


Neues aus der Wissenschaft

Die folgenden Beiträge beziehen sich auf neuere wissenschaftliche Originalarbeiten zur Wirkung hochfrequenter Felder des Mobilfunks. Die Auswahl der Publikationen ist vom Autor Prof. Roland Glaser selbst getroffen und durch sein subjektives Urteil der Relevanz bestimmt.

Roland Glaser

Lassen sich Einwirkungen hochfrequenter Felder durch eine direkte Kopplung mit Ladungen biologischer Makromoleküle erklären? Dies trifft unmittelbar die viel diskutierte Frage nach möglichen nicht-thermischen Effekten hochfrequenter Felder, vorausgesetzt, man meint nicht einfache Effekte ohne messbare Temperaturerhöhung, sondern tatsächlich Wirkungen ohne den Umweg über thermische Stöße. Aus der Sicht der molekularen Mechanik muss diese Definition sogar noch genauer gefasst werden. So ist zunächst zwischen *inter*-molekularen Bewegungen, also solchen, die sich durch Stöße der Moleküle untereinander austauschen, und *intra*-molekularen Bewegungen, also Vibrationen oder Rotation von Bindungen der Atome innerhalb eines Moleküls, zu un-

terscheiden. Nur letztere können eigentlich biologisch relevant werden, indem sie Eigenschaften von Proteinen oder Nukleinsäuren verändern. Auf solchen intramolekularen Schwingungen basieren zum Beispiel die Prozesse biologischer Energieübertragung. Ein Einfluss darauf wäre „nicht-thermisch“ im engeren Sinne. Ist dies als Resultat der Einstrahlung eines elektromagnetischen Feldes des Mobilfunks im Frequenzbereich um ein GHz denkbar? Genau diesem Problem ist eine umfangreiche theoretische Arbeit von Earl Prohofsky gewidmet. Zunächst kann man davon ausgehen, dass es genügend Ladungen und Dipole in biologischen Makromolekülen gibt, die durch Wechselfelder in Schwingung versetzt werden können. Doch: sind Resonanzen denkbar, und können solche



Schwingungen die biologisch relevanten Prozesse beeinflussen? Die Schwingung einer Saite kann ja nur beeinflusst werden, wenn die anregende Frequenz zumindestens in gleicher Größenordnung der Eigenfrequenz liegt. Nun finden die oben genannten Prozesse der Energieübertragung in biologischen Systemen im Frequenzbereich von einigen hundert bis tausend GHz statt. Eine direkte Kopplung durch die Frequenz des Mobilfunks, zwei Zehnerpotenzen darunter, ist somit außerordentlich unwahrscheinlich. Könnten diese „geringen“ Frequenzen aber nicht vielleicht andere molekulare Veränderungen in Makromolekülen hervorrufen, die deren Funktionen beeinflussen? Prohofsky betrachtet zwei Makromoleküle, repräsentativ für andere, für die es genügend physikalische Daten gibt, um Berechnungen anzustellen: Myoglobin – als Vertreter eines globulären Proteins – und doppelsträngige DNA. Kennt man Größe, Dichte, Elastizitätseigenschaften dieser Moleküle, dann kann man die Schallgeschwindigkeit und letztlich die akustische Resonanzfrequenz derselben errechnen. Ohne auf die Details dieser Berechnungen hier eingehen zu können – der interessierte Leser mag sie der Originalarbeit entnehmen – kommt der Autor beim Protein auf akustische Eigenresonanzen um 240 GHz und auch bei der DNA nicht weit darunter. Zusätzlich ist natürlich zu berücksichtigen, dass die Wassermoleküle in der Hydratschicht dieser Moleküle, insbesondere bei dem langgestreckten DNA-Molekül, Schwingungen in starkem Maße dämpfen. Dämpfung jedoch bedeutet, dass jede induzierte Bewegung sofort in „bulk-modes“ thermischer Bewegung abfließt, oder wie der Thermodynamiker es ausdrückt: „thermisch dissipiert“. Prohofsky kommt deshalb zu dem Schluss, dass nicht-thermische Wirkungen der Felder des Mobilfunks theoretisch höchst unwahrscheinlich sind. Den Begriff „unmöglich“ gibt es in der statistischen Mechanik nicht! Der Autor berücksichtigt auch Sonderfälle von großen Proteinkomplexen, wie zum Beispiel Membranporen, findet jedoch auch dann keine Lösung. Jede Beeinflussung höher-frequenter Schwingungsmoden durch die GHz-Frequenzen des Mobilfunks sind nicht nur außerordentlich ineffektiv sondern werden zudem durch die dämpfende Wirkung

