angst, Kopfschmerz und Migräne, Hautrötung und Hyperperistaltik im Zuge von hyperserotonergen Zuständen. Bis heute gibt es jedoch keine weiteren Untersuchungen zur Klärung der Zusammenhänge von RF Feldern und Serotonin.

## Augenschädigungen

Medikamente können auch die Schädigung von RF Feldern auf die Augen erhöhen. Kues et al. (1992) berichteten, daß Medikamente, die bei Glaukomen indiziert sind, adverse Effekte von RF Feldern auf die Cornea steigern könnten.

## Verhaltensänderungen

Seamans et al. (1999) berichteten, dass medikamenteninduzierte Hyperaktivität in Mäusen der gepulsten Ultrabreitbandexposition (UWB) entgegenwirke. Die Autoren meinten, dass diese Effekte möglicherweise mit einem Anstieg der Stickstoffmonoxidproduktion (NO) durch die Exposition, der NOS induziert, in Zusammenhang stehen. Die UWB-Impulse scheinen eher auf die lokomotorische Aktivität als auf die thermische Nozizeption zu wirken.

Über RF Felder bedingte Verhaltensänderungen wird in vielen wissenschaftlichen Studien berichtet (D'Andrea, 1999). Das Paradigma der Leistungsbeeinträchtigung, das auf thermisch abgeleiteten Grenzwerten von RF Feldern basiert, berücksichtigt nicht die Berichte über Effekte von Mikrowellen auf kognitive Leistungen. D'Andrea (1999) erörtert, dass "Effekte auf kognitive Leistungen sich wahrscheinlich schon bei niedriger SAR zeigen als benötigt werden, um über die Thermoregulation das Verhalten total zu stören." Und weiters "die aktuelle Literatur über Hitzestress liefert weder Daten noch Modelle, die Verhaltenseffekte bei niedriger SAR voraussagen". Schließlich bemerkt er, dass "die Ganzkörper- und Teilkörperabsorption von Mikrowellen (Hotspots) von 10 MHz bis 100 GHz eindeutig belegt ist". Hotspots variieren stark mit der Frequenz, Form und Größe der Säugetiere und deren Orientierung im Feld (D'Andrea, 1999).

Die Leistungsfähigkeit bei kognitiven Aufgaben kann bereits bei Expositionen gestört sein, die niedriger sind als die, die zu Verhaltensänderungen aufgrund der thermischen Effekte führen. "Anders als die Störung der Leistung bei einfachen Aufgaben, könnte eine Störung der kognitiven Funktionen zu bedeutenden Beurteilungsfehlern aufgrund einer geänderten Wahrnehmung, Störung des Gedächtnisses, der Aufmerksamkeit und/oder Lernfähigkeit führen. Dies resultiert in einem geänderten, jedoch nicht gänzlich gestörten Verhalten." (D'Andrea, 1999).

Über neurologische Effekte und Wirkungen auf das Verhalten durch RF Strahlung auf Menschen gibt es Hinweise aus den letzten 50 Jahren. In einer älteren Übersichtsarbeit (Silverman 1973) werden Gesundheitseffekte, die in Zusammenhang mit Mikrowellen stehen, zusammengefasst. Sie berichtet, dass "die wenigen Experimente, die an Versuchspersonen durchgeführt worden sind, Hinweise auf mögliche Sensitivitätsveränderungen von verschiedenen Sinnesorganen, insbesondere Hör und Geruchssinn", geliefert hätten.

Es gab mehrere Fallberichte, Gerüchte und Spekulationen über die Bedeutung der Strahlung im Mikrowellenbereich bei einer Reihe von Störungen des ZNS, wie z.B. eine kausale Rolle bei ernsten neurotischen Syndromen, Astrozytom oder auch eine Schutzwirkung bei Multipler Sklerose.

