

Gibt es tatsächlich „nicht-thermische“ Effekte schwacher HF-Felder?

FGF-Workshop: „Subtle Thermal Effects of RF-Fields *in vitro* and *in vivo*“,
Stuttgart, 21.-23. November 2005

Immer wieder wird von „nicht-thermischen“ Effekten der Felder des Mobilfunks berichtet. Manchen dieser Experimente wird eine fehlerhafte Dosimetrie nachgewiesen; zumeist lassen sie sich nicht reproduzieren. Sie sorgen jedoch in der Öffentlichkeit für eine permanente Unsicherheit. Obgleich die für die Festlegung der Grenzwerte Verantwortlichen nicht, wie immer wieder unterstellt, nachgewiesene nicht-thermische Effekte vernachlässigten und nur auf thermische Effekte abzielten, so bleiben in diesem Intensitätsbereich letztlich nur thermische Einflüsse übrig. Und doch beunruhigt den Bürger die Vorstellung, es gäbe vielleicht noch Gefahren durch schwache Felder, welche der Wissenschaft bisher entgangen seien, oder welche die Forschung einfach ignoriere, weil „nicht belegbar“.

Die FGF, in Kooperation mit dem EU-Projekt COST 281 und mit Unterstützung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg, beschloss, dieses Problem in einem internationalen Workshop zu beleuchten. 43 Wissenschaftler aus 12 Ländern hatten sich zu diesem Zweck im Tagungshotel der Deutschen Telekom in Stuttgart zusammengefunden. Die Teilnehmer wurden von Peter Brunner, dem Referenten des Ministeriums, und von Gerd Friedrich im Namen der FGF begrüßt. Zur Einstimmung auf das Thema und zur Fokussierung der Teilnehmer auf Ziele und Fragestellungen des Workshops fasste Roland Glaser die bereits im Tagungsprogramm formulierten Aspekte in einem kurzen Beitrag zusammen. Was wird eigentlich in den entsprechenden Publikationen als „nicht-thermische“ Wirkung schwacher HF-Felder bezeichnet? Welche Fragen und Probleme sind mit diesen Feststellungen verbunden? Es sind vorwiegend drei Fälle, in denen man die Ursache eines Effektes als „nicht-thermisch“ bezeichnet: Erstens, wenn die Exposition so schwach, beispielsweise der SAR-Wert so gering ist, dass man nicht von einer Erwärmung des bestrahlten Objektes ausgehen kann. Doch: Lassen sich in Hinblick auf die Mikrodosimetrie Reaktionen thermisch besonders sensibler Bereiche ausschließen? Zweitens, wenn durch die Befeldung keine messbaren Temperaturänderungen auftraten. Doch: hat man tatsächlich an der Stelle gemessen, an welcher der Effekt ausgelöst wurde? Reagiert das biologische System nicht vielleicht empfindlicher als unsere Thermometer (im weitesten Sinne des Wortes)? Schließlich spricht man drittens auch von „nicht-thermisch“, wenn es zwar zu einer Temperaturerhöhung kommt, die dabei auftretenden Effekte sich jedoch deutlich von jenen unterscheiden, die durch eine vergleichbare konventionelle Erwärmung hervorgerufen werden. Dieser Unterschied, so schließt man, müsse doch folglich „nicht-thermisch“ bedingt sein. Hat man aber berücksichtigt, dass bei gleicher Temperatur die Temperaturprofile und die Gradienten in beiden Fällen möglicherweise unterschiedlich sind? (siehe auch: R. Glaser: „Are thermoreceptors responsible for ‘non-thermal’ effects of RF fields?“, Edition Wissenschaft der FGF, 22, 2005).



Dr. Roland Glaser, Prof. em.
experimentelle Biophysik,
Institut für Biologie/
Humboldt-Universität zu Berlin

Zur Diskussion dieser Problematik waren neben Fachleuten auf dem Gebiet der Wirkung von Feldern des Mobilfunks auch solche Experten eingeladen, die zur Wärmesensibilität biologischer Systeme, zu wärmeempfindlichen Molekülen und zur dielektrischen Heterogenität biologischer Systeme in mikroskopischen und molekularen Dimensionen inklusive möglicher Temperaturgradienten in diesem Bereich etwas zu sagen hatten.

