

15 Jahre über bio hochfrequenter Eine Erfolgsstory

Roland Glaser

Ein Rückblick auf die vergangenen 15 Jahren Forschung zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter Felder ist sicher lohnend, um Schlussfolgerungen daraus zu ziehen und eventuell neue Aufgaben abzuleiten. Allerdings wurden viele der in den letzten 15 Jahre bearbeiteten Themen und Hypothesen zu diesem Thema bereits in der Zeit davor formuliert, so dass ein Rückgriff auf frühere Publikationen unvermeidbar ist. Die meisten Problemkreise sind aus wissenschaftlicher Sicht inzwischen abgearbeitet und in erforderlichem Maße aufgeklärt. Dennoch wird immer wieder auf Lücken und Unklarheiten hingewiesen – Ursache für Diskussionen und Verunsicherung in Teilen der Bevölkerung.

Wenn auch die Forschung über biomedizinische Wirkungen hochfrequenter Felder nicht erst im Zeitalter des Handys begonnen hat³⁴, so ist doch die jährliche Anzahl von Publikationen in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften deutlich im Steigen begriffen (Abb. 1). Im Unterschied dazu sinkt zur Zeit die Zahl von Publikationen zu Einwirkungen niederfrequenter Felder des Wechselstromes auf biologische Systeme nach einem Maximum im Jahre 1998.

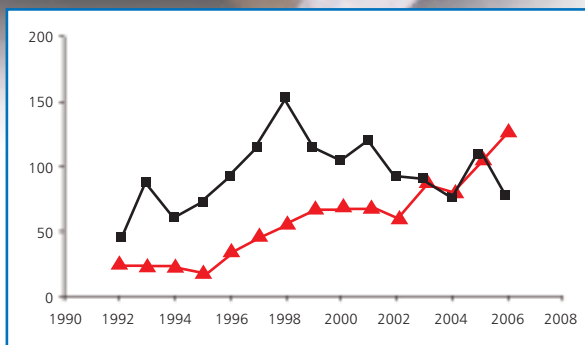


Abb. 1: Trendlinien zur jährlichen Verteilung von 960 Publikationen zur biologischen Wirksamkeit elektromagnetischer Felder im Frequenzgebiet zwischen 0,3 und 3 GHz (UHF) (rot) und von 1446 Untersuchungen zum Frequenzbereich des Wechselstroms (50 bzw. 60 Hz) (schwarz) in den letzten 15 Jahren.



Forschung medizinische Wirkungen Felder des Mobilfunks oder eine endlose Geschichte?

Ursache für diesen Trend ist natürlich in erster Linie die steigende Aktualität der Hochfrequenzproblematik als Folge der enormen Ausbreitung des Mobilfunks und anderer Formen hochfrequenter Datenübertragung. Daraus resultierte auch eine entsprechende Neuorientierung der Forschungsmittel.

Nicht die quantitative Analyse dieser Situation ist allerdings Gegenstand dieses Beitrages, vielmehr seien die inhaltliche Orientierung und die erzielten Ergebnisse der letzten 15 Jahre etwas näher betrachtet. Dies kann hier allerdings nur exemplarisch erfolgen, bezogen auf die Haupttrends der Entwicklung.

Ein Spezifikum dieser Forschungsrichtung sind ihre extrem hohen Anforderungen an interdisziplinäre Kompetenz. Ausgehend von einer aufwändigen Technik der Feldapplikation und Dosimetrie, über Kenntnisse und Erfahrungen von Tierhaltung und Zellbiologie, molekularbiologische Aspekte bis hin zur medizinischen Wertung biologischer Veränderungen sind Spezialkenntnisse erforderlich, die dringend interdisziplinäre Kooperation erfordern. Forschungsarbeiten früherer Jahre krankten oft daran, dass biologisch orientierte Arbeitsgruppen primitive Messmethodik/-apparaturen verwendeten, Kollektive mit technischem Hintergrund hingegen von naiven biologischen Vorstellungen ausgingen. Obgleich auch heute noch hin und wieder derartige Schmalspur-Experimente publiziert werden, deren fehlerhafte Ergebnisse mitunter leider beträchtlich Furore machen, ist in den letzten Jahr-

zehnten ein deutlicher Trend hin zu hoher Qualität bei multidisziplinärer Forschung zu erkennen, der zunehmend auch auf länderübergreifender Kooperation basiert.