Hauptsächlich wurden Effekte auf das Nervensystem und das Verhalten aufgrund von Mikrowellen in klinischen Arbeitsplatzstudien an Gruppen gefunden, die unterschiedlichen Intensitäten und Frequenzen, aber generell langfristig, ausgesetzt waren. Sie untersuchte nichtthermische Effekte im Niedrigdosisbereich bei langfristiger Exposition an Geräten, die Mikrowellen emittieren. In neun klinischen Studien mit Arbeitern in der ehemaligen CSSR, Polen, UdSSR und den USA zeigten sich Effekte auf das Nervensystem. Silverman bemerkt, dass solche Studien „in den USA nach 1950 praktisch aufhörten, während bedeutende Untersuchungen in der UdSSR und anderen osteuropäischen Staaten fortgesetzt wurden.“

Raslear et al. (1993) berichteten über die Beobachtung signifikanter Effekte auf kognitive Funktionen, insbesondere in Entscheidungsfindungsprozessen, bei Ratten.

## **Lernfähigkeit und Gedächtnis**

Lai et al. (1994) fanden, dass Ratten, die für 45 Min. gegenüber 2450 MHz RF Strahlung mit einer Ganzkörper SAR von 0,6 W/kg exponiert waren, ein Lerndefizit im Sternlabyrinth, einem Testsystem zur Untersuchung des (räumlichen) Kurzzeitgedächtnisses. Bei der Suche nach Lern- und Gedächtnisdefiziten fand Lai, dass ein Medikament, welches die cholinerge Aktivität im Gehirn steigert, dieses mikrowelleninduzierte Lerndefizit blockieren kann. Es ist bekannt, dass cholinerge Systeme des Gehirns beim räumlichen Lernen und somit auch im Sternlabyrinth involviert sind (Lai et al. 1994).

## **Kognitive Funktionen**

Koivisto et al. (2000) berichteten, dass Aufmerksamkeit und Reaktionszeit durch die Exposition gegenüber 902 MHz Strahlung möglicherweise beschleunigt werden können. Die kognitive Funktion von 48 gesunden Versuchspersonen wurden bei Mobilfunkfrequenzen getestet. Die Resultate zeigten, dass die Exposition die Reaktionszeit bei einfachen Reaktions- und Vigilanz-Aufgaben beschleunigte, dass aber die Erkennungszeit in arithmetischen Tests verzögert war. Die Autoren meinten, dass die Strahlung von Mobiltelefonen einen fördernden Effekt auf bestimmte Gehirnfunktionen, v.a. bei Aufgaben, die Aufmerksamkeit und Informationsverarbeitung im Arbeitsgedächtnis erfordern, ausüben könnte.

Krause (2000) berichtete, dass die Strahlung von Mobiltelefonen das Ruhe-EEG nicht veränderte, aber die Reaktionszeit während einer Gedächtnisaufgabe signifikant beeinflusste. Eine Exposition mit einer SAR im Bereich von 0,3-0,44 W/kg (Mobilfunkfrequenzen) resultierte in Änderungen bei akustischen Gedächtnistests.

Preece (1999) berichtete, dass RF Felder im Mobilfunkfrequenzbereich die Reaktionszeit steigere aber keine Effekte auf das Gedächtnis zeige. Studenten wurden sowohl gegenüber kontinuierlichen Wellen als auch gepulsten Signalen für eine halbe Stunde exponiert. Danach wurden sie hinsichtlich Reaktionszeit, und Präzision bei Kognitionstests untersucht. Je höher die Leistung des Signals war, desto kürzer war die Reaktionszeit. Dies zeigte, dass Mobilfunksignale biologisch nicht neutral sind, sondern die Gehirnaktivität beeinflussen können.



## Schlaf

RF bedingte Schlafstörungen wurden in mehreren Untersuchungen beobachtet. Mann & Röschke (1996) berichteten, dass RF Felder (ähnlich dem Mobilfunkbereich) den REM Schlaf reduzierten und das EEG Signal während des REM Schlafes veränderten. Der REM Schlaf ist für die Informationsverarbeitung im Gehirn essentiell, besonders für die Lern- und Gedächtnisfunktion. Es wird angenommen, dass der REM Schlaf für die Verarbeitung neuer Eindrücke und Information (Tagesrest) sowie für deren Verbindung mit älteren Erfahrungen notwendig ist.

