

Das Seminar „Mechanismen für die Wechselwirkung hochfrequenter Energie mit biologischen Systemen“ in Washington

Bericht einer Reise in die Biophysik der lebenden Zellen unter dem Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder (HF-EMF) des Mobilfunks

Frank Gollnick

Am 22. und 23. Mai 2001 fand im Radisson Barcelo Hotel in Washington, D.C. das „Seminar on Mechanisms for Interactions of RF Energy with Biological Systems“ (Übersetzung: siehe Titel) statt. Neben einer Reihe hochkarätiger Biophysiker aus dem Bereich der Hochfrequenzforschung waren auch Biologen der FGF als Beobachter und Diskussionsteilnehmer zu dem „Workshop“ eingeladen.

An der Veranstaltung, die vom MMF (Mobile Manufacturers Forum) getragen und geplant war, nahmen die folgenden Wissenschaftler teil:

Dean Astumian (Department of Physics, University of Maine, USA)
Quirino Balzano (Berater, ehem. Florida Research Laboratories, Motorola, Inc., USA)
Frank Barnes (Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Colorado, USA)
Howard Bassen (Electrophysics Branch, US Food and Drug Administration [FDA], USA)
Ferdinando Bersani (Dipartimento Di Fisica, Universita Di Bologna, Italien)
Chris Davis (Department of Electrical Engineering, University of Maryland, USA)
Larry Dworsky (Florida Research Laboratories, Motorola, Inc., USA)
Roland Glaser (Institut für Biologie u. Experimentelle Biophysik, Humboldt-Universität Berlin, Deutschland)
Frank Gollnick (Forschungsgemeinschaft Funk e.V., Deutschland)
Sakari Lang (Nokia Research Center, Finnland)
William F. Pickard (Department of Electrical Engineering, Washington University, USA)
Earl Prohofsky (Physics Department, Purdue University, USA)
Asher Sheppard (Asher Sheppard Consulting, USA)
Mays Swicord (Florida Research Laboratories, Motorola, Inc., USA)
James Weaver (Harvard-MIT Division of Health Sciences and Technology, Massachusetts Institute of Technology, USA).

Da die Veranstaltung ganz ohne die sonst üblichen vorbereiteten Vorträge geplant war, stand die gesamte Zeit für eingehende Diskussionen zu den vorbereiteten Themenkomplexen zur Verfügung. Diese Herangehensweise führte zu einer ungewohnt dichten und äußerst effektiven Diskussion mit dementsprechend greifbaren Ergebnissen. Zur Orientierung diene der folgende Themenkatalog:

- 1. Durch HF-EMF verursachte Temperaturgradienten**
- 2. HF-EMF-Wechselwirkungen auf der Ebene der Zellen**
- 3. HF-EMF-Wechselwirkungen auf molekularer/chemischer Ebene**

4. **Wechselwirkung zwischen vielen Teilchen (Kooperativität, Kohärenz, Nichtlineare dynamische Prozesse, Stochastische Resonanz)**
5. **Magnetische Dipol-Wechselwirkungen**

Die Fragen, die am Ende offen blieben, wurden gesammelt und zu einer Aufgabenliste zusammengestellt. Hieraus werden zur Zeit Forschungsaufgaben an einige mit den Themen vertraute Wissenschaftler vergeben, die binnen einer relativ kurzer Frist (ca. ein Jahr) Lösungen zu den wichtigsten offenen Fragen finden sollen, entweder durch mathematische Kalkulationen oder durch experimentelle Arbeiten. Das Seminar war Teil einer Reihe von wissenschaftlichen Diskussionsveranstaltungen, wovon der größte Teil bislang von der FGF durchgeführt wurde bzw. noch in diesem Jahr durchgeführt werden wird. Es handelt sich dabei um den Workshop „*Biological and Biophysical Research at Extremely Low- and Radio-Frequencies*“ („*Biologische und biophysikalische Forschung zu extremen Nieder- und Funkfrequenzen*“) in Bad Münstereifel im Dezember letzten Jahres (siehe FGF Newsletter 1/01, S. 1-8) sowie um einen Folge-Workshop mit dem Titel „*Physical Effects of Pulsed RF Fields at Microscopic and Molecular Dimensions (Microdosimetry)*“ („*Physikalische Wirkungen gepulster Hochfrequenzfelder in mikroskopischen und molekularen Dimensionen [Mikrodosimetrie]*“), den die FGF vom 17. bis 19. Dezember 2001 in Dresden durchführen wird. Dort sollen bereits erste Zwischenergebnisse der momentan vergebenen Forschungsaufgaben präsentiert und diskutiert werden. Weitere Workshops sind in diesem Zusammenhang vorgesehen. Insgesamt wird somit konsequent einer wichtigen Kernfrage nachgegangen, die sich im Zusammenhang mit möglichen nachteiligen Einwirkungen von Mobilfunkfeldern auf biologische Systeme und den Menschen immer drängender stellt: Gibt es überhaupt greifbare physikalische Mechanismen, die zweifelsfrei eine (womöglich schädigende) Beeinflussung biologischer Substanz erwarten lassen? Sicher muss man hierbei, wie es nun geschieht, eher in der Anatomie der Zellverbände und Zellen (bis hinunter auf die molekulare Ebene) als in der Anatomie ganzer Organismen nach möglichen Orten einer Wechselwirkung von hochfrequenten, gepulsten Feldern mit biologischem Material suchen (vergleiche hierzu auch FGF Newsletter 01/01, S. 9-14 und S. 15-22). Es ist für diese neuen Betrachtungen maßgeblich, dass die infrage kommenden Felder im physikalischen Sinne äußerst schwach sind und zudem die eingetragenen Energiespitzen nur extrem kurzfristig einwirken (im Nano- bis Mikrosekunden-Bereich).