Die Entwicklung von Applikations-einrichtungen und Dosimetrie

Während es bezüglich biomedizinischer Analysemethoden keinen Unterschied gibt zwischen den Untersuchungen im nieder- zu denen im hochfrequenten Bereich der Felder, sind technisch gesehen die Anforderungen im HF-Bereich wesentlich höher. Biologische Experimente im GHz-Bereich erfordern einen erheblichen technischen und damit auch finanziellen Aufwand, angefangen von den erforderlichen Generatoren, über Verstärker bis hin zu definierten Sendeanlagen in reflexfreier Umgebung. Es reicht nicht aus, ein eingeschaltetes Mobiltelefon in die Nähe einer Petrischale zu legen wie es leider selbst in aktuellen Publikationen mitunter noch geschieht (zum Beispiel: 25, 79, 80, 99). Experimentelle Daten können heute nur dann in der Forschung ernst genommen zu werden, wenn technisch korrekte Applikationsbedingungen und entsprechende Dosimetrie zum Einsatz kommen.

Es gibt im Berichtszeitraum mehrere Fälle, bei denen ursprünglich gefundene biologische Effekte bei Wiederholung nach Korrektur der Applikationsbedingungen nicht mehr nachweisbar waren. Als Beispiel dafür seien die Untersuchungen an dem Fadenwurm Ca-

enorhabditis elegans genannt. Die zunächst als „nicht-thermisch“ bezeichnete Expression eines Hitzeschockproteins (HSP16) bereits bei SAR-Werten von 1 mW/Kg¹⁷ war nach Korrektur der Applikationseinstellung bei dieser Dosis nicht mehr nachweisbar¹⁸. Der ursprünglich richtig gemessene Effekt war auf eine Erwärmung der thermisch außerordentlich empfindlichen Tiere zurückzuführen. Auch die spektakulären Befunde zu einer möglichen Krebspromotion von 900-MHz-Feldern bei transgenen Mäusen⁸⁴ mussten nach Präzisierung der Methodik revidiert werden⁹³. In beiden Fällen korrigierten die Arbeitsgruppen ihre Ergebnisse selbst. Leider sind dies Ausnahmen. Wesentlich öfter kommt es vor, dass Resultate eines Labors durch Wiederholungsexperimente anderer bestritten werden. Dies wird dann von außen als Streit der Meinungen interpretiert. „Widerlegen“ kann man höchstens eine philosophische These. Ein experimenteller Befund kann in Zweifel gezogen werden, wenn er sich nicht reproduzieren lässt, „widerlegt“ ist er damit nicht. Lediglich der Nachweis methodischer Fehler, soweit diese aus der Publikation der Ergebnisse überhaupt erkennbar sind, kann die vergeblichen Bemühungen der Replikation eines experimentellen Befundes erklären und die Wahrscheinlichkeit bestärken, dass es sich um ein falsches Resultat gehandelt hat. Trotzdem, und dafür gibt es leider viele Beispiele, werden fehlerhafte Messungen von manchen Interpreten unbeschadet dieses Nachweises immer wieder argumentativ verwendet. Die Vernachlässigung methodischer Sorgfalt von Untersuchungen ist leider nach wie vor eine nicht versiegende Quelle von Fehlschlüssen⁴⁶. Verstärkt durch entsprechende Pressekampagnen, führt dies immer wieder zu einer unbegründeten Verunsicherung des Bürgers.

Präzisere Erkenntnisse durch Einsatz moderner biomedizinischer Analysemethoden

Natürlich ist nicht nur bezüglich der HF-Technik ein deutlicher methodischer Fortschritt zu verzeichnen, sondern gleichfalls hinsichtlich biomedizinischer Analysemethoden. Während ersteres jedoch vornehmlich als Anwendung bereits existierender technischer Wissens auf die Entwicklung von Applikatoren und Methoden der Dosimetrie zu betrachten ist, profitierte die bioelektromagnetischer Forschung unmittelbar von der raschen Entwicklung der biomedizinischen Analysetechnik generell.