Borbely et al. (1999) berichteten, dass Schlafmuster und Schlaf EEG unter Exposition gegenüber 900 MHz verändert wurden. Die alternierende Abfolge von 15-Min. on/off-Intervallen der RF Exposition reduzierte die Anzahl von Aufwachphasen. Das Maximum des EEG Leistungsspektrums fand sich im 10-11 Hz und 13,6-14 Hz Band während der Einschlafphase. Die Resultate zeigten, dass RF Felder des Mobilfunks den Schlaf fördern und das Schlaf EEG verändern.

## Literatur

- Adey WR, 1993. Electromagnetics in Biology and Medicine, in Modern Radio Science (ed. H. Matsumoto), University Press, Oxford, pp. 231-249.
- Adey, WR Byus CV Cain DD Haggren W Higgins RJ Jones RA Kean CJ Kuster N MacMurray Phillips JL Stagg RB and Zimmerman G, 1996. Brain tumor incidence in rats chronically exposed to digital cellular telephone fields in an initiation-promotion model. Abstract A-7-3, p 27. 18<sup>th</sup> Annual Bioelectromagnetics Society Meeting, Victoria Canada.
- Adey WR, 1997. Horizons in science: physical regulation of living matter as an emergent concept in health and disease. 2<sup>nd</sup> World Congress on Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, Bologna, Italy Plenary Lecture.
- Blank M and Goodman R, 1997. Do electromagnetic fields interact directly with DNA? Bioelectromagnetics 18: 111-115.
- Borbeley AA Huber R Graf T Fuchs B Gallmann E and Achermann P, 1999. Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. Neuroscience Letters 275 (3): 207-210
- Chou CK Guy AW Kunz LL Johnson RB Crowley JJ and Krupp JH, 1992. Long-term low-level microwave radiation of rats. Bioelectromagnetics 13: 469-496.
- D'Andrea JA, 1999. Behavioral Evaluation of microwave radiation. Bioelectromagnetics 20: 64-74.
- Daniells C Duce I Thomas D Sewell P Tattersall J and de Pomerai D, 1998. Transgenic nematodes as biomonitors of microwave-induced stress. Mutation Research 399: 55-64.
- Dasdag, S, Ketani, MA, Akdag, Z, Ersay, AR, Sar, i I, Demirtas ,OC, Celik, MS, Whole-body microwave exposure emitted by cellular phones and testicular function of rats. Urol Res 27(3):219-223, 1999.
- Dutta SK Ghosh B and Blackman CF, 1989. Radiofrequency radiation-induced calcium ion efflux enhancement from human and other neuroblastoma cells in culture. Bioelectromagnetics 10: 197-202.
- Elekes E Thruoczy G and Szabo LD, 1996. Effect on the immune system of mice chronically exposed to 50 Hz amplitude-modulated 2,45 GHz microwaves. Bioelectromagnetics 17: 246-248.
- Fesenko EE Makar VR Novoselova EG Sadovnikov VB, 1999. Microwaves and cellular immunity. I Effect of whole body microwave irradiation on tumor necrosis factor production in mouse cells. Bioelectrochem Bioenerg 49 (1): 29-35.
- Gandhi, Om, 1999. Comparison of numerical and experimental methods for determination of SAR and radiation patterns of hand-held wireless telephones. Bioelectromagnetics, 20: 93-101.

