

Biophysikalische Wirkungsmechanismen hochfrequenter Felder und deren Bedeutung

Kurzbericht zum Workshop in Ft. Lauderdale/Florida 22.-23.3.2004

Roland Glaser

Lassen sich aus wissenschaftlich begründeten Wirkungsmechanismen Grenzwerte für modulierte und unmodulierte Hochfrequenzfelder ableiten? Wie ist der Stand der Forschung auf diesem Gebiet? Welche Relevanz haben die von verschiedenen Autoren vorgeschlagenen biophysikalischen Wirkungsmechanismen hochfrequenter Felder bezüglich der tatsächlich im Mobilfunk verwendeten Frequenzen, Modulationen und Intensitäten?

Diesem Fragenkomplex war ein zweitägiger Workshop gewidmet, organisiert von Motorola und der FGF, zu dem ein Dutzend Spezialisten, vorwiegend aus den USA, zu Vorträgen und Diskussionen geladen waren. Diese Veranstaltung bildete die Fortsetzung einer Reihe ähnlicher Workshops, die 2000 in Bad Münstereifel (siehe dazu Newsletter 01/01) gestartet worden waren und im Mai 2001 in Washington (siehe dazu Newsletter 02/01) und im Dezember 2001 in Dresden (siehe dazu Newsletter 02/02) ihre Fortführung fanden, und auf denen ebenfalls biophysikalische Mechanismen zur Erklärung der Wirkung hochfrequenter Felder im Intensitätsbereich des Mobilfunks erörtert wurden. Die Diskussionen basierten auf Vorträgen, in denen die Teilnehmer den neuesten Stand der theoretischen Forschung und deren experimentelle Basis vorstellten.

Den Anfang machte ein Vortrag von **A. Sheppard und Q. Balzano** mit dem Titel: „A thermodynamic approach for determining the amplitude & frequency of possible nonlinear RF interactions in biological preparations“, basierend auf ihren kürzlich erschienen Publikationen (Bioelectromagnetics. 2002; 23, 278-287 und: 2003; 24, 473-482; siehe auch „Neues aus der Wissenschaft“ im Newsletter 1, 2004). Die Autoren führten aus, dass sich Amplituden-modulierte HF-Felder bei ihrer Absorption durch nicht-lineare Reaktionen im System in mehrere Resonanz-Frequenzen aufspalten müssten. Diese Frequenzen ergeben sich aus der Modulationsfrequenz und deren Vielfachem, sowie der Summen aus der hochfrequenten Träger- plus der niederfrequenten Modulationsfrequenz und deren Vielfachem. Mit einer empfindlichen Methode müsste es möglich sein, kapazitiv diese Schwingungen bekannter Frequenz abzuleiten und zu messen und somit den nichtlinearen Charakter des Mechanismus der Feldabsorption nachzuweisen. Die Autoren hoffen z.B. bei Einstrahlung von 900 MHz in das System, die erste Oberschwingung, nämlich 1800 MHz, mit einer Empfindlichkeit von 10-100 Photonen pro Sekunde und Zelle in einer etwa 10⁶ Zellen umfassenden Probe nachweisen zu können. Wie bereits in den Remarks zu den oben genannten Publikationen, so wurde auch hier diskutiert, ob die vorgeschlagene Methode tatsächlich geeignet ist, die schwachen Signale auf dem Hintergrund des Rauschens zu erkennen, insbesondere in Fällen schwacher Feld-Applikation, also im Bereich der gesetzlich festgelegten Grenzwerte. Die Autoren meinen, dass im Falle, dass die Mess-Erfolge nur bei höheren Feldstärken aufträten, wenigstens die Schwellenwerte für nichtlineare Reaktionen von Zellen auf amplitudenmodulierte HF-Felder ermittelt werden könnten.