der allgegenwärtigen Wassermoleküle sofort „thermalisiert“ (Prohofsky, E. W.: RF absorption involving biological macromolecules. *Bioelectromagnetics*. **25**, 441-451. 2004).



Gibt es nicht-thermische Einwirkungen hochfrequenter Felder auf Nerven und Hirnfunktion?

Obgleich die Grenzwerte aufgrund thermischer Überlegungen und über entsprechende Sicherheitsfaktoren gut abgesichert sind, obgleich sie im Wesentlichen auch durch epidemiologische Studien gestützt werden, gibt es immer wieder Einzelfall-Berichte über Personen, die durch Feldexposition unterhalb der Grenzwerte neurologisch beeinflusst werden. Nach berufsbedingten Expositionen oder sogar nach längerer Nutzung von Mobiltelefonen wird über Kopfschmerzen, Sehstörungen, Beeinflussung klaren Denkens und anderes mehr berichtet. Diese Symptome sind zumeist reversibel, können aber über Stunden anhalten. Auch bei Hyperthermie-Behandlung werden in Einzelfällen ähnlich Symptome beschrieben. Handelt es sich bei diesen Personen um Menschen mit speziellen Anlagen oder ist diese Empfindlichkeit einfach in die Extrem-Flanke einer Gauß-Verteilung einzuordnen? Wie lassen sich diese Effekte neurophysiologisch erklären? Müssen deshalb die Grenzwerte korrigiert werden?

Die Autoren versuchen durch einen Überblick aus der Sicht des Neurologen diesen Fragen näher zu kommen. Dabei stützen sie sich auch auf eigene bereits publizierte Einzelfall-Beobachtungen (Hocking und Westerman: *Occup. Med.* **50**, 366, 2000; **52**, 410, 2001; **52**, 413, 2002). In diesen Fällen liegt die Exposition unterhalb der Grenzwerte. Wenn auch „nur“ Einzelbeobachtungen, zumeist nicht im Doppelblind-Test und bisher auch ohne Reproduktion, so sind sie doch bemerkenswert. Zur Erklärung der Phänomene ziehen die Autoren leider Befunde heran, über deren Relevanz man inzwischen in starkem Maße in Zweifel ist (z.B. die leidige Geschichte von der angeblichen Kalzium-Ausschüttung im Gehirn, von Bawin und Adey aus den Jahren 76-78). Die Schlussfolgerung lautet letztlich wie üblich: weitere Forschung ist nötig (Wes-

terman, R. and Hocking, B.: Diseases of modern living-neurological changes associated with mobile phones and radiofrequency radiation in humans. *Neuroscience Letters* **361**,13-16. 2004).

Beeinflussen schwache Felder des Mobilfunks das Kurzzeitgedächtnis und Lernvermögen von Ratten?