Zum Auftakt des Seminars in Washington wurde von Mays Swicord zunächst der aktuell verfolgte Ansatz den bisherigen Forschungsaktivitäten gegenübergestellt. Wurde bislang nach bestimmbar biologischen Reaktionen aufgrund der Einwirkung elektromagnetischer Felder gesucht, begibt man sich nun an das andere Ende einer vorgegebenen Wirkungskette: Fände man bei den weiter oben erwähnten physikalischen Wechselwirkungen greifbare Ansatzpunkte (d.h. beeinflussbare Zielobjekte auf molekularer Ebene) für einen Einfluss der Mobilfunkfelder, dann wären auf dem Weg über die daraufhin veränderten biochemischen Reaktionen in den Zellen auch erklärbar Effekte auf messbare biologische Parameter vorstellbar. Bislang besteht das Dilemma in der Forschung darin, dass zwar immer wieder (aber insgesamt betrachtet nur zum geringeren Teil) Einzelhinweise auf biologische Wirkungen - auch durch schwache Feldeinflüsse - gefunden werden, diese aber nie durch ein schlüssiges Wirkungsmodell auf molekularer Ebene erklärbar sind. Solange solche Erklärungen fehlen, bleiben Zweifel zwangsläufig bestehen, ob die

gefundenen Effekte tatsächlich durch die angewendeten Felder im Experiment verursacht wurden, oder durch einen womöglich unbeachteten Nebeneffekt.

Ohne chemische Reaktion kein Effekt

James Weaver bestätigte in der Darstellung seiner Ansicht, dass man biologische Effekte an Zellen und Molekülen aufgrund von Feldwirkungen nur dann erwarten könne, wenn sozusagen „im Schritt vorher“ irgendeine entscheidende chemische Reaktion verändert würde: „Ohne chemische Reaktion gibt es keinen Effekt“. Gegen diese Aussage standen in der Diskussion zunächst die bekannten Arbeiten von Litovitz (z.B. 1993), nach denen auch direkte Feldeinwirkungen auf entscheidende Zielmoleküle (ohne Umweg über chemische Reaktionen) durch Resonanz mit den eingestrahlten Wellen möglich sein sollen. Dieser Aspekt wurde im späteren Verlauf noch einmal eingehender diskutiert (s.u.).

Weiterhin betonte Weaver die Tatsache, dass die eingestrahlte Energie sich bei der **Übergabe** an das biologische Material in den Mikrostrukturen der Zellen zwar **gleichmäßig** verteilt, diese Energie aber je nach Materialeigenschaften der Strukturen dort sehr **inhomogen deponiert** werden kann.

Das Temperaturproblem im Mikrobereich

Anhand dieser Aussage Weavers entzündete sich eine weitere Diskussion, in der hinterfragt wurde, wie groß die Temperaturänderungen im Gewebe und vor allem in den Zellen bzw. deren Mikrostrukturen aufgrund der durch Mobilfunkfelder eingestrahlten Energiebeträge sein können und wie lange diese Änderungen auf die Biomoleküle wirken.

Frank Barnes stellte Berechnungen vor, in denen die Wirkung von nur Pikosekunden (ps) dauernden Pulsen eines Hochfrequenzsignals auf Haarzellen simuliert wurden (Haarzellen setzen im Innenohr Schallsignale in die für das Gehirn verwertbaren elektrischen Signale um). In acht Stufen wurden Berechnungen für Pulse einer inhomogenen Welle im Bereich von 12 bis 64 ps Dauer durchgeführt. Durch diese Anregung kam es (rechnerisch) zu einer Fortleitung des Reizes in Richtung Gehirn; ein theoretischer Hinweis also auf eine mögliche neuronale Verarbeitung der extrem kurzen Pulssignale. Weitere vorliegende Eckdaten zu diesem Problemkreis wurden erläutert und diskutiert:

- Eine Temperaturänderung von ca. 0,5 °C führt laut Barnes zu einer sicher feststellbaren Denaturierung („Gerinnung“) von Eiweiß.
- Barnes stellte experimentell bei relativ hohen Energieeinträgen (ca. 1 °C/Sek.) Einflüsse auf die Feuerrate (d.h. Taktgeber-Rate) von Schrittmacher-Neuronen (Nerven, die den Takt für bestimmte Funktionen im Körper vorgeben oder weiterleiten) fest.
- In zwei allgemein anerkannten Publikationen aus dem Jahr 2000 wurde der größte „Hot Spot“ (berechneter, lokal eng begrenzter Punkt erhöhter Temperatur bzw. Energieansammlung im Gewebe durch Hochfrequenz-Einstrahlung) in Kopfmodellen des Menschen bei Energieeinträgen wie beim Mobiltelefonieren mit 0,06 °C angegeben.