Zunächst ging es um physikalische und physiologische Aspekte von Wärmeempfindung und Thermoregulation. Peter Wust von der Klinik für Strahlenheilkunde der Charité, Berlin, zeigte zunächst Extreme auf, indem er die Thermoregulation bei Patienten vorstellte, die einer Behandlung mit Hyperthermie unterzogen wurden. Hier geht es, wie der Name schon sagt, durchaus um thermische Effekte. Bei SAR-Werten, die im Extremfall 200 W/kg erreichen können, wird das Tumorgewebe bis auf 43 °C erwärmt. Bemerkenswert ist einmal die hohe Kapazität biologischer Wärmeregulation, zum anderen die Temperatur-Toleranz verschiedener Gewebe. So verträgt die menschliche Haut durchaus eine dreistündige Erwärmung auf 44 °C, während das Gehirn höchstens 20 Minuten einer Temperaturerhöhung auf 43 °C ausgesetzt werden darf. Eine einstündige Ganzkörper-Erwärmung auf 42 °C wird bei Hyperthermiebehandlung noch als unbedenklich eingestuft.

Nach der maximalen Toleranzgrenze höchster Temperaturen ließen sich die Teilnehmer des Workshops von Helmut Schmitz vom Zoologischen Institut der Universität Bonn über die Temperatur-Minima aufklären, die zu messen biologische Systeme noch in der Lage sind. Sinnesorgane für Infrarot-Strahlung, die letztlich als Temperaturänderungen besonders sensibler Strukturen wahrgenommen werden, sind bei Wirbeltieren, wie Schlangen und Fledermäusen, aber auch bei Wirbellosen nachgewiesen und offenbar mehrfach unabhängig voneinander in der Evolution „erfunden“ worden. Schmitz konzentrierte sich auf sein eigenes Forschungsobjekt, die IR-Rezeptoren bei Käfern. Es klingt etwas verwunderlich, wenn man von pyrophilen, übersetzt: „feuerliebenden“, Käfern spricht, doch handelt es sich dabei um Insekten, die darauf angewiesen sind, ihre Eier in noch warmen, allerdings nicht zu heißen verkohlten Baumstämmen abzulegen. Dabei kommen den Thermorezeptoren zwei Aufgaben zu: einmal die Fernerkennung von Waldbränden (sicherlich koordiniert mit dem Geruchssinn), und zum anderen die Auswahl von Flächen geeigneter Temperatur. Der zu der Familie der Prachtkäfer (*Buprestidae*) gehörende australische Feuerkäfer (*Merimna atrata*) verfügt über kleine paarig vorhandene thermosensible Stellen am Hinterkörper. Bei dem ebenfalls in Australien vorkommenden kleinen Aschenkäfer (*Acanthocnemus nigricans*) wurden hingegen solche Organe am ersten Thorakalsegment gefunden. Bei anderen Insekten fand man Thermorezeptoren an Fühlern und an Beinen. Obgleich phylogenetisch sehr unterschiedlich, besteht das Funktionsprinzip aller dieser Organe doch wohl übereinstimmend darin, dass eine dünne Struktur, eine Membran zum Beispiel, thermisch vom übrigen Körper gut isoliert, jedoch mit mitochondrienreichen Nervenendigungen im Kontakt, die IR-Strahlung aufnimmt und sich dabei um Bruchteile eines Kelvin erwärmt. Die Nervenzellen registrieren dabei offenbar Temperaturunterschiede, die noch unterhalb eines Zehntel Kelvin liegen. Beim Grubenorgan der Schlangen spricht man sogar von Empfindlichkeiten im Milli-Kelvin-Bereich.

In der Diskussion stellte sich die Frage: wären die hier verwendeten Untersuchungsobjekte, bestehend aus Thermosensor und ableitendem Nerv, nicht geeignete Indikatoren, um mikrothermische Effekte kontinuierlicher und gepulster HF-Felder miteinander zu vergleichen? Käme man durch die Verwendung derartiger Modellsysteme nicht vielleicht aus dem Teufelskreis unerklärbarer Phänomene heraus? Der Aufwand für solche Experimente wäre gering, denn die Technik der Präparation und Vermessung derartiger Systeme ist vorhanden.