Diese Frage glaubten Lai et al. auf Grund ihrer Verhaltensuntersuchungen an Ratten bejahen zu können. Die entsprechenden Experimente wurden zwischen 1987 und 1994 publiziert und erregten große Aufmerksamkeit. Eine 45-minütige Ganzkörperexposition der Tiere mit gepulsten 2,45 GHz-Feldern (0,6 W/kg) reichte demnach aus, die Anzahl von Such-Irrtümern in einem 12-armigen Futter-Labyrinth signifikant zu erhöhen. Die Ratten durchsuchten mit größerer Häufigkeit solche Arme des Labyrinths wiederholt nach Futter, die sie bereits zuvor als leer erkannt hatten. Inzwischen wurde dieser Frage von weiteren Autoren nachgegangen, die allerdings nur dann einen Effekt finden konnten, wenn die Tiere durch starke Felder thermisch beeinflusst und damit gestresst wurden (Mickley et al.: *Physiology & Behavior* 1994, **55**, 1029; Sienkiewicz, et al.: *Bioelectromagnetics* 2000, **21**, 151; Dubreuil, et al.: *Behavioural Brain Research* 2003, **145**, 51; Yamaguchi et al.: *Bioelectromagnetics* 2003, **24**, 223). Allerdings unterschieden sich diese Experimente etwas in Frequenz und Applikationsbedingungen von den Lai'schen. Es gab bisher erst einen Versuch, die Lai'schen Experimente unter gleichen Bedingungen zu reproduzieren. Diese Untersuchungen zeigten allerdings keinen Einfluss des Feldes (Cobb et al., *Bioelectromagnetics* 2004, **25**,49; siehe auch „Neues aus der Wissenschaft“, Heft 2, 2004). Unter Beachtung exakter Dosimetrie und Statistik publizierte jetzt eine weitere Gruppe Experimente, die unter Bedingungen durchgeführt wurden, die denen von Lai et al. möglichst genau entsprachen. Ebenso wie bereits bei den Untersuchungen von Cobb et al. konnte auch diesmal kein Effekt nachgewiesen werden. Um den Widerspruch aufzuklären, diskutierten die Autoren eine Reihe von methodischen Fehlermöglichkeiten in Versuchs-Aufbau, -Durchführung und -Auswertung bei Lai

(Cassel, J. C.; Cosquer, B.; Galani, R.; Kuster, N.: Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter radial-maze performance in rats. *Behavioural Brain Research* **155**, 37-43.2004).


Inzwischen erschien eine neue Arbeit von Henry Lai. Diesmal verwendete er im Verhaltenstest nicht ein mehrarmiges Labyrinth-System, in welchem die Tiere die Futterstelle zu finden hatten, sondern ein 2,5 m großes Wasserbecken, welches nur einen 5 cm tief eingetauchten kleinen Landeplatz aufwies. Die Tiere sollten lernen diesen im trübem Wasser schnell zu finden, indem sie sich beim Schwimmen an der Umgebung des Pools orientierten. Weiterhin wurde in Bezug auf eine ältere (allerdings nie verifizierte!) Hypothese von Litovitz der zusätzliche Einfluss eines verrauschten Niederfrequenzfelds (60 mG) untersucht. Die Bedingungen der Hochfrequenz-Befeldung (eine Stunde bei 2,45 GHz, 2 mW/cm²) waren identisch mit den früheren Versuchen. Lai glaubt mit diesen Experimenten seine früheren Befunde bestätigt zu finden, wonach die Befeldung vor dem Verhaltenstest eine Verminderung der Lernfähigkeit hervorruft. Die zusätzliche Exposition im niederfrequenten Störfeld hebt diesen Effekt auf. Liest ein unvorbereiteter Leser diese Publikation, so wird er wohl von den Resultaten überzeugt sein, denn ähnlich wie T. A. Litovitz (s. Glaser: *Bioelectrochem. Bioenerget.* 1998, **46**, 301), hält wohl auch Henry Lai nichts von der Notwendigkeit, im Abschnitt „Diskussion“ auch Arbeiten zu zitieren, die den eigenen Befunden widersprechen, um Ursachen möglicher Differenzen zu erkennen (Lai, H.: *Interaction of microwaves and a temporally incoherent magnetic field on spatial learning in the rat. Physiology & Behavior* **82**,785-789. 2004).

Beeinflusst das Handy das Kurzzeitgedächtnis des Menschen?