William Pickard gab in diesem Zusammenhang zu bedenken, dass bei dem Temperaturproblem seiner Ansicht nach die Geschwindigkeit der entscheidende

Faktor sei: Ein gewisses Auf und Ab der Temperatur in einem gesunden Körper im Bereich von 1 °C sei ganz normal. Wenn aber durch die von außen eingestrahlte Energie die Temperatur an einer mikroskopischen Struktur z.B. 100 mal pro Sekunde steigt und wieder sinkt, dann wäre das ein unnatürlicher Effekt, den der Körper nicht gewohnt ist. Folglich könnte der Körper in dem Fall Probleme bekommen, mit solchen Auswirkungen umzugehen. Somit hält Pickard biologische Effekte durch Temperaturerhöhung grundsätzlich für möglich: „Effekte durch Temperaturerhöhung sind möglich; ob dies Auswirkungen hat, hängt davon ab, wie groß die Erhöhung ist und wie lange sie einwirkt.“

Dean Astumian leitete ab, dass die Passage eines Kalziumions durch einen Membrankanal ca. 10^{-7} Sekunden (eine Zehnmillionstel Sekunde) dauert. Durch Umrechnung ergab sich, dass Hochfrequenzfelder mit Frequenzen über 10 MHz sehr wahrscheinlich keinen Einfluss mehr auf einen solchen Prozess haben können.

Aus der Diskussion wurde der folgende Bedarf an exakten, eingehenderen Nachforschungen zu folgenden noch ungeklärten Problemen formuliert:

- Theoretische genaue Bestimmung von zeitlichen und räumlichen Temperatur- und Energiegradienten auf mikroskopischem (Nanometer-Bereich, Moleküle) und makroskopischem (bis Millimeter-Bereich, Zellen und Gewebe) Niveau. Frage: Wie verläuft eine Temperaturänderung in Zeiträumen unter 1 Millisekunde (bei gepulsten Signalen) bis hinunter zu 1 Nanosekunde (was ca. einer Sinusschwingung bei einem Signal um 1 GHz entspricht)?
- Bestimmung, ob solche Gradienten stark genug sind, biochemische Prozesse anzutreiben bzw. zu verändern.
- Betrachtungen zu Temperaturänderungen in Zeiträumen unter einer Millisekunde und in komplexen geometrischen Verhältnissen (biologische Zellen verschiedener Form und Größe).

Wechselwirkungen auf zellulärer Ebene

In diesem von Ferdinando Bersani eingeleiteten Diskussionsteil wurden zunächst die Kernaussagen zu Wirkungsmodellen für HF-Feldeinwirkungen aus zwei hierfür wichtigen Publikationen einer kritischen Betrachtung unterzogen. In dem einen Artikel (Apollonio et al., 1998) wird ein durch das HF-Feld hervorgerufenes Transmembranpotential von einem Mikrovolt als physikalische Ursache für einen veränderten Fluss von Ionen durch Ionenkanäle in der Membran von Zellen beschrieben. Die anwesenden Experten konnten allerdings nicht nachvollziehen, wie es physikalisch zu diesem sogenannten „induzierten Membranpotential“ kommen soll. Die Erklärungen in dem genannten Papier reichen dazu nicht aus. Auch in dem anderen theoretischen Artikel von Chiabrera et al. (2000) war die Darstellung der Ursachen für Einflüsse von HF-Feldern auf die Bindung von Liganden (Bindungspartnern) an Zellrezeptor-Moleküle (z.B. Bindung von Ca^{2+} -Ionen an Kalziumrezeptoren) den Diskussionsteilnehmern nicht plausibel. Die angeblich für den Effekt verantwortliche, durch HF-Feldeinfluss veränderte Dynamik bei der Ligandenbindung wird in dem Papier ursächlich nicht erklärt. Zum Teil bestritten die Teilnehmer sogar, dass die Zahlenwerte aus der Veröffentlichung korrekt sein können. Als notwendige Aufgabe für weitere Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet wurden konkrete experimentelle Methoden vorgeschlagen, mit denen man direkt die oben erwähnten dynamischen Änderungen bei der Ligandenbindung unter

HF-Feldeinfluss testen könnte. Bezüglich der in Apollonio et al. (1998) beschriebenen Membranpotentialänderungen wurde der Bedarf an neuen Berechnungen formuliert, damit man die genauen Schwellen für Feldstärken und Frequenzen erfährt, bei denen die beschriebenen Effekte überhaupt eintreten können.