Um dem Mechanismus der Thermorezeption etwas näher auf die Spur zu kommen, konzentrierten sich die folgenden beiden Beiträge auf neuere Erkenntnisse zu thermosensiblen Molekülen. Zunächst gab Wolfgang Hanke (Institut für Physiologie, Universität Hohenheim) einen Einblick in die Funktion thermosensibler Kanäle. Hauptsächlich ging es dabei um die Familie der so genannten TRP-Kanäle (TRP steht für: „transient receptor potential“), speziell um die Sondergruppe TRPV (das „V“ bedeutet: „vallinoidempfindlich“). Einige dieser beinahe in allen Zellen vorkommenden Membranproteine, insbesondere das TRPV3, weisen in engen Bereichen eine starke Temperaturabhängigkeit ihrer Transportfunktion aus. Während es bei einem Anstieg der Temperatur um 10 Grad bei biochemischen Reaktionen gewöhnlich zu einer Verdopplung der Reaktionsgeschwindigkeit kommt, erhöhen diese Proteine in einem engen Temperaturbereich ihre Transportgeschwindigkeit bis um das 50-fache pro 10 Grad. Ursache dieses Verhaltens sind offenbar Konformationsänderungen in diesen komplizierten Makromolekülen, welche u.a. auch von der Art der umgebenden Membranlipide abhängen. Dieses temperaturabhängige Verhalten, so nimmt man an, löst Reaktionen von Signalketten aus, und bildet damit die molekulare Basis eines höchst sensiblen Systems zellulärer Temperaturempfindung. Eine derart ausgelöste Systemantwort könnte der klassische Fall einer „nicht-thermischen“ Reaktion sein, denn der Vorgang ist lokal und überaus empfindlich und mit Thermistoren irgendwo im Versuchsobjekt kaum zu erfassen. Nach üblicher Begriffsbestimmung der HF-Experimente müsste man also paradoxerweise den Prozess der Thermorezeption „nicht-thermisch“ nennen.

Philipp Christen vom Biochemischen Institut der Universität Zürich stellte ein weiteres System thermosensitiver Moleküle vor. Während die TRP-Kanäle in den Zellmembranen lokalisiert und von hier aus in der Lage sind, Signalkaskaden auszulösen, gibt es auch molekulare Reaktionen im Zellinneren, die bei als Temperaturfühler die Expression von Hitzeschockproteinen regulieren. Seine Befunde stützen sich auf Experimente mit dem Bakterium *Escherichia coli*. Bei diesem, wie allen Prokaryoten, also kernlosen Zellen, gibt es als Hitzeschockprotein ein so genanntes DnaK-System, welches dem Hsp70-System der Eucarioten, also der kernhaltigen, „echten“ Zellen entspricht. Auch dieses wirkt als Chaperon, d.h. als Helfer bei der Reparatur geschädigter Proteine. Die Funktion dieses Proteins hängt von seiner Phosphorylierung ab, welches wiederum durch einen „ADP/ATP exchange factor“ katalysiert wird, einem weiteren Protein mit der Bezeichnung GrpE. Die Struktur dieses Proteins ist inzwischen aufgeklärt. Es stellte sich heraus, dass dieses als empfindlicher Thermosensor wirkt. Es enthält nämlich zwei parallel gelagerte Alpha-Helices, welche bei einer Temperaturerhöhung über 40° eine messbare Konformationsänderung erfahren.

Ist es denkbar, dass bereits geringe Intensitäten eingestrahelter HF-Energie zu Signalwirkung dieser molekularen Thermorezeptoren führen können? Bevor diese Frage näher und kontrovers diskutiert wurde, informierten sich die Teilnehmer noch über dosimetrische Randbedingungen. Zunächst berichtete Jürg Fröhlich von der ETH Zürich, über Erfordernisse, Dosimetrie und Konstruktion von Einrichtungen zur Exposition von Zellen im Frequenzbereich von 900 und 1800 GHz. Bei diesen Einrichtungen ist natürlich eine Homogenität der SAR-Werte im gesamten Probestrich, z. B. der die Zellen enthaltenden Petrischale, eine Grundbedingung. Dies ist allerdings technisch nur bis zu einer Inhomogenität von etwa 30 % des Durchschnittswertes erreichbar. Besondere Inhomogenitäten treten im Meniskus-Bereich der Schalen auf. Mikroskopische Aussagen, etwa über die Bedingungen unmittelbar im Grenzbereich zwischen Schalenboden und aufliegenden Zellen sind nur grob abschätzbar, entsprechende Besonderheiten werden jedoch nicht erwartet.