Nachdem die finnische Arbeitsgruppe um Mika Koivisto in Psychotests über eine Erhöhung der Vigilanz und die Beeinflussung des Kurzzeit-Gedächtnisses von Versuchspersonen berichtet hatte (*Neuroreport* 2000, **11**, 413 und 1641), gab es bereits im vorigen Jahr einen vergeblichen Versuch, in Kooperation mit der schwedischen Arbeitsgruppe um Christi-



an Haarala diese Ergebnisse zu reproduzieren (Bioelectromagnetics 2003, **24**, 283, siehe: „Neues aus der Wissenschaft“, Heft 2, 2003). Inzwischen liegt ein weiteres Resultat dieser schwedisch-finnischen Kooperation vor. Erneut wurden in beiden Ländern je 32 Probanden Tests des Kurzzeitgedächtnisses unterzogen und dabei zum Teil der Befeldung durch ein am Kopf fixiertes Mobiltelefon ausgesetzt (GSM Feld: 902 MHz, 217 Hz Pulsfrequenz). Die Intensität der Befeldung war etwas höher als in der Koivisto-Studie (10 g-SAR 0,990, an Stelle von 0,683 W/kg). Die Aufgabe der Probanden bestand im Wiedererkennen von 2 bis 5 Buchstabenfolgen auf einem Bildschirm. Der gesamte Versuchsablauf wurde durch ein Computerprogramm gesteuert und war somit doppel-blind. Im Falle der Befeldung wurde auf der Haut eine Erhöhung der Temperatur von 35,6 °C auf 36,0 °C gemessen, was nach Meinung der Autoren vom Probanden nicht wahrgenommen werden konnte. Die Auswertung der Daten zeigte Lerneffekte sowie geschlechts- und länderspezifische Unterschiede. Dies demonstriert die Empfindlichkeit der Methode. Es konnte jedoch keinerlei Beeinflussung durch das Hochfrequenzfeld festgestellt werden. In Auseinandersetzung mit den früheren Untersuchungen, die in ähnlichen Tests positive Ergebnisse erbracht hatten, vertreten die Autoren die Meinung, dass es sich trotz Signifikanz der Einzeldaten bei der damals angewandten Statistik letztlich um Zufallsergebnisse gehandelt haben könnte. Außerdem beinhalteten derartige Versuche offenbar eine sehr große Anzahl schwer zu kontrollierender Variablen, was leicht zu Fehlschlüssen führen kann. Die Autoren kommen zu dem Schluss, wonach die Nutzung eines Mobiltelefons keinen Einfluss auf das Kurzzeitgedächtnis des Menschen hat, es sei denn, die Effekte sind so gering, dass sie nur sporadisch messbar sind. Gleichzeitig betonen sie jedoch, dass es sich bei diesen Untersuchungen lediglich um Kurzzeit-Experimente handelt, die keine Aussage über Langzeiteffekte ermöglichen (Haarala, C.; Ek, M.; Bjornberg, L.; Laine, M.; Revonsuo, A.; Koivisto, M., and Hamalainen, H.: 902 MHz mobile phone does not affect short term memory in humans. Bioelectromagnetics **25**, 452-456. 2004).



Beeinflussen schwache, modulierte Hf-Felder das EEG von Probanden? Diese schon oft gestellte Frage wurde bisher zumeist verneint. Diese Gruppe aus der Technischen Universität in Tallinn (Estland) hat bereits in den Jahren 1999 (Med. Biol. Eng. Comput. **37**, s105) und 2002 (Int. J. Radiat. Biol. **78**, 937) über den Einfluss von 450 MHz-Feldern, 7 Hz gepulst, auf das menschliche EEG berichtet. Diesmal wurden nicht nur der Alpha-Rhythmus sondern auch die anderen Frequenzen des EEG zur Auswertung herangezogen. Das Ergebnis wird von den Autoren wie folgt zusammengefasst: „Obgleich die Resultate statistisch nicht signifikant sind, können wir aus den experimentellen Ergebnissen und der oben angeführten Diskussion trotzdem schließen, dass die niederfrequent modulierte Strahlung Änderungen im Energie-Niveau des EEG-Rhythmus bewirkt“ (Übersetzt aus dem 2. Absatz in „Conclusion“). Dieses eigenartige Verhältnis der Autoren zur Statistik zieht sich durch die ganze Arbeit. Abgesehen von einer etwas problematischen Technik (kein gedämpfter Raum, unsichere Dosimetrie) war die Applikation nur für den Probanden „blind“. Wenn man unter diesen Bedingungen von „Tendenzen“ spricht, von „Einzelfällen“, und Schlüsse zieht, die statistisch nicht fundiert sind, dann ist es schwer, den Leser zu überzeugen. Die Autoren sind sich immerhin dieser Unsicherheit bewusst und unterstreichen mehrfach, dass es schwierig ist, kleine Effekte aus einem EEG herauszulesen, das von vielen physiologischen Faktoren abhängt und dadurch in breitem Maße streut (Hirikus, H.; Parts, M.; Lass, J., and Tuulik, V.: Changes in human EEG caused by low level modulated microwave stimulation. Bioelectromagnetics **25**, 431-440. 2004).