Der bekannte direkte, elektrische Gleichrichter-Effekt, den Zellmembranen auf HF-Felder haben, basiert nach Pickard & Rosenbaum (1978) auf Nicht-Linearitäten und beeinflusst die Bewegung von Ionen durch die Zellmembran. Somit wären hiermit bestimmte biologische Effekte erklärbar. Nach Pickard ist diese Art von Gleichrichtung jedoch oberhalb einer Trägerfrequenz von ca. 10 MHz nicht mehr möglich, weil die Zeit, die Ionen benötigen um eine relevante Distanz zurückzulegen, eine merkliche Beeinflussung durch HF-Wellen in diesem Bereich sehr unwahrscheinlich macht. Ionen werden demnach also durch ihre relative Trägheit gegenüber dem immer schneller schwingenden HF-Feld oberhalb von 10 MHz unbeeinflussbar.

In Zusammenhang hiermit wurde weiterer Forschungsbedarf mit folgenden Schwerpunkten formuliert:

- Verfeinerte Berechnung der Schwellenwerte für Feldstärken, Trägerfrequenzen und Pulsungsparametern, bis zu denen direkte Einflüsse auf das Membranpotential von Zellen möglich sind
- Berechnungen zur Bestimmung, ob vielzellige Strukturen den Effekt der Gleichrichtung womöglich verstärken oder abschwächen im Vergleich zu Einzelzellen (von denen die bisherigen Erkenntnisse abgeleitet wurden)
- Mit physikalischen Messmethoden sollten elektrische Nichtlinearitäten von Zellen im unteren GHz-Frequenzbereich untersucht werden

In Publikationen von Kotnik & Miklavcic (2000) werden bekannte Berechnungen nach Schwan zur Beeinflussung des Membranpotentials einer runden Zelle in einem elektrischen Feld noch erweitert. Die Autoren ziehen Feldverstärkungen an dielektrischen Übergangsschichten (wie z.B. der Übergang von der Zellmembran zum in der Zelle befindlichen Zellplasma oder zum Außenmedium) mit in ihre Betrachtungen ein.

- Theoretische Arbeiten sollten hierzu klären, ob die demnach möglichen Temperaturerhöhungen in den kleinen Dimensionen einer Zellmembran (ca. 1/100000 mm) für biologische Systeme relevant sind, wenn man von den sehr kurzen Einwirkzeiten der Pulse und den Frequenzen wie beim Mobilfunk ausgeht

Die Membran einer lebenden Zelle ist an ihrer Innen- und Außenseite von Schichten gegensätzlich geladener Ionen überzogen. Durch äußere Felder können diese „Gegenionen“ polarisiert werden („ α -Dispersion“, bekannt von niederfrequenter Feldeinwirkung). Da es für das Entstehen des Phänomens keine scharfe Grenzfrequenz gibt, wurde die theoretische Möglichkeit auch für den unteren GHz-Frequenzbereich des Mobilfunks diskutiert. Hierbei könnten vor allem biologische Prozesse relevant werden, die von ihrer Energiebilanz her betrachtet sozusagen ständig „auf der Kippe“ stehen. Solche Vorgänge in Zellen und an der Plasmamembran von Zellen sind z.B.:

- der Wechsel bei bestimmten Eiweißmolekülen zwischen zwei fast gleichen Energiezuständen,

- die Zell- und Eiweißmolekül-Zusammenlagerung (Aggregation),
- die Aneinanderreihung von Kolloidpartikeln zu Strängen oder auch
- die komplizierten Vorgänge beim biochemischen „Korrekturlesen“ während der Vervielfältigung (bei der Zellteilung) und der Ablesung (zur Eiweißsynthese) unserer Erbmasse (DNA).

All diese Vorgänge funktionieren mit sehr wenig Energieumsatz und trotzdem sehr effektiv, weil die Systeme vom Energiegehalt her sehr instabil auf einem „Sattelpunkt“ liegen. Sehr geringe äußere Einflüsse auf die Wahrscheinlichkeit, dass das betreffende System richtig funktioniert, könnten somit – vor allem bei sich vielfach wiederholenden Prozessen, wie das erwähnte „Korrekturlesen“ – zu einer nennenswert erhöhten Fehlerrate führen.

- Von den Wissenschaftlern wurde empfohlen, genaue Berechnungen zu den erwähnten Mechanismen der Ionenpolarisation und des „Korrekturlesens“ in Auftrag zu geben. Dabei sollten die quantitativen Grenzen ermittelt werden, bis zu welchen die äußeren Störeinflüsse, z.B. durch Felder des Mobilfunks, noch eine biologische Relevanz haben können. Hierbei sollten – wie auch bei den anderen Fragestellungen – wenn möglich immer mehrzellige Systeme im Vergleich zu einzelnen Zellen in Betracht gezogen werden, außerdem auch der mögliche Einfluss der oben erwähnten, inhomogenen dielektrischen Übergangsschichten.