R. Glaser referierte über die Frage: „Are thermoreceptors responsible for 'non-thermal' effects of RF fields?“. Er verwies darauf, dass als „nicht-thermisch“ zumeist solche biologische Reaktionen auf HF-Felder bezeichnet werden, die nicht mit einer messbaren

Erwärmung des Gewebes einhergehen. Dabei wird die Messgenauigkeit mit höchstens $\pm 0,1$ Grad angegeben und Messfühler verwendet, die sehr groß sind, in Relation zu zellulären Dimensionen. Von den Forschungsgruppen auf dem Gebiet der Feldwirkung weitgehend unbeachtet blieben jedoch die Fortschritte der letzten Jahre auf dem Gebiet der Thermorezeption. Obgleich seit langem bekannt ist, dass verschiedene Tiere thermosensible Organe besitzen, die auf Erwärmungen von hundertstel Grad und darunter reagieren, so hat man erst in den letzten Jahren Transport-Proteine gefunden, die über eine extreme Thermosensibilität in Temperaturbereichen von nur wenigen Grad verfügen. Überraschender noch ist, dass diese Proteine nicht nur in speziellen Nervenendigungen vorkommen, sondern ebenso in verschiedenen anderen Zellen, wie zum Beispiel in den Keratinozyten der Haut. Somit können lokale Regulationsmechanismen aktiviert werden, die außerhalb einer möglichen Wärme-Empfindung liegen und eventuell noch nicht einmal neuronal erfasst werden. Die Forschung auf diesem Gebiet ist in schnellem Fortschritt befindlich und sollte sorgfältig beobachtet werden. Reicht unter diesem Gesichtspunkt die grobe Temperaturmessung der Experimente aus um von „nicht-thermischen“ Effekten zu sprechen? Könnten nicht vielleicht lokale Durchblutungsänderungen manchen „nicht-thermischen“ Effekt erklären? Sind die gemessenen Effekte letztlich „quasi-thermisch“? Unterscheiden sie sich von Reaktionen des körpereigenen Systems der Thermoregulation bei Temperaturschwankungen im Alltag?

In der Diskussion wurde unterstrichen, dass es natürlich „nicht-thermische“ Wirkungsmechanismen im Sinne einer direkten Wirkung der Felder auf permanente oder induzierte Dipole gibt. Elektrorotation und Dielektrophorese sind gut bekannte Beispiele dafür. Jedoch führen diese Reaktionen sekundär zu beträchtlichen Erwärmungen, erfordern sie doch Feldstärken, die mehrere Größenordnungen über den gesetzlichen Grenzwerten liegen. Diese Mechanismen haben folglich keine Bedeutung für die hier diskutierte Fragestellung.

K. Foster wies in seinem Vortrag: „'Selective' heating of biological structures by RF energy, revisited“ auf die Unmöglichkeit der Entstehung von „hot-spots“ im mikroskopischen Bereich hin. Er unterstrich, dass dies bereits Schäfer und Schwan in einer Publikation aus dem Jahre 1943 nachgewiesen hatten („Zur Frage der selektiven Erhitzung kleiner Teilchen im Ultrakurzwellen-Kondensatorfeld“, Annalen der Physik 43, 99-135). Danach ist die charakteristische Zeit der Erwärmung einer Kugel in einer kühlenden Flüssigkeit dem Quadrat ihres Radius proportional. Für eine Kugel mit $R=10\text{:}\mu\text{m}$ läge sie in der Größenordnung von 0,3 ms. Stationäre Erwärmungen lokaler Art in Dimensionen von Zellen und darunter sind demnach physikalisch nicht möglich. Daran ändert sich prinzipiell auch nichts, wenn die Form der Körper von der Kugel-Geometrie abweicht. Die Berechnung des Zeitverlaufes bei Applikation gepulster oder Amplitudenmodulierter Felder zeigte, dass aus dem gleichen Grund die dabei auftretenden lokalen Temperaturschwankungen im mikroskopischen Bereich vernachlässigbar sind. In der Diskussion wurde auf die Publikation von Hamad-Schifferli et al. verwiesen (Nature. 2002; 415, 152-155; siehe: „Neues aus der Wissenschaft“, Newsletter 1, 2003). Hier wurde ein 1,4 Nanometer großes Gold-Partikel an eine synthetische DNA-Sequenz geheftet und durch Einstrahlung von einem 1 GHz-Feld thermisch aktiviert. Natürlich sind derartige Extremsituationen nicht mit dielektrischen Inhomogenitäten innerhalb biologischer Systeme zu vergleichen.