Beeinflussen Felder des Mobilfunks die Protein-Faltung? Bereits im vergangenen Jahr wurde im Dipartimento di Biochimica e Biofisica der Universität Neapel über diese Frage publiziert (Eur. Bioph. J. 2003, **32**, 628). Damals stellte man fest, dass ein 1,95 GHz Feld selbst nach 2,5 Stunden bei einem SAR von 51 W/kg nicht in der Lage ist, die native Struktur des globulären Proteins Myoglobin zu beeinflussen. Könnte das Feld aber nicht vielleicht Prozesse der Restaurie-

zung dieses Moleküls stören? Zu diesem Zweck wird in einer Folgearbeit die Kinetik verfolgt, mit der sich dieses Protein nach Denaturierung in saurem Medium (pH3) zurück faltet, wenn es wieder unter physiologische Bedingungen gebracht wird. Es zeigte sich, dass dieser Prozess nach Befeldung wenn auch wenig, so doch signifikant langsamer verläuft. Nun kann man bei 51 W/kg nicht gerade von „non-thermal“ sprechen. Tatsächlich erwärmt sich dabei die Lösung auch um 5 Grad auf 30 °C. Auch wenn man die Kontrolllösung konventionell auf die gleiche Temperatur erwärmt, muss das nicht vergleichbar sein. Zumindest hätte sich der Leser die Messung der Temperaturabhängigkeit dieses Prozesses gewünscht, um eine methodische Fehlerabschätzung vorzunehmen. Die Schlussfolgerung der Autoren, die Ergebnisse hätten somit die Möglichkeit eines potentiellen Gesundheitsrisikos aufgedeckt, erscheint bei Applikation eines SAR-Wertes 500fach über dem Grenzwert zumindestens diskussionswürdig (Mancinelli, F.; Caraglia, M.; Abbruzzese, A.; dAmbrosio, G.; Massa, R., and Bismuto, E.: Non-thermal effects of electromagnetic fields at mobile phone frequency on the refolding of an intracellular protein Myoglobin. *J. Cell. Biochem.* **93**, 188-196. 2004).




Erhöhte Krebshäufigkeit in der Nähe Süd-Koreanischer Rundfunksender? Es liegt eine epidemiologische Erhebung vor, in welcher der registrierte Krebstod der Jahre 1994-95 einer 1.234.123 Personen umfassenden Gruppe von Bewohnern sendernaher Bereiche (Radius 2 km) einer 6.881.783 Personen umfassenden Kontrollgruppe gegenübergestellt wird. Von den 107 AM-Sendern Koreas wurden zehn ausgewählt, die Sendeleistungen von 100; 250; 500 und 1.500 kW aufwiesen. Die aus den amtlichen Sterberegistern stammenden Daten wurden nach Krebsart, Geschlecht, Altersgruppe und Leistung des benachbarten Senders aufgearbeitet. Fasst man alle Daten zusammen, dann betrug die durchschnittliche Anzahl von Krebstoten pro 100.000 Anwohnern von Sendetürmen in dieser Periode 113,07, während es in einer Vergleichs-Population nur 87,32 waren. Dies ist eine signifikante Erhöhung um den Faktor 1,29, wo-