Wirkliche biologische Strukturen sind immer räumliche Strukturen mit eigenen Feldverteilungen. Es wurde von James Weaver aufgezeigt, dass die Forschung im Labor an einzelnen Zellen oder einzelligen Zellschichten immer der Beschränkung unterworfen ist, die Feldverteilung im Gewebe nur unvollkommen nachzuvollziehen. Trotzdem sind solche Untersuchungen als ein Element in der Gesamtforschung sinnvoll und notwendig. Wie von Weaver gezeigt wurde, können ergänzende Berechnungen, die heute mit modernen Methoden möglich sind, die mangelnde Übertragbarkeit von Einzelzellmessungen auf die Gegebenheiten im Körpergewebe wesentlich verbessern.

Wechselwirkungen auf molekularer und chemischer Ebene

Zu diesem Thema wurden eine Reihe von theoretisch möglichen Mechanismen diskutiert, aufgrund welcher die durch Mobilfunkfelder ins biologische System eingebrachte Energie dort erst einmal „eingefangen“, also biologisch oder chemisch **wirksam** deponiert werden könnte. Nur wenn man einen solchen Mechanismus nachweisen könnte, wären biologische Wirkungen, verursacht durch die Felder, überhaupt wahrscheinlich. Dabei musste in der Diskussion oft für die zum Teil bei sehr hohen Energieeinträgen nachgewiesenen Mechanismen heruntergerechnet werden auf die schwachen Energiewerte, die im Mobilfunkbereich vorkommen (d.h., die bei Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte beim Menschen ankommen). Die Kernfrage dabei lautete: Kann bei den Mobilfunkfrequenzen im Bereich von 1-2 GHz bei normaler Stärke überhaupt ein wirksames Signal entstehen, das über die Zellmembran hinweg ins Zellinnere vordringt?

Als erster der denkbaren Mechanismen wurde die **Resonanz** von GHz-Feldern mit biologischen Molekülen angesprochen. Biomoleküle befinden sich bei Körpertemperatur immer in einer gewissen, vibrierenden Bewegung, die durch die

vorhandene Wärme verursacht wird („thermisches Rauschen“). Nach Diskussion über die vorhandene Fachliteratur zu diesem Thema kam man zu dem Schluss, dass vor allem die starke Dämpfung der Molekülbewegungen durch die umgebenden Wassermoleküle es sehr unwahrscheinlich macht, dass Biomoleküle mit schwachen Feldern im Frequenzbereich von 1-2 GHz in Resonanz geraten und dadurch in ihrer Funktion verändert werden. Nur in einer „ballistischen“ Anordnung, wo Schleuderkräfte überwiegen, können scharfe Resonanzen entstehen (z.B. ist dies der Fall bei Elektronen, die durch Metall geleitet werden – hier überwiegen elastische Zusammenstöße, die Dämpfung tritt dabei in den Hintergrund)

- Es wurde angeregt, dass man durch Berechnungen überprüfen müsste, ob eine „ballistische“ Übertragung von Ionen durch Eiweiße hindurch vorkommen kann, die Membrankanäle bilden (Kanalproteine in Zellmembranen). Hier gäbe es dann einen theoretischen Ansatzpunkt für biologische Auswirkungen durch Resonanzphänomene. Es müsste in diesem Fall so etwas wie ein Porenprotein mit einem inneren Vakuum geben, was jedoch für sehr unwahrscheinlich gehalten wurde.

Auch einige weitere Mechanismen drängten sich bei genauem Hinsehen nicht als plausibler Ansatz für eine Übergabe von Energie an molekulare biologische Elemente auf. Die hierbei besprochenen Phänomene

- Phasenübergänge biologischer Moleküle (z.B. bei β -Laktose),
- Kapitza-Widerstand und
- Abnorm schwache Dämpfung

sind in der entsprechenden Fachliteratur eingehend erklärt. Phasenübergänge werden bei β -Laktose nur für sehr hohe Energieeinträge von 400 W/kg beschrieben, der Einfluss des Kapitza-Widerstands kann über einen Faktor von 2 sehr wahrscheinlich nicht hinausgehen und das Phänomen der abnorm schwachen Dämpfung wurde im Zusammenhang mit Biomolekülen für schwer vorstellbar gehalten.

Andere Mechanismen wurden als Erklärung für biologische Wirkungen zumindest für vorstellbar gehalten, erfordern also noch weitergehende Erforschung. Hierzu zählen Ionen (z.B. Kalziumionen), die von bestimmten Molekülen (z.B. Calmodulin) oder Membrankanälen wie in einem Käfig gebunden bzw. gehalten werden („caged ions“), und zwar dort **ohne** umgebende Wassermoleküle. Es wäre wichtig zu erfahren, ob für die Ionen in diesem speziellen Zustand – trotz immer noch vorhandener starker Dämpfung - Resonanzerscheinungen (d.h., „Einfangen“ von Energie) nennenswert zum tragen kommen könnten. Ebenfalls zuwenig erforscht erschien den Experten die Möglichkeit, ob Felder des Mobilfunks in der Lage sind, bereits laufende enzymatische Prozesse (Stoffumsatz an regulierenden oder Reaktion vermittelnden Eiweißmolekülen, den „Enzymen“) zu stören. Hierzu müsste die Energie der HF-Felder zusammen mit höheren Energiezuständen, in welche die Enzyme kurzfristig gebracht werden, gespeichert werden. Falls diese Möglichkeit bestünde, hielten es einige der Anwesenden jedoch für unwahrscheinlich, dass die künstlich veränderten Energiezustände lange genug anhielten, um biologisch bzw. biochemisch effektiv etwas zu bewirken.