Jan Gimsa vom Fachbereich Biologie der Universität Rostock, informierte in einem theoretischen Beitrag über mögliche Feldinhomogenitäten einer exponierten Zelle, wobei er insbesondere auf dielektrische Anisotropien der Zellmembran einging. Er betonte, dass mikroskopische und molekulare Anisotropie-Effekte bei dosimetrischen Berechnungen zu wenig beachtet werden und deshalb zu Interpretationsfehlern der Experimente führen könnten. Diese Effekte sind natürlich frequenzabhängig, spielen jedoch durchaus auch über 500 MHz eine Rolle. Dies gilt besonders für die Membran und deren darin eingebauten Proteine.

Der Hauptaspekt wissenschaftlicher Kontroverse entzündete sich in der Diskussion um die nächsten vier Beiträge. Zunächst versuchte Ken Foster (Univ. Pennsylvania, USA) mehr Licht in das Problem zu bringen, indem er schwache thermische Effekte von schwachen thermischen Artefakten separierte („More heat than light: separating subtle thermal effects from subtle thermal artifacts“). Nicht nur in der Handy-Problematik diskutiert man „nicht-thermische“ Effekte, sondern ebenso im Bereich chemischer Synthesen. Man hofft chemische Reaktionen effektiver durchführen zu können, wenn man das Reaktionsgemisch nicht konventionell, sondern in einem Mikrowellenofen erhitzt. Die Anzahl der entsprechenden Publikationen zu diesem Thema stieg von etwa 100 im Jahre 1995 auf inzwischen 800 pro Jahr. Ein „Critical Review“ des letzten Jahres fasst zusammen und konstatiert, die Effekte hängen lediglich an schlechter Messung der tatsächlichen Temperatur, denn in den Reaktionsgefäßen treten starke Temperaturgradienten auf (de la Hoz, et al.: Chem. Soc. Rev. 34: 164-174, 2005). Foster verwies darauf, dass „nicht-thermische“ Reaktionen seit langem diskutiert werden. Der deutsche Arzt Erwin Schliephake meinte im Jahre 1932: „Bringt man nämlich eine Emulsion von Wasser und Öl in das Kondensatorfeld, so gelingt es, das Wasser aus dem Öl herauszukochen, wobei die Gesamttemperatur der Emulsion nur 50-60 Grad zu betragen braucht.“ Bereits im Jahre 1943 publizierten allerdings H. Schaefer und H. Schwan (Annalen der Physik **43**, 99-135) den Artikel „Zur Frage der selektiven Erhitzung kleiner Teilchen im Ultrakurzwellen-Kondensatorfeld“, in welchem sie diese Vorstellung stark relativierten. Sie berechneten, dass sich die Geschwindigkeit eines Temperatenausgleiches umgekehrt proportional zu dem Quadrat des Teilchen-Durchmessers verhält. Der Betrag stationärer Temperaturdifferenzen ist dann dem Quadrat dieses Parameters proportional. Diese Aussage wurde später von Foster bestätigt und präzisiert (Foster et al. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 1982; 1158-1166). In Zahlen ausgedrückt, ergibt sich z. B. für ein Teilchen von 1 μm Durchmesser eine Zeitkonstante des Wärmeaustausches von etwa 3,5 ns und eine maximale stationäre Temperaturdifferenz zur Umgebung von $8 \cdot 10^9$ K. Für ein Makromolekül von 10 nm blieben dann noch 0,35 ns und $8 \cdot 10^{13}$ K. Mikroskopische, d.h. molekulare oder supramolekulare Effekte, die auf lokalen Temperaturen in diesen Dimensionen beruhen sollten, schließt Foster also aus.

Diesen Berechnungen scheinen neuere Experimente von Hamad-Schifferli entgegenzustehen (Nature 2002; 415,152-155, und Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology 2004; 963-975), die Foster in seinem Vortrag erwähnte und die in den folgenden Diskussionen aufgegriffen wurden. Dabei geht es um Experimente, wonach DNA-Moleküle selektiv durch ein 1 GHz-Feld aktiviert werden konnten, nachdem jeweils ein 1,4 nm großer Gold-Kristall als thermische Antenne kovalent an die Moleküle gebunden wurde. Gibt es hier eine Grenze der Aussagekraft phänomenologischer Aussagen?

Die Problematik wurde weitergeführt durch den Beitrag von Jacques Vanderstraeten (Université Catholique de Louvain, Belgien) zur Mikrodosimetrie im Größenbereich der DNA (siehe auch: Vanderstraeten et al., Bioelectromagnetics 2004, 25, 380-389).