Genannt sei zum Beispiel die Entwicklung der HTS-Technologien (High Throughput Screening Technologies), eine Gruppe molekularbiologischer Analysemethoden, die es erlauben in kurzer Zeit eine riesige Anzahl molekularbiologischer Daten aus kleinsten Probemengen zu erfassen⁶². Allerdings ist auch hier größte Sorgfalt hinsichtlich statistischer Absicherung der Ergebnisse zu fordern. So mussten voreilige Schlüsse bezüglich möglicher Expression von Stressproteinen und deren potentieller Krebsgefahr⁶¹ in Folge korrigiert werden^{45, 48, 94}. Nur eine genaue Kenntnis der physiologischen Variabilität dieser komplexen Parameter, verbunden mit der Durchführung von Positiv-Kontrollen erlaubt es, eventuelle Änderungen im Experiment mit exponierten Systemen richtig zu interpretieren. Die schnelle Erfassung großer Datenmengen allein reicht nicht aus.

In diesem Zusammenhang ist auch die Diskussion über Experimente aufschlussreich, aus welchen man schloss, dass in menschlichen Fibroblasten durch HF-Felder an der Obergrenze maximal zulässiger Intensität DNA-Schäden erzeugt werden²⁰. Die Autoren bezogen sich dabei auf Resultate aus dem so genannten Comet-Assay, einem Elektrophorese-Test, welcher routinemäßig zum Nachweis von DNA-Strangbrüchen verwendet wird. Dieser Test, besonders wenn seine Auswertung wie bei diesen Experimenten manuell und nicht automatisiert erfolgt, ist allein genommen für weitreichende Schlussfolgerungen nicht aussagekräftig genug, zeigt er doch auch Aberrationen an, die sich im natürlichen Zellzyklus abspielen⁹⁵. Nur ein Nachweis weiterer Konsequenzen dieses Vorganges könnte zu einer berechtigten Schlussfolgerung führen. Versuche, diese Ergebnisse mit verbesserter Technik zu reproduzieren, blieben ergebnislos⁸⁹.

Die Untersuchung möglicher Effekte hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf kognitive Leistungen des Menschen, sein Reaktionsvermögen, aber auch sein Schlafverhalten haben in den vergangenen Jahren stark von der allgemeinen Entwicklung der Neurophysiologie und ihrer Methoden profitiert. Dies betrifft einmal den Komplex der EEG-Messungen, zum anderen aber auch die Möglichkeit, Durchblutungsänderungen mit Hilfe der Positronen-Resonanz-Tomographie (PET) nachzuweisen^{51, 52}. Leider besteht das Problem vieler dieser Methoden darin, dass sich aus technischen Gründen Messungen während der Exposition verbieten¹⁴.

Überraschenderweise zeigen solche Untersuchungen immer wieder unreproduzierbare Effekte. In einigen



Fällen scheiterten die Forschungsgruppen daran, ihre eigenen Ergebnisse zu reproduzieren (zum Beispiel: Röschke⁸⁵ versus Wagner⁹⁷; Eulitz^{24, 39} versus Hamblin⁴⁰). Im Gegensatz zu den oben genannten Beispielen scheint dies allerdings in den meisten Fällen nicht an technischen Mängeln oder Sorgfalt der Experimentatoren zu liegen, sondern Ursachen im Systemverhalten selbst zu haben. Trotz allem kommt man zu dem Schluss, dass zwar nicht die Exposition durch einen nahen Sendemast, mitunter jedoch die Felder eines Mobiltelefons am Ohr geringfügige Einflüsse auf das Gehirn ausüben können, die jedoch vom physiologischen Zustand des Probanden abhängig sind und sich in den Grenzen neurophysiologischer Alltagsschwankungen halten. Anfängliche Behauptungen, derartige Messungen ergäben Hinweise auf gesundheitsschädigende Wirkungen⁵⁶, sind allerdings hinfällig. Trotzdem sollte man den Mechanismen, die zu diesen Effekten führen nachgehen. Krause et al.⁵⁸ nehmen an, dass es sich dabei um Reaktionen auf geringe kortikale Erwärmungen handeln könnte. Dafür würden auch die lokalen Durchblutungsänderungen sprechen, die mit Hilfe der PET gemessen wurden⁵¹. Offenbar wird immer noch die Empfindlichkeit des Systems physiologischer Thermorezeption unterschätzt³³.