Eine von William Pickard präsentierte Überschlagsrechnung machte deutlich, wie groß eine biologische Struktur etwa sein muss, damit die als Beispiel gewählte Energie eines Mobilfunkfeldes von 10 W/kg dort unter durchschnittlichen Bedingungen innerhalb eines Zeitraums von 1 Sekunde „eingefangen“ (absorbiert)

werden kann. Die Beispielwerte wurden bewusst extrem groß gewählt. Die Rechnung ergab, dass die Struktur eine Größe von ca. 7 Nanometern haben muss, was etwa der Dicke einer Zellmembran entspricht. Da in einer (in molekularen Dimensionen gesprochen) so großen Struktur die eingebrachte Energie in vielen physikalischen Energiezuständen („Moden“) vorliegt, hielt man es für sehr unwahrscheinlich, dass die Energie dort zu **einem** Zustand „zusammenfließen“ könne, der erst dann effektiv eine chemische Veränderung bewirken würde. Auch Resonanzerscheinungen wurden in dem Zusammenhang für unmöglich gehalten, weil dazu die Einwirkzeit des EMF in unrealistische Bereiche erhöht werden müsste. Somit sind die weiter oben erwähnten Resultate von Litovitz auch nicht durch Resonanz erklärbar. Auch anhand anderer Theorien konnten diese Ergebnisse bislang nicht erklärt und somit auch nicht bestätigt werden.

Dean Astumian brachte in Anlehnung an Aggregations(Zusammenlagerungs-)phänomene aus der Kolloidchemie (Chemie schwebend aufgeschwemmter, ungelöster Teilchen) eine Theorie vor, nach der sich bei nicht-kugelförmigen Gebilden induzierte Dipolmomente zu einem Netto-Dipolmoment aufsummieren können. Ein solches größeres Dipolmoment im Bereich eines Moleküls könnte mit einem von außen eingebrachten Hochfrequenzfeld theoretisch in Wechselwirkung treten. In diesem Zusammenhang wurden Phänomene wie z.B. die Wanderung von Eiweißmolekülen in eine bestimmte Richtung bei sogenannten „Capping-Prozessen“ (Konzentrierung von bestimmten Eiweißen in speziellen Regionen der Zellmembran) an Zelloberflächen (z.B. Lymphocyten, weiße Blutkörperchen) angesprochen. Auch könnten die Kräfte beeinflusst werden, die zwischen bestimmten Eiweißen im Blutserum wirken und die bei der Aneinanderreihung von Erythrocyten (roten Blutkörperchen, „Geldrollenbildung“ im Blut) die auslösende Rolle spielen. Andere Teilnehmer meinten jedoch, dass diese Beispiele für mögliche weitreichende Auswirkungen der beschriebenen Krafterflüsse mit biologischer Relevanz nicht zwingend zutreffend seien.

Letztlich wurden zu dem Thema „molekulare/chemische Wechselwirkungen“ alle erdenklichen Mechanismen wegen zeitlicher Aspekte bei Zusammenstößen, Bindungsvorgängen und Übergängen unter den Moleküle in Frage gestellt. Die Zeit **zwischen** diesen Vorgängen ist immer viel länger als die Vorgänge selbst. Somit wäre die Zeit für eine Einflussnahme durch ein künstliches HF-Feld, falls möglich und vorhanden, theoretisch viel zu kurz, um energetisch betrachtet einen biologisch wirksamen Effekt zu erzeugen – d.h., es lässt sich (vereinfacht gesagt) theoretisch in der kurzen Zeit viel zu wenig Energie von dem HF-Signal „abzweigen“, um dadurch einen Effekt zu bewirken. Allgemein kann hierzu gesagt werden: Damit (in molekularen Dimensionen) biologisch überhaupt etwas passieren kann, muss durch eine biologische Struktur ein Energiebetrag vom künstlich angelegten Feld „eingefangen“ werden, der **zumindest** der Energie des vorhandenen „thermischen Rauschens“ (s.o.) entspricht. In dem Zusammenhang müsste überprüft werden, ob die neueren Erkenntnisse von Kotnik & Miklavcic (2000) nachvollziehbar richtig sind. Dann nämlich wären Änderungen des Membranpotentials von Zellen (im Gegensatz zu den älteren, heute geltenden Erkenntnissen von Schwan, s.o.) auch durch die Einwirkung von Mobilfunkfrequenzen im GHz-Bereich möglich. Laut Dean Astumian wären nach Kotniks und Miklavcics theoretischen Erkenntnissen unter Mobilfunkbedingungen Membranpotentialänderungen von bis zu 500 μV möglich, die durchaus eine biologische Relevanz haben könnten. Die physikalischen

Zusammenhänge, die in den entsprechenden Publikationen beschrieben werden, sind jedoch selbst für Fachleute nur schwer verständlich.