- Garaj-Vrhovac V Horvat D Koren Z, 1990. The effect of microwave radiation on the cell genome. *Mutation Research* 243:87-93.
- Garaj-Vrhovac V Horvat D Koren Z, 1991. The relationship between colony forming ability, chromosome aberrations and incidence of micronuclei in V70 chinese hamster cells exposed to microwave radiation. *Mutation Research* 263:143-149.
- Garaj-Vrhovac V et al, 1999. Micronucleus assay and lymphocyte mitotic activity in risk assessment of occupational exposure to microwave radiation. *Chemosphere* 39 (13) 2301-2312.
- Goswami PC Albee LK Parsian AJ Baty JD Moros EG Pickard WF Roti Roti JL and Hunt CR, 1999. Proto-oncogene mRNA levels and activities of multiple transcription factors in C3H 10T1/2 murine embryonic fibroblasts exposed to 835,62 and 847,74 MHz cellular phone communication frequency radiation. *Radiation Research* 151, 300-309.
- Guy AW Chou CK Kunz LL Crowley J Krupp J, 1985. Effects of long-term low-level radiofrequency radiation exposure on rats. US Air Force School of Aerospace Medicine Brooks Air Force Base, Texas TR-85-64 Final Report August 1985, Approved for public release: distribution is unlimited.
- Hardell L Nasman A Pahlson A Hallquist A and Mild KH, 1999. Use of cellular telephones and the risk for brain tumors: a case-control study. *International Journal of Oncology* (proof).
- Hocking B, 1998. Preliminary report: symptoms associated with mobile phone use. *Occupational Medicine* 48: 357-360.
- Ivaschuk, OI Jones RA Ishida-Jones T Haggren W Adey WR Phillips JL, 1997. Exposure of nerve growth factor-treated PC 12 rat pheochromocytoma cells to a modulated radiofrequency field at 836,55 MHz: effects on c-jun and c-fos expression. *Bioelectromagnetics* 18 (3): 223-229.
- Koivisto M Revonsuo A Krause CM Haarala C Sillanmaki L Laine M and Hamalainen H, 2000. Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. *Cognitive Neuroscience and Neuropsychology in NeuroReport Vol 11 No 2, February 2000.*
- Krause CM Sillanmaki L Koivisto M Haggqvist A Sarrela C Revonsuo A Laine M and Hamalainen H, 2000. Effects of electromagnetic field emitted by a cellular phone on the EEG during a memory task. *Cognitive Neuroscience in NeuroReports Vol 11 No 2, March 2000.*
- Kues HA Monahan JC D'Anna D McLeod DS Luty GA and Loslov S, 1992. Increased sensitivity of the non-human primate eye to microwave radiation following ophthalmic drug pretreatment. *Bioelectromagnetics* 13: 379-393.
- Lai H Horita A Chou CK and Guy AW, 1984. Microwave-induced post-exposure hyperthermia: involvement of the endogenous opioids and serotonin. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol MTT-32, No 8, August 1984.*
- Lai H Horita A Chou CK and Guy AW, 1987. A review of microwave irradiation and actions of psychoactive drugs. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, March 1987, pp 31-36.*
- Lai, H, 1994a. Neurological effects of radiofrequency electromagnetic radiation in *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems* (JC Lin, Ed.) Plenum Press, New York.
- Lai, H Horita A and Guy AW, 1994b. Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics* 5: 95-104.
- Lai H and Singh NP 1995. Acute low intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 16:207-210.
- Lai H and Singh NP 1996. Single-and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *International Journal of Radiation Biology* 69:513-521.
- Litovitz TA Krause D Mullins JM, 1993. The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics* 14: 395-403.