bei der 95 %-Konfidenz-Intervall zwischen 1,12-1,49 liegt. Abgesehen von Unterschieden dieses Faktors bei den verschiedenen Krebsarten (maximal bei selteneren Erkrankungen wie Leukämie und Pankreas-krebs, kein signifikanter Unterschied bei dem in Korea häufigsten Magenkrebs), konnten auch Korrelationen zu den Sendeleistungen festgestellt werden. Die Autoren halten diese Werte für beachtenswert, wollen jedoch darin keinen Beweis für einen kausalen Zusammenhang sehen. Als Grund listen sie verschiedene Fehlermöglichkeiten auf: Die Adresse des Sterberegisters muss nicht identisch mit dem Wohnort sein, da es in Korea üblich ist, im Heimatort zu sterben. Die ausgewählten Regionen entsprachen nicht exakt dem 2 km-Umkreis um den Sendemast sondern mussten sich nach administrativen Regionen richten. Es konnten keine Befragungen erfolgen, die eventuell Aufschluss über soziologische und sonstige Begleitumstände („confounders“) erbracht hätten. Fehldiagnosen auf den Totenscheinen sind nicht auszuschließen, dies würde allerdings die Kontrollfälle in gleichem Maße betreffen. Wie in allen epidemiologischen Erhebungen bedeutet natürlich auch hier die kleine Zahl eine Begrenzung der Aussagesicherheit, sodass wie üblich die Schlussfolgerung lautet: „further studies are needed!“ (Park, S. K.; Ha, M., and Im, H. J.: Ecological study on residences in the vicinity of AM radio broadcasting towers and cancer death. Preliminary observations in Korea. *Intern. Arch. Occupat. Environm. Health* **77**, 387-394. 2004).



Gibt es nicht-thermische Einflüsse von 2,45 GHz-Feldern auf Blut- und Knochenmarkzellen? Diese Frage wurde bisher durch mehrere Publikationen kontrovers diskutiert, hauptsächlich jedoch negativ beantwortet. Jetzt liegen die Ergebnisse des Experiments einer Arbeitsgruppe aus Zagreb vor, die erneut dieser Frage nachging. Zu diesem Zweck wurden 40 Wistar-Ratten täglich während 2 Stunden einem Feld von 2-10 mW/cm² ausgesetzt, was einem SAR-Wert von etwa 1,25±0,36 W/kg entspricht (Warum so geringe SAR-Abweichungen, wenn die Leistungsflussdichte um den Faktor 5 schwankt?). Eine Änderung der Körper-



temperatur der Tiere konnte nach der Exposition nicht gemessen werden. Die Befeldung im Fernfeld erfolgte in speziellen Käfigen, in denen sich die Tiere frei bewegen konnten (8*17 cm, 30 cm hoch). Nach 2, 8, 15 und 30 Tagen wurden die Tiere (10 pro Gruppe befeldet, 6 Kontrolltiere) getötet und Proben von Knochenmark, und peripherem Blut entnommen. In den 8- und 15-Tages-Proben (nicht nach 30 Tagen!) wurde bei den befeldeten Tieren eine Erhöhung der Anzahl polychromatischer Erythrozyten gefunden, also roten Blutkörperchen, deren Differenzierung gestört war. Die Signifikanz des Unterschiedes war jedoch gering ($p < 0,05$) und der Effekt offenbar reversibel. Auch eine geringfügige Verminderung der Lymphoblasten, der Ursprungszellen der weißen Blutzellen, stellte man fest. Die Autoren sehen diese Befunde eher als ein Zeichen der Anpassung denn als Krankheitsbild (Trosic, I.; Busljeta, I.; Modlic, B.: Investigation of the genotoxic effect of microwave irradiation in rat bone marrow cells *in vivo* exposure. *Mutagenesis* **19**, 361-364. 2004; Trosic, I.; Busljeta, I.; Pavicic, I.: Blood-forming system in rats after whole-body microwave exposure; reference to the lymphocytes. *Toxicology Letters*. **154**, 125-132. 2004).