Wechselwirkung zwischen vielen Teilchen

Chris Davis brachte unter diesem Themenkomplex zunächst das bekannte Modell von Fröhlich zur Sprache, wonach es eine weitreichende Kohärenz zwischen elektrischen Dipolen an der Oberfläche von Zellmembranen geben soll. Kohärenz bedeutet physikalisch, dass mehrere zusammenhängende Schwingungswellen die gleiche Frequenz und eine gleichbleibende Phasendifferenz haben (bekannt bei Lichtwellen des Laserlichts). Die Kohärenz an Zellmembranen könnte ein theoretischer Ansatzpunkt für einen Einfluss von HF-Feldern auf lebende Zellen sein. Die Teilnehmer des Workshops erklärten die Theorie von Fröhlich jedoch für nicht plausibel, weil sie verschiedene unrealistische Annahmen beinhaltet und experimentell nicht belegt ist:

- Die Dämpfung durch die vorhandenen Wassermoleküle ist nicht berücksichtigt
- Beim Zurückrechnen von Fröhlichs Formeln wäre eine unrealistische Zellmembrandicke notwendig, damit das Modell funktioniert
- In Fröhlichs Formeln findet man keinerlei Zahlen, welche die Theorie nachvollziehbar machen könnten.

In einer demnächst veröffentlichten Studie beschäftigte sich Adair (2001) mit der Problematik und kam zu dem Schluss, dass weitreichende kooperative Mechanismen, wie die Kohärenz, wegen der erwähnten Dämpfung durch Wasser an Zellmembranen nicht möglich sind.

Auf der anderen Seite ist die Synchronisation von gekoppelten Schwingungssystemen **ohne starke Dämpfung** möglich. Das Vorhandensein solcher synchronisierter Systeme in lebendem Gewebe sollte genauer erforscht werden. Außerdem müssten die Feldstärken berechnet werden, bei denen solche Systeme trotz vorhandener Dämpfung in kohärente Schwingung geraten.

Nichtlineare Dynamik stellt allgemein einen Erklärungsansatz für empfindliche Reaktionen komplexer Systeme auf äußere Reize dar. Im Zusammenhang mit der direkten Einwirkung von Feldern des Mobilfunks auf biologische Systeme kann dieses Erklärungsprinzip nach Meinung der anwesenden Wissenschaftler - wegen der physikalischen Natur der möglicherweise zu erwartenden Einwirkung - außer Acht gelassen werden.

Auch die sogenannte „Stochastische Resonanz“ (stochastisch: unter Einbeziehung von Zufallsgrößen und zufälligen Ereignissen in einer statistischen Auswertung), die als Erklärung für eine erhöhte Empfindlichkeit anderer Reaktionssysteme herangezogen werden kann, musste in Bezug auf die Einwirkung von HF-Feldern als praktisch irrelevant erklärt werden. „Stochastische Resonanz“ kann das effektive Signal-zu-Rausch-Verhältnis hier nicht um einen nennenswerten Faktor verändern. Nach James Weavers Aussage sind in vielen dazu durchgeführten Studien die normalen physiologischen Temperaturschwankungen in biologischen Systemen unberücksichtigt geblieben. Somit wurde auch dieser Erklärungsansatz auf der Suche nach einem möglichen Angriffspunkt für Mobilfunkfelder an biologischen Systemen verworfen.

Magnetische Dipol-Wechselwirkungen

James Weaver erklärte in seiner Einleitung zu dem Thema, dass sogen. „Magnetosomen“ (Magnetitpartikel, d.h. ferromagnetisches Material, umgeben von einer Doppelmembran) u.a. in Zellen des menschlichen Gehirns zu finden sind. Ihr Aufbau ist ähnlich dem der Magnetobakterien, die ebenfalls Magnetitpartikel in sich tragen. Es ist bis heute unbekannt, ob Magnetosomen im Gehirn eine Funktion haben und, wenn ja, welche. Kirschvink (1996) stellte Überlegungen an, nach denen kleine Mengen des „biologischen Magnetits“ genügend Energie von äußeren Feldern über den Mechanismus der „ferromagnetischen Resonanz“ absorbieren („einfangen“) könnten, so dass es zu einer lokalen Erwärmung in der Umgebung der Magnetosomen kommt. Kirschvink selbst schätzte die Temperaturerhöhung aber schon als so geringfügig ab, dass man ihr keine biologische Relevanz zuschreiben kann (10^{-4} °C, d.h. weniger als 1/10000 °C, bei einer Zelle, die Mobilfunkfrequenzen einer Stärke von 10 mW/cm² ausgesetzt ist). Außerdem sind die Magnetosomen in den Zellen von einer elektrisch isolierenden Schicht, eben der Doppelmembran (aus Phospholipidmolekülen), umgeben. Dieser Isolationseffekt vermindert induzierte Ströme („Eddy-Ströme“) in der Umgebung der Magnetosomen, was eine wirksame Erwärmung noch weiter verhindert – ein Faktor, der in neueren Arbeiten zum Teil übersehen wurde (Dobson et al., 2000). Die Möglichkeit einer lokalen Erwärmung durch Magnetosomen wurde von den Teilnehmern des Workshops als nicht plausibel verworfen.