- Litovitz TA Penafiel LM Farrel JM Krause K Meister R and Mullins JM, 1997a. Bioeffects induced by exposure to microwaves are mitigated by superposition of ELF noise. *Bioelectromagnetics* 18: 422-430.
- Litovitz TA Penafiel M Krause D Zhang D and Mullins JM, 1997b. The role of temporal sensing in bioelectromagnetic effects. *Bioelectromagnetics* 18: 388-395.
- Lu, Shin-Tsu Mathur S Akyel Y and Lee J, 1999. Ultrawide-band electromagnetic pulses induced hypotension in rats. *Physiology & Behavior*, Vol. 65, Nos. 4 and 5., pp 753-761. Elsevier Science Inc.
- Lyle DB Schecter P Adey WR and Lundak RL, 1983. Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to sinusoidally amplitude-modulated fields. *Bioelectromagnetics* 4: 281-292.
- Maes A Verschaeve L Arroyo A De Wagter D and Vercruyssen L. 1993 In vitro cytogenetic effects of 2450 MHz waves on human peripheral blood lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 14: 495-501.
- Maes A Collier M Slaets D and Verschaeve L, 1995. Cytogenetic effects of microwaves from mobile communication frequencies (954 MHz). *Electro Magnetobiology* 14: 91-8.
- Mann K and Roeschke J, 1996. Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology* 33: 41-47.
- Mild KH Oftedal G Sandstrom M Wilen J Tynes T Haugsdal B and Hauger E, 1998. Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones. A Swedish-Norwegian epidemiological study. *National Institute for Working Life 1998:23*. Umea, Sweden.
- Mitchell JC, 1992. Past Perspectives and Future Directions in Bioelectromagnetics: the contributions of Dr. Arthur W. Guy. *Bioelectromagnetics* 13: 450.
- Nordenson I Mild KH Sandstrom M Berglund A and Linde T. 1996. Chromosomal aberrations in lymphocytes of engine drivers. *Bioelectromagnetics Society Annual Meeting, Victoria, Canada 1996 Poster P-64-B*.
- Novoselova EG et al, 1999. Microwaves and cellular immunity. II Immunostimulating effects of microwaves and naturally occurring antioxidant nutrients. *Bioelectrochem Bioenerg* 49 (1): 37-41.
- Persson RR et al, 1997. Blood-brain barrier permeability in rats exposed to electromagnetic fields used in wireless communication. *Wireless Networks* 3 (1997) 455-461.
- Phillips J et al, 1998. DNA damage in molt-4 lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 45:103-110.
- Preece AW, 2000. Mobile phones and human heads. *NeuroReport Vol 11 No 2 February 2000*.
- Penafiel ML Litovitz TA Krause D Desta A and Mullins JM, 1997. Role of modulation on the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity in L929 cells. *Bioelectromagnetics* 18:132-41.
- Phillips J Ivaschuk Ishida-Jones T Jones R Campbell-Beachler M and Haggren W 1998. DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 45: 103-110.
- Preece AW Wesnes KA and Iwis GR, 1998. The effect of 50 Hz magnetic field on cognitive function in humans. *International Journal of Radiation Biology* 74: 463-470.
- Raslear TG Akyel Y Bates F Belt M Lu ST, 1993. Temporal bisection in rats: the effect of high-peak power pulsed microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 14: 459-478.
- Repacholi MH Basten A Gebiski V Noonan D Finnie J and Harris AW, 1997. Lymphomas in Eμ-Pim 1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiation Research* 147: 631-640.

- Salford LG Brun A Stureson K Eberhardt JL and Persson BRR, 1994. Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50 and 200 Hz. *Microscopy Research and Technique* 27: 535-542.
- Seamans, RL et al, 1999. Hyperactivity caused by nitric oxide synthase inhibitor is countered by ultra-wide band pulses. *Bioelectromagnetics* 20: 431-439.
- Tice R, Hook G and McRee D., 1999. Report at the 30<sup>th</sup> Annual Meeting of the Environmental Mutagen Society, WTR sponsored research. March 29, 1999.
- Verschaeve L Slaets D Van Gorp U Maes A and Vankerkom J. 1996 In vitro and in vivo genetic effects of microwaves from mobile telephone frequencies in human and rat peripheral blood lymphocytes in: D. Simunic (Ed.) COST 244 Position Papers. COST 244: Biomedical Effects of Electromagnetic Fields, CEC-XIII-PP01/96, European Union.
- Veyret B Bouthet C Deschaus P De Seze R Geffard M Jousot-Dubien J le Diraison M Moreau JM and Caristan A, 1991. Antibody responses of mice exposed to low-power microwaves under combined pulse-and-amplitude modulation. *Bioelectromagnetics* 12: 47-56.
- Vijayalaxmi et al, 1997 and Vijayalaxmi et al, 1998 (Correction). Frequency of micronuclei in the peripheral blood and bone marrow of cancer-prone mice chronically exposed to 2350 MHz radiofrequency radiation. *Radiation Research* 147 (4) 495-500. Correction of an error in calculation in the article in *Research Radiation* 149 (3) 199-202.