E. Prohofsky beschäftigte sich in seinem Vortrag zum Thema: „Looking for possible RF effects in biomolecules“ mit der Frage, ob eine direkte Energieübertragung von GHz-Schwingungen in das System bioenergetischer Prozesse möglich sei. Dies wäre nach

seiner Meinung eine echte „nicht-thermische“ Reaktion. Als Beispiel berechnet er Resonanz-Frequenzen atomarer Schwingung von globulären Proteinen, wie Myoglobin und Hämoglobin und mehr oder weniger linearen Makromolekülen, wie DNA und RNA. Während bei den Proteinen die geringste Resonanz-Frequenz bei 720 GHz liegt, könnte bei den weniger rigiden DNA-Molekülen der Frequenzbereich hinunter bis 182 GHz reichen. In bezug auf die Publikation von R. K. Adair (Bioelectromagnetics 2003, 24, 39-48, siehe: „Neues aus der Wissenschaft“ Newsletter 1, 2003), der kürzlich die Unmöglichkeit nicht-thermischer Reaktionen in geringen Intensitätsbereichen von HF-Feldern aus Berechnungen auf der Basis der Kontinuum-Physik erklärte, unterstrich Prohofsky, dass solche Abschätzungen in Frequenzbereichen über 100 GHz nur quantenphysikalisch möglich seien. Er findet durch seine Berechnungen jedoch die bereits in seinem Vortrag in Washington geäußerte Vorstellung bestätigt, wonach die Effektivität der Energie-Übertragung von Frequenzen des Mobilfunks zu denen atomarer Energie-Übertragungs-Systeme außerordentlich gering ist. Trotz Differenzen im theoretischen Ansatz kommt Prohofsky also in Übereinstimmung mit Adair zu dem Schluss, dass biologische Wirkungen dieser Felder nur auf dem Weg über normale Erwärmung möglich seien.

Außernd wurde die Diskussion nach dem Vortrag von **D. Astumian** zum Thema: „Do membranes multiply and biomolecules add?“ Wie in mehreren Publikationen bereits zum Ausdruck gebracht, hält Astumian eine Wirkung von Feldern für möglich, die beliebig geringe Intensitäten aufweisen. Selbst unterhalb des thermischen Rauschens sei eine Wirkung möglich. Das Auftreten eines Effektes sei letztlich nur eine Frage der Zeit, die erforderlich ist, um die Signale vom Rauschen statistisch signifikant zu trennen. Diese Vorstellung gründet auf einem Ratschen-Modell („ratchet-mechanism“), wonach unabhängig von Vibrationen die Bewegung in einer durch die Funktionsweise dieser Ratsche vorgegebene Bewegung erfolgt und durch das Rauschen sogar gefördert wird. Leider waren die vorgestellten Modelle wenig quantitativ unterlegt und somit schwer realisierbar.

Als wichtigstes Gegenargument in der Diskussion wurde angeführt, dass dieser theoretisch unbegrenzten Integrationszeit zur Erreichung eines möglichen Effektes die Reparaturprozesse und Zeitkonstanten realer biologischer Effekte entgegenstünden. Auch konnte Astumian keinen Vorschlag unterbreiten, durch welche Art Experimente sein Modell überprüft werden könnte. Die von ihm diskutierten Effekte elektromagnetischer Felder auf die Na-K-ATPase menschlicher Blutzellen (z.B.: Tsong , Astumian: Bioelectrochem. Bioenerg. 1986, 15, 457-476; Tsong , Liu, Chauvin, Astumian: Bioscience Reports 1989; 9,13-26) wurden experimentell nie bestätigt und beziehen sich außerdem auf einen Frequenzbereich unter 1 MHz.

J. Weaver referierte über „Microdosimetry, chemical noise and implications for RF effects“. Basierend auf bekannten Impedanzeigenschaften von Zellen und deren Bestandteilen stellte er ein Modell vor, welches die Feldverteilung im Gewebe in einem weiten Frequenzbereich zu berechnen erlaubt. Dabei bediente er sich der Methode der „internodal Elemente“, einer Aneinanderreihung kleinster RC-Kreise. Für einfachere Strukturen wurden dreidimensionale, für kompliziertere zweidimensionale Modelle entwickelt. Er konnte damit nachweisen, dass es in bestimmten Gewebs-Faltungen zu einer Erhöhung des SAR-Wertes kommen kann. Allerdings tritt dieser Fall lediglich im Bereich von Frequenzen unterhalb der im Mobilfunk verwendeten auf. Es wurde darüber diskutiert, ob auch im UHF-Bereich ein Verstärker-Effekt der Membran möglich sei, obgleich die Membran bereits ab etwa 1 MHz kapazitiv überbrückt wird. Es ist allerdings denkbar, wenn auch noch nicht erwiesen, dass durch spezielle dielektrische