Wie sind die derzeitigen Publikationen über mögliche zytogenetische Effekte von Hochfrequenzfeldern einzuschätzen und was sind die Ursachen für die kontroversen Resultate? Zwei Genetiker mit viel Erfahrungen in solchen Untersuchungen haben sich die Mühe gemacht, alle verfügbaren wissenschaftlichen Publikationen zu diesem Thema aus den Jahren 1990 bis 2003 kritisch durchzusehen und auszuwerten. Obgleich das Thema bereits seit mehr als 40 Jahren bearbeitet wird, sind allein in diesem Zeitraum 53 Publikationen dazu erschienen. In 31 davon konnte kein Einfluss gefunden werden, in 12 glaubte man einen solchen nachweisen zu können; die übrigen Arbeiten kamen zu keinem eindeutigen Ergebnis. Nun ist Wissenschaft keine Politik, es entscheidet nicht die Mehrheit! Eine einzige schlüssige Publikation, die möglicherweise den Fehler der anderen aufzeigt, könnte entscheiden! Doch das Umgekehrte ist hier der

Fall: Bewertet man die Arbeiten nach methodischer Zuverlässigkeit, und dazu gehört sowohl eine exakte Dosimetrie, eine zuverlässige Temperaturkontrolle, als auch eine fachgerechte Tier- und Zell-Kultivierung und zytologische Auswertemethode, dann findet man leicht die schwarzen Schafe in den Publikationen, die von einem nachgewiesenen Effekt der Felder sprechen. Die Wertung der veröffentlichten Experimente wird von den beiden Autoren dieser Publikation sorgfältig und unter Beachtung von Kritik und Diskussionen durchgeführt, die zum Teil bereits publiziert wurden. Die Hauptursache für die zum Teil positiven Befunde einiger Autoren liegt offenbar im Fehlen einer exakten Temperaturkontrolle. Es wird auf Experimente verwiesen, wonach bereits eine Temperaturerhöhung über 39 °C zu deutlichen zytogenetischen Änderungen führt. Die generelle Schlussfolgerung der beiden Autoren, wonach Hochfrequenzfelder zumindestens im nicht-thermischen Bereich offenbar nicht als genotoxisch einzuschätzen sind, wird durch die experimentellen und epidemiologischen Studien unterstützt, die bisher keine Einwirkung auf Krebs-Entstehung nachweisen konnten, obgleich dies eine zwingende Folge auftretender genotoxischer Effekte wäre. Zu wenig, so die Meinung des Rezensenten, wird in dieser Arbeit leider auf den Einsatz von Positivkontrollen eingegangen. Vergleicht man nämlich diese eindeutig genotoxischen Einwirkungen, zum Beispiel von Gamma-Strahlen mit den scheinbar „signifikanten“ HF-Effekten, die manche Autoren zu finden glaubten, so bekommt man einen Begriff davon, was tatsächlich „signifikant“ im biologischen Sinne ist, und in welchem methodischen „Rauschen“ die HF-Effekte gesucht werden. – Wie soll es weitergehen? Angesichts der immensen Bedeutung dieser Fragestellung sollte man kritisch weiter prüfen. Dazu, so die Autoren, wäre eine koordinierte multizentrische kooperative Studie mit hoher statistischer Aussagekraft und höchster Qualität in Dosimetrie und zytogenetischer Methodik erforderlich (Vijayalaxmi, Obe, G.: Controversial cytogenetic observations in mammalian somatic cells exposed to radiofrequency radiation. *Radiat. Res.* **162**, 481-496. 2004).

Sind die durch die internationalen Expertengremien empfohlenen und in mehr als 30 Ländern gültigen Grenzwerte tatsächlich viel zu hoch angesetzt?