## Biologische Effekte und gesundheitliche Auswirkungen bei Expositionen im Niedrigdosisbereich gegenüber radiofrequenten Wellen und Mikrowellen

- Gedächtnisverlust
- Schlafstörungen und Schlaflosigkeit, Reduktion des REM-Schlafes
- Verlangsamte motorische Fähigkeiten und Reaktionszeit bei Schulkindern
- Beeinträchtigte Aktivität der weißen Blutkörperchen bei Schulkindern
- Räumliche Desorientierung
- Kopfschmerzen
- Veränderungen der Blut-Hirn-Schranke mit Durchlässigkeit in und aus dem Gehirn
- Eingeschränkte Aktivität des Nervensystems
- Konzentrationsverlust und „benebeltes Denken“
- Verringerte Immunfunktion
- Verringerte Spermienanzahl
- Erhöhte Pulsrate
- Erhöhter Blutdruck
- Veränderungen in der elektrischen Aktivität des Gehirns
- DNA Schaden (genetischer Schaden) und Veränderungen in der DNA Reparatur Kapazität
- Zellproliferation

Leistungsflussdichte	Berichtete biologische Effekte	Referenzen
0,168 - 1,053 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Irreversible Unfruchtbarkeit bei Mäusen nach 5 Generationen Exposition gegenüber RFR von einem "Antennen Park"	Magras & Xenos, 1997
0,16 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Beeinflussung der motorischen Funktion, Gedächtnis und Aufmerksamkeit bei Schulkindern (Litauen)	Kolodynski, 1996
0,2 - 8 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Zweifache Zunahme von kindlichen Leukämien / RFR Exposition gegenüber einem AM/FM Turm	Hocking, 1996
1,0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Ganzkörperbestrahlung mit Mikrowellen von männlichen Mäuse verursachte einen signifikanten Effect auf das Immunsystem	Fesenko, 1999
1,0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Bestrahlung (5 Stunden) mit Mikrowellen geringer Stärke stimulierte das Immunpotential von Makrophagen und T-Zellen	Novoselova, 1999
1,3 - 5,7 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Zweifache Zunahme von Leukämien bei Erwachsenen von einer AM RF Exposition	Dolk, 1997
~2-4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Direkter Effekt von RFR auf Ionenkanäle von Zellen / Öffnung von Acetylcholin Kanälen	D'Inzeo, 1988
4-10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Visuelle Reaktionszeit bei Kindern verlangsamt / in Tests geringere Gedächtnisfunktion	Chiang, 1989
5 - 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Beeinträchtigte Nervensystemaktivität	Dumansky, 1974
10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (0,0027 W/Kg SAR)	Veränderungen in der aktiven Vermeidung bei einem konditionierten Reflex (Verhaltensänderung) nach 0,5 Stunden Exposition	Navakatikian, 1994
10-20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Zunahme der Mikrokerne (anomale DNA Form) bei Arbeitern die chronisch gegenüber Mikrowellen bei 1250-1350 MHz exponiert waren.	Garaj-Vrhovac, 1999
10 - 25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Veränderungen im Hippocampus des Gehirns	Belokrinitsky, 1982
30 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (0,015 W/Kg SAR)	Immunsystemeffekte – Erhöhung der PFC Zahl (Antikörper produzierende Zellen)	Veyret, 1991
50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Eine 18%-ige Reduktion des REM Schlafes (wichtig für Gedächtnis- und Lernfunktionen)	Mann, 1996
100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Veränderungen in der Immunsystemfunktion	Elekes, 1996
100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (0,027 W/Kg SAR)	Eine Reduktion des Testosterons um 24% nach 6-stündiger Exposition	Navakatikian, 1994
<b>SAR</b>	<b>Berichtete biologische Effekte</b>	<b>Referenzen</b>
0,000021- ,0021 W/Kg	Veränderungen im Zellzyklus und Zellproliferation (960 MHz GSM Mobiltelefon Signal)	Kwee, 1997
0,0004 W/Kg	Mobiltelefon verursachte Veränderungen in der Blut-Hirn-Schranke, die das Gehirn von externen Chemikalien und Toxinen schützt (915 MHz GSM Mobiltelefon)	Salford, 1997
0,0004-0,008 W/Kg	915 MHz Mobiltelefon RF verursachte eine Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke. Am deutlichsten bei den geringsten Feldstärken und kontinuierlichen im Vergleich zu gepulsten Signalen mit einem Maximum der pathologischen Veränderungen bei etwa 8-50 Hz Modulation. 55% der gegenüber kontinuierlichen Signalen exponierten Ratten, aber nicht bei gepulsten Signalen, zeigten signifikante pathologische Veränderungen der Blut-Hirn-Schranke bei höheren SAR von 1,7-8,3 W/Kg	Persson, 1997