Eigenschaften angelagerter Wassermoleküle auch in höherem Frequenzbereich eine Feldverstärkung in der Membran bis zu einem Faktor 10 auftreten könnte. Ferner wurde diskutiert, wieweit die von Weaver berechneten Modelle auf reale Gewebe übertragbar sind.

F. Barnes und Y. Kwong stellten im Vortrag: „A theoretical study of the effects of RF fields in the vicinity of membranes“ Abschätzungen zu einer möglichen dielektrophoretischen Bewegung kleiner Partikel in Zellnähe vor. Die Berechnungen bezogen sich auf ein sehr abstraktes und extrem vereinfachtes Modell einer Membran-Grenzfläche mit der Vorstellung zweier scharf voneinander abgegrenzter Phasen unterschiedlicher Dielektrizitäts-Konstanten. Ein appliziertes HF-Feld sollte dann zu einem Feldgradienten führen, der eine dielektrophoretische Anziehungskraft auf angrenzende Partikel ausüben könnte. Dieses Postulat wurde jedoch in der Diskussion stark bezweifelt, da es zu einem physikalisch nicht erklärbaren Symmetriebruch führen würde. Darüber hinaus kam man wieder auf die Dielektrophorese als nicht-thermischen Mechanismus zu sprechen, der physikalisch gut verstanden und biotechnologisch genutzt, aus Gründen der dafür erforderlichen hohen Feldstärken jedoch für die Festlegung von Grenzwerten im Bereich des Mobilfunks nicht von Bedeutung ist.

Q. Balzano demonstrierte in seinem Beitrag: „Field gradients near resonant short wire RF sources“ interessante dosimetrische Berechnungen über Nahfeld-Situationen, die jedoch keinen Bezug zu möglichen Wirkungsmechanismen aufwiesen.

Nach diesen Vorträgen und Diskussionen unternahm A. Sheppard den schwierigen Versuch, als Quintessenz der Beiträge mögliche nicht-thermische Wirkungsmechanismen hochfrequenter Felder in einer Tabelle zusammenzufassen. Der Tagungsordnungspunkt hieß: „Creation of summary table, frequency, amplitude of mechanisms reviewed.“ Es entstand eine lange Liste, teils von ihm im Verlaufe der Veranstaltung bereits vorbereitet, teils durch Zuruf ergänzt und korrigiert. Es wurde versucht, die vielen Mechanismen möglicher Wirkungen hochfrequenter Felder nach Frequenzbereich und Schwellenwert zu ordnen. Außerdem sollte vermerkt werden, ob es sich um einen vermuteten, einen theoretisch begründeten oder sogar um einen experimentell erwiesenen Wirkungsmechanismus handelte. Im Grunde bezogen sich jedoch alle genannten Mechanismen auf Feldstärken, die mehr oder weniger weit über den derzeit geltenden Grenzwerten liegen.

Nicht nur aus Zeitgründen, sondern auch wegen der zum Teil kontroversen Meinungen war eine Erstellung dieser Liste während des Workshops nicht realisierbar. Genau genommen hatte die Diskussion auch keine Möglichkeiten aufgezeigt, wie „nicht-thermische“ Wirkungen, also direkte Wechselwirkungen schwacher hochfrequenter elektromagnetischer Felder mit dem molekularen Gefüge biologischer Systeme ohne den Umweg über die Erwärmung möglich sein könnten.

A. Sheppard übernahm die schwierige Aufgabe, ein Konsenspapier dieser Tagung anzufertigen. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Kurzberichtes lag bereits ein erster Entwurf dafür vor, der jedoch an vielen Punkten noch zu präzisieren ist.

Prof. Dr. Roland Glaser war Leiter des Instituts für Biophysik an der Humboldt-Universität Berlin.