Diese von einigen Autoren immer wieder aufgegriffene Frage ist erneut von Martin Blank und Reba Goodman in einem „Comment“ formuliert. Die Autoren kritisieren die im vergangenen Jahr in einem Supplementband der „Bioelectromagnetics“ publizierte Review-Artikel über die Wirkung hochfrequenter Felder, und meinen, diese würden den tatsächlichen wissenschaftlichen Fortschritt auf diesem Gebiet nicht adäquat widerspiegeln. Würde man diesen beachten, dann wäre klar, dass der SAR-Wert ein ungeeignetes Maß sei und die Grenzwerte viel zu hoch lägen. Theoretisch wird dies durch die These untermauert, dass nicht die absorbierte Energie, sondern eine oszillierende Kraft die Effekte auslösen würde. Diese wiederum, pro Zyklus einer Schwingung berechnet, sei unabhängig von der Frequenz, da die Quantenenergie einer elektromagnetischen Welle proportional der Frequenz, die Dauer einer Schwingung jedoch zu dieser umgekehrt proportional sei. ELF-Effekte seien deshalb auch direkt mit solchen im HF-Bereich vergleichbar. Bei Hochfrequenzfeldern würden bereits die ersten Wellenzüge die Wirkung auslösen, die dann eventuell durch thermische Effekte überdeckt würde. Ihre Hypothese belegen die Autoren vorwiegend mit Befunden eigener Experimente, ausgehend von den alten Arbeiten über den Feldeinfluss auf die Na-K-Pumpe (die übrigens seinerzeit als Beweis für Frequenzfenster der Wirkung angeführt wurden!), über die Hypothese zur Beeinflussung der Elektronenleitfähigkeit von DNA-Molekülen und den Elektronen-Übergängen im Cytochrom-System, der Destabilisierung von Wasserstoff-Brücken-Bindungen bis hin zum angeblichen Nachweis spezieller Feld-sensibler DNA-Sequenzen. Mit Recht betont Ron Petersen in seinem „Reply“, dass diesen Befunden Experimente zugrunde liegen, deren Replikation bisher niemandem gelungen sei und dass andere, replizierte Befunde der internationalen Wissenschaft diesen Vorstellungen widersprechen. Auch sei es physikalisch völlig unverständlich, dass Wirkungsmechanismen elektromagnetischer Felder frequenzunabhängig sein sollen. Übrigens –

als Meinung des Rezensenten - widerspricht die von Blank und Goodman geäußerte Vorstellung den allerdings ebenfalls nicht belegten Behauptungen anderer, die aus einem angeblich engen und biologisch regulierten Resonanzverhalten schließen, Experimente könnten gar nicht repliziert werden, da die kleinste Abweichung der Versuchsbedingungen bereits die Unvergleichbarkeit der Experimente bewirke. – Die Antwort der oben gestellten Frage sollte deshalb besser auf der Auswertung international replizierter wissenschaftlicher Versuchsdaten basieren, auch wenn Irrtümer und Fehlentscheidungen in der Wissenschaft nie auszuschließen sind (Blank, M. and Goodman, R.: Comment: A biological guide for electromagnetic safety: The stress response. *Bioelectromagnetics* **25**, 642-646. 2004; Petersen, R.: Reply to “A biological guide for electromagnetic safety: The stress response” by M. Blank and R. Goodman. *Bioelectromagnetics* **25**, 647-648. 2004).

Sind die beobachteten neuronalen Effekte beim Mobilfunk-Telefonieren auf Erwärmungen im Kopfbereich zurückzuführen?

Über solche Wirkungen, d.h. Veränderungen der Reaktionszeit von Probanden bei Psychotests, wurde immer wieder berichtet, wenngleich sich diese Ergebnisse immer schwer reproduzieren ließen. Man untersuchte jetzt das Verhalten von je 10 Probanden einmal vor, das andere Mal während der Befeldung durch ein am Kopf befestigtes Mobiltelefon (GSM 902,40 MHz, ca. 0,5 W/kg). Obgleich keine Veränderungen in Geschwindigkeit und Genauigkeit der visuellen Psychotests auftraten, konnte eine geringe ($p=0,02$) Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit gemessen werden. Dies korreliert offenbar zeitlich mit der Temperaturerhöhung im Ohr (um ca. 0,15 Grad Celsius). Die Autoren schließen daraus, dass es sich eventuell um einen Durchblutungseffekt handeln könnte, obgleich die Daten Rückschlüsse auf den genauen physiologischen Mechanismus nicht zulassen (Curcio, G.; Ferrara, M.; DeGennaro, L.; Cristiani, R.; Dinzeo, G., and Bertini, M.: Time-course of electromagnetic field effects on human performance and tympanic temperature. *Neuroreport* **15**, 161-164. 2004).