0,001 W/Kg	Nicht-thermische mikrowelleninduzierte (750 MHz kontinuierliches Signal) Unterbrechung von zarten Bindungen, die die aktive Form der Eiweißfaltungen aufrechterhalten; könnte über freie Radikale die DNA schädigen und mit der Zellsignalisierung, die das Zellwachstum kontrolliert interferieren. Der Hitzeschockprotein-Effekt ist äquivalent zu einer Gewebeerwärmung um 3°C.	de Pomerai, 2000
0,0027 W/Kg	Veränderungen in der aktiven Vermeidung bei einem konditionierten Reflex (Verhaltensänderung) nach 0,5 Stunden Exposition	Navakatikian, 1994
0,0024 W/Kg bis 0,024 W/Kg	Digitale Mobiltelefonsignale bei sehr geringen Intensitäten verursachen DNA Effekte in menschlichen Zellen. DNA Effekte sind direkter DNA Schaden und die Rate mit der die DNA repariert wird.	Phillips, 1998
0,026 W/Kg	Die Aktivität von c-jun (Onkogen Produkt) wurde in Zellen nach nur 20-minütiger Exposition gegenüber einem Mobiltelefonsignal (TDMA) verändert mit einer Reduktion von durchschnittlich 38 %.	Ivaschuk, 1997
0,0317 W/Kg	Abnahme beim Essen und Trinken.	Ray & Behari, 1990
0,3-0,44 W/Kg	Aufmerksamkeitsfunktion des Gehirns/Antworten wurden beschleunigt.	Prece, 2000 Koivisto et al, 2000
0,037 W/Kg	Hyperaktivität verursacht durch Stickstoffoxid Syntheseinhibitor wird neutralisiert durch Ultrabreitbandpulse -600/sec, 30 min	Seamans, 1999
0,005 to 0,05 W/Kg	Zunahme des Kalziumausflusses	Dutta et al, 1989
0,121 W/Kg	Herz-Kreislaufsystem/ signifikante Abnahme des arteriellen Blutdruckes (Hypotension)	Lu et al, 1999
0,14 W/Kg	Erhöhung der Immunantwort bei 100 µW/cm <sup>2</sup>	Elekes, 1996
0,141 W/Kg	Strukturelle Veränderungen in Hoden/geringere Durchmesser der samentragenden Tubuli bei Ratten exponiert gegenüber einem Mobiltelefon im Sprachmodus (aber nicht im stand-by Modus) mit Exposition von einer Minute, dreimal pro Stunde bei zwei Stunden pro Tag für ein Monat	Dasdag, 1999
0,13 - 1,4 W/Kg	Verdoppelung der Lymphomrate bei gentechnisch veränderten Mäusen bei einer Exposition gegenüber gepulsten Mobiltelefonsignalen 900 MHz, von zweimal ½ Stunde täglich über 18 Monate.	Repacholi, 1997
0,26 W/Kg	Schädliche Effekte des Auges/bestimmte Medikamente können das Auge gegenüber RFR empfindlich machen	Kues, 1992
0,15-0,4 W/Kg	Statistisch signifikante Zunahme maligner Tumoren bei 480 µW/cm <sup>2</sup>	Chou, 1992
0,58 - 0,75 W/Kg	Decrease in brain tumors (836 MHz TDMA digital cell phone signal)	Adey, 1996
to 1,0 W/Kg (max)	Schlafmuster und EEG sind verändert bei einer 900 MHz Mobilfunkexposition während des Schlafs.	Borbely et al, 1999
0,6 and 1,2 W/Kg	Zunahme der DNA Einzel- und Doppelstrangbrüche bei RFR Exposition (2450 MHz)	Lai & Singh, 1996
2 - 3 W/Kg	Zunahme bei Haut- und Brustkrebs	Szmigielski, 1982