William Pickard könnte sich jedoch vorstellen, dass ein durch HF-Felder aus dem Magnetit ausgelöstes Phonon („Schallquant“, „Gitterschwingungsquant“; hypothet. Elementarteilchen, das ähnlich wie das Photon bei der elektromagnet. Strahlung als Energieüberträger wirken kann) z.B. ein Eiweiß in der Zellmembran (hier ein „Transmembranprotein“) so verändern kann, dass es an seinem Ende an der Zellaußenseite dann chemisch anders reagiert. Um Effekte durch Magnetit ganz ausschließen zu können, müsste nach Pickards Meinung noch gezeigt werden, dass der Stoff die von ihm eventuell aufgenommene Energie nicht verwertbar (d.h., irgend etwas verändernd) weitergeben kann.

Der „Radikal-Paar-Mechanismus“ (RPM), welcher zur Entstehung der (in lebenden Zellen chemisch aggressiv reagierenden) „Freien Radikale“ führt, ist u.a. für die Einwirkung von starken (Steiner & Ulrich, 1989) aber auch relativ schwachen (Grissom, 1995), statischen Magnetfeldern beschrieben worden. Von den anwesenden Wissenschaftlern wurde zu diesem Thema keine eingehende Diskussion geführt, da keine entsprechenden Wirkungen von HF-Feldern bekannt sind.

- Es wurde jedoch ein Bedarf an theoretischen Berechnungen erklärt, mit denen die Grenzen der Anwendbarkeit des RPM für den Bereich hochfrequenter Felder des Mobilfunks festgestellt werden sollten.

Fazit

Insgesamt wurde bei dem Workshop in Washington die künstliche Erwärmung von biologischem Material als einziger wirklich plausibel und physikalisch möglich erscheinender Mechanismus für eine effektive Wechselwirkung mit hochfrequenten Feldern des Mobilfunks als wissenschaftlich bewiesen identifiziert. Eine Reihe

anderer Mechanismen sind jedoch vorstellbar bzw. schon für andere Bereiche als wirksam nachgewiesen. Zukünftige theoretische Analysen und ggf. deren experimentelle Überprüfung sind notwendig, um bestimmte andere oder neu vorgeschlagene Mechanismen daraufhin zu überprüfen, für welche Frequenz-Intensitäts- und biologische Zielbereiche sie überhaupt zutreffen, d.h. in welchen davon sie effektiv Wirkung zeigen können. Der eingangs erwähnte Folgeworkshop zu diesem Thema, den die FGF im Dezember dieses Jahres in Dresden veranstalten wird, soll einen Beitrag für den dazu notwendigen wissenschaftlichen Austausch von Spezialkenntnissen und Meinungen zwischen entsprechenden Fachleuten leisten.

Dr. Frank Gollnick ist Biologe und war lange Zeit Mitarbeiter im Physiologischen Institut II der Universität Bonn. Er ist nun als wissenschaftlicher Berater für die FGF tätig.

Literatur:

Adair R.K.: Vibrational resonances in biological systems at microwave frequencies. Biophys. J. (im Druck, 2001)

Apollonio, F. et al.: Modelling of neuronal cells exposed to RF fields from mobile telecommunication equipments. Bioelectrochem. Bioenerget. **47**, 199-205 (1998)

Chiabrera A. et al.: Zeeman-stark modelling of the RF EMF interaction with ligand binding. Bioelectromagnetics **21**, 312-324 (2000)

Dobson J. et al.: Changes in paroxysmal brainwave patterns of epileptics by weak-field magnetic stimulation. Bioelectromagnetics **21**, 94-99 (2000)

Grissom, C.B.: Magnetic field effects in biology: A survey of possible mechanisms with emphasis on radical-pair recombination. Chem. Rev. **95**, 3-24 (1995)

Kirschvink J.L.: Microwave absorption by magnetite: a possible mechanism for coupling nonthermal levels of radiation to biological systems. Bioelectromagnetics **17**, 187-194 (1996)

Kotnik T. & Miklavcic D.: Second-Order model of membrane electric field induced by alternating external electric fields. IEEE Transactions on Biomedical Engineering **47**, 1074-1081 (2000)

Kotnik T. & Miklavcic D.: Theoretical evaluation of the distributed power dissipation in biological cells exposed to electric fields. Bioelectromagnetics **21**, 385-394 (2000)

Litovitz et al.: The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. Bioelectromagnetics **14**, 395-403 (1993)

Pickard W.F. & Rosenbaum F.J.: Biological effects of microwaves at the membrane level: Two possible athermal electrophysiological mechanisms and a proposed experimental test. Math. Biosci. **39**, 235-253 (1978)

Steiner U.E. & Ulrich T.: Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena. Chem. Rev. **89**, 51-147 (1989)