Ausgehend von Literaturdaten über dielektrische Eigenschaften der DNA sowie des gebundenen Wassers und der entsprechenden Doppelschichten folgerte er, dass SAR-Werte um das Molekül, und in größerer Umgebung im Kern, frequenzabhängig, im 0,3 bis 2,3 GHz-Bereich, und abhängig von der Konzentration der Nukleinsäuren, um das 1,5- bis 2,5-fache höher sein könnten als in dem umgebenden Plasma. In seiner Zusammenfassung kam Vanderstraeten zu dem Schluss, dass im molekularen Maßstab an Orten intensiverer Mikrowellenabsorption und möglicherweise gleichzeitiger biologischer Relevanz, z. B. der Aktivierung von Genen, die thermische Energie eine wichtigere Variable sei als die Temperaturschwankung.

A.-Constantinos Cefalas (National Hellenic Research Foundation, Athen, Griechenland) stellte eine quantenmechanische Hypothese möglicher Aktivierung biologischer Moleküle, insbesondere auch der DNA, vor. Dabei ging er von einer Akkumulation der absorbierten Quantenenergie durch Multiphotonen-Prozesse aus. In der Diskussion wurde die Wahrscheinlichkeit derartiger Vorgänge von verschiedenen Seiten allerdings stark bezweifelt.

Anan Copty von der Hebrew University in Jerusalem berichtete von Experimenten, die auf eine lokale Erwärmung von Molekülen durch eingestrahlte HF-Felder hinweisen. Diese Gruppe experimentierte an dem „grünen Fluoreszenz-Protein“ (GFP), einem aus einer Qualle isolierten stabilen Protein, das viel bearbeitet und in seiner Struktur inzwischen gut bekannt ist. Allerdings verwendeten sie ein modifiziertes Molekül (EGFP, E für „advanced“), dessen Fluoreszenzspektrum sich für die Versuche besser eignete. Es zeigte sich, dass die Fluoreszenz des Moleküls nach Einstrahlung von 8,5 GHz im Vergleich zur konventionellen Erwärmung deutlich verändert war. Die Autoren gingen, entsprechende Diskussionen erwartend, auf die von Foster berechneten minimalen Zeitkonstanten und stationären Temperaturdifferenzen ein, betonten jedoch, dass es sich in ihren Versuchen um molekulare, nicht phänomenologische Temperatureffekte handle, die durch die Absorption der HF-Energie durch das am Molekül gebundene Wasser entstehen. Die beobachtete Rot-Verschiebung der Fluoreszenz erlaube, so die Autoren, eine direkte Messung der quasi molekularen Temperatur des EGFP. Da die Versuche zunächst in einem sehr heterogenen Nahfeld erfolgten, wurden Vergleichsmessungen in einem Lösungstropfen durchgeführt, der auf einem flüssig-kristallinen Cholesterin-Film aufgetragen wurde, welcher geeignet war, Temperaturänderungen unmittelbar anzuzeigen. Molekulare Fluoreszenz-Änderungen des EGFP traten dann ebenfalls auf, ohne dass der thermosensible Film eine Erwärmung angezeigt hätte.

Nach diesem auf mögliche Mechanismen ausgerichteten Teil des Workshops folgte ein Abschnitt, der sich mehr auf makroskopische Aspekte konzentrierte. Selbst die inzwischen weit entwickelte Möglichkeit dosimetrischer Berechnungen in Voxel-Größen unter einem Millimeter, ist als „makroskopisch“ anzusehen im Vergleich zur Größe von Zellen, Membranen oder gar Proteinen. Solche Berechnungen waren Inhalt des Beitrages von Andreas Bitz (Universität Wuppertal). Er demonstrierte theoretische Ansätze der Berechnung nicht nur der lokalen SAR-Werte in Versuchstieren, sondern auf die daraus resultierenden lokalen Erwärmungen. Für letzteres ist nicht nur die Kenntnis unterschiedlicher dielektrischer Parameter des Gewebes erforderlich, sondern, entsprechend den üblichen Bio-Wärme-Gleichungen, Parameter der Durchblutung und damit Wärme-Ableitung. Die neuronale Regulation dieser Größe kann bisher in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

Dieser Vortrag wurde durch den Beitrag von Gernot Schmid (ARC Seibersdorf) ergänzt, der speziell die Erwärmung des menschlichen Kopfes bei Exposition durch Felder des Mobilfunks zum Gegenstand hatte. Bei diesen Berechnungen ist zwar eine Wärmeableitung durch das Blut, nicht jedoch eine aktive Regulation der Durchblutung durch

Temperatursensoren berücksichtigt. Trotzdem ist im Falle 30 bis 40-minütiger Exposition mit einem mittleren SAR-Wert von 2 W/kg im ungünstigsten Fall nur mit lokalen Erwärmungen um maximal 0,3 K zu rechnen. Schmid verwies darauf, dass im Falle von EEG-Ableitungen die erforderlichen Elektroden oder auch die am Kopf anliegenden Leitungen zu Feldinhomogenitäten und lokaler Erwärmung führen könnten.