Der Weg epidemiologischer Forschung

In den letzten Jahren ist ein deutlicher Zuwachs der Anzahl epidemiologischer Erhebungen über mögliche Einwirkungen der Felder des Mobilfunks zu verzeichnen, der natürlich auch auf den rapide steigenden Gebrauch dieser Geräte zurückzuführen ist. Gleichzeitig gibt es aber auch einen deutlichen Trend zu Konkretisierung der Ergebnisse und zur Elimination von Fehlentscheidungen.

Epidemiologische Studien zu möglichen gesundheitlichen Konsequenzen der Exposition mit hochfrequenten Feldern begannen mit der Erfassung beruflich exponierter, wie Arbeiter in Rundfunkanstalten, Radar- und Flugpersonal, insbesondere im militärischen Bereich, wobei die Studie von Szmigielski⁹² über angebliche feldbedingte Krebsfälle im polnischen Militär besonders intensiv und kontrovers diskutiert wurde. Generell ließen die Erhebungen über berufsmäßige Exposition mit HF-Feldern jedoch keine deutlichen Zusammenhänge erkennen, hauptsächlich wohl wegen der mangelhaften Dosimetrie sowie durch die sehr unterschiedlichen und zum Teil intensiven Con-

founder, das heißt ebenfalls berufsspezifischen Einflüsse durch andere Agenzien^{11, 22, 23, 55}.

Erst in den 90-er Jahren erschienen dann auch Erhebungen die sich mit möglichen Folgen hochfrequenter Exposition der Bevölkerung befassten. So interessierte man sich zum Beispiel für einen möglichen Zusammenhang zwischen Kinderleukämie und der Nähe des Wohnortes zu Sendemasten von Rundfunk und Fernsehen^{21, 49, 69, 70}. Rothman et al.⁸⁶ wiesen erstmalig auf die Notwendigkeit hin, einen möglichen Zusammenhang zwischen Hochfrequenzexposition und Hirntumoren epidemiologisch zu untersuchen, wobei er gleichzeitig auf die methodischen Schwierigkeiten dieses Unterfangens aufmerksam machte.

Erst Ende der 90-er Jahre richtete sich die Aufmerksamkeit epidemiologischer Forschung unmittelbar auf mögliche Einflüsse des Mobiltelefons auf die Gesundheit. Die erste Fallkontrollstudie zu einem möglichen Zusammenhang mit dem Auftreten von Hirntumoren stammt wohl von Hardell et al.⁴³ aus dem Jahre 1999. In den Folgejahren wurden einige Fallkontrollstudien in dieser Richtung publiziert, die allerdings keine eindeutigen Schlüsse zuließen^{42, 43, 54, 72, 74, 75, 100}. Es erschienen in Folge auch Publikationen, in denen körperliches Unwohlsein und andere allgemeine Symptome in Zusammenhang mit Wohnen in der Nähe von Basisstationen des Mobilfunks erfasst wurden^{7, 76}. Diese Studien wiesen jedoch oftmals gravierende methodische Fehler auf.

Eine umfangreiche Zusammenfassung der Situation stellten fünf Mitglieder des ständigen Epidemiologie-Komitees der ICNIRP zusammen⁵. Sie kommen zu dem Schluss, dass bis 2004 die epidemiologischen Befunde keinen schlüssigen und überzeugenden Hinweis lieferten, der einen kausalen Zusammenhang zwischen einer Exposition durch Hochfrequenzfelder und irgend einem bedenklichen Gesundheitsschaden erkennen ließ. Gleichzeitig weisen sie auf Fehlermöglichkeiten hin, die sich sowohl auf die Erhebungsstatistik als auch auf die Dosimetrie beziehen. Immer wieder taucht