<b>Leistungsflussdichte</b>	<b>Grenzwerte</b>	
579 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	800-900 MHz Mobiltelefon Signal Standard	ANSI/IEEE
1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	PCS STANDARD für die Exposition der Öffentlichkeit (1. September 1997)	FCC, 1996
5000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	PCS Grenzwert für berufliche Exposition	FCC, 1996
0,08 W/Kg	IEEE Grenzwert für unkontrollierte Umgebung (Ganzkörper)	IEEE
0,4 W/Kg	IEEE Grenzwert für kontrollierte Umgebung (Ganzkörper)	IEEE
1,6 W/Kg	FCC (IEEE) SAR Grenzwert über 1 Gramm Gewebe (Mobiltelefon am Ohr)	FCC, 1996
<b>Leistungsflussdichte</b>	<b>Hintergrundwerte</b>	
0,003 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Hintergrundwerte in der Umwelt für RF Exposition in Städten und Vorstädten in den 1990's	Mantiply, 1997
1-10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Umgebungs RF Exposition innerhalb von 33 bis 66 m von Mobilfunksendeanlagen	Sage, 1998, unpublished
<b>Mobiltelefon</b>	<b>SAR Wert</b>	
2,93 W/Kg	Spitzenwert über 1 Gramm Gewebe als SAR für einen erwachsenen Mann während der Benutzung eines Mobiltelefons bei einer durchschnittlichen abgestrahlten Leistung von 600 mW bei 835 MHz	Gandhi, 1996
3,21 W/Kg	Spitzenwert über 1 Gramm Gewebe als SAR für ein 10-jähriges Kind während der Benutzung eines Mobiltelefons bei einer durchschnittlichen abgestrahlten Leistung von 600 mW bei 835 MHz	Gandhi, 1996
4,49 W/Kg	Spitzenwert über 1 Gramm Gewebe als SAR für ein 5-jähriges Kind während der Benutzung eines Mobiltelefons bei einer durchschnittlichen abgestrahlten Leistung von 600 mW bei 835 MHz	Gandhi, 1996
1,11 W/KG	Spitzenwert über 1 Gramm Gewebe als SAR für einen erwachsenen Mann während der Benutzung eines Mobiltelefons bei einer durchschnittlichen abgestrahlten Leistung von 125 mW bei 835 MHz	Gandhi, 1996
0,90 W/KG	Spitzenwert über 1 Gramm Gewebe als SAR für ein 10-jähriges Kind während der Benutzung eines Mobiltelefons bei einer durchschnittlichen abgestrahlten Leistung von 125 mW bei 835 MHz	Gandhi, 1996
0,97 W/KG	Spitzenwert über 1 Gramm Gewebe als SAR für ein 5-jähriges Kind während der Benutzung eines Mobiltelefons bei einer durchschnittlichen abgestrahlten Leistung von 125 mW bei 835 MHz	Gandhi, 1996