Konkrete Werte oberflächlicher Erwärmungen am Kopf bei Verwendung eines Mobiltelefons wurden im Beitrag von Gunnhild Oftedal (Sør-Trøndelag Universität, Norwegen) präsentiert. Wie auch bereits publiziert (Straume et al., *Bioelectromagnetics* 2005, 26, 510-519) zeigten Untersuchungen mit einer IR-Kamera, dass es bei einer 15 bis 30 Minuten währenden Nutzung eines Mobiltelefons zu einer oberflächlichen Erwärmung des Kopfes um 2-3 Grad kommen kann, jedoch nicht aufgrund von Hochfrequenzstrahlung, sondern vielmehr lediglich durch den thermisch isolierenden Einfluss des auf die Wange gedrückten Handys. Der Beitrag, der zusätzlich durch die Betriebswärme des Gerätes oder schließlich durch die Absorption des HF-Feldes im Gewebe entsteht, ist vernachlässigbar gering.

Alexander Lerchl von der Universität Bremen diskutierte die Resultate von Langzeitexperimenten an Hamstern und Mäusen, die unter Feldeinfluss eine geringe Erhöhung des Körpergewichtes zeigten. Nach seiner Vorstellung ist dies damit zu erklären, dass die Tiere die eingestrahlte Energie zur Aufrechterhaltung ihrer Körpertemperatur nutzen und dadurch Stoffwechselenergie sparen, die sie dann anderweitig einsetzen können. Dies wäre ein quasi „nicht-thermischer“ Effekt, berücksichtigt man, dass dabei keine Erwärmung messbar ist.

In einem abschließenden Vortrag stellte Jochen Buschmann vom Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (Hannover) die derzeit gültigen Regeln toxikologischer Tests vor und empfahl, diese auf Untersuchungen gesundheitlicher Risiken elektromagnetischer Felder zu extrapolieren.

In der zusammenfassenden Abschlussdiskussion, die Jürgen Kiefer (Universität Gießen) leitete, kam man schnell zur Kontroverse über den entscheidenden Punkt der Problematik: Ist eine mikrothermische Reaktion aus physikalischer Sicht denkbar, etwa die selektive Absorption eingestrahlter Energie durch thermosensible Proteine oder supramolekulare Strukturen? Ken Foster, auf die Berechnungen in seinem Vortrag verweisend, hält diese Möglichkeit angesichts extrem schneller Prozesse der Wärmedissipation für unrealistisch. Jacques Vanderstraeten, Anan Copty sowie sein Kollege Dan Davidov betonten den Unterschied phänomenologischer und molekularphysikalischer Betrachtungsweise. HF-Energie, in molekulare Bewegungen umgesetzt, sei durchaus in der Lage, Konformationsänderungen hervorzurufen, bevor die Energie als Wärme dissipiert. Die eigenen Ergebnisse dieser Gruppen sowie die Befunde der oben zitierten Arbeiten von Hamad-Schifferli würden dies demonstrieren. Es ergab sich, dass letztlich weitere Experimente unter genau kontrollierten Bedingungen die Kontroverse entscheiden müssten. Dies erscheint von besonderer Bedeutung angesichts der Tatsache, dass sich dahinter der einzige biophysikalische Mechanismus verbergen könnte, der tatsächlich in der Lage wäre, Effekte schwacher Felder zu erklären. Andererseits könnte auf dieser Basis auch die Diskussion um Frequenzspezifität der Wirkung sowie um mögliche Einwirkung pulsierender Felder auf sichere Füße gestellt werden.

Einigkeit herrschte darüber, dass unabhängig von dieser Kontroverse viele der als „non-thermal“ deklarierten Experimente auf lokaler Erwärmung basieren dürften, bedingt durch unzureichende Homogenität des Feldes oder ungenaue Messungen am falschen Ort. Unkontrollierte Temperaturänderungen im System könnten möglicherweise durch Thermorezeptoren empfindlich registriert werden und zu verschiedenartigen Antworten des Organismus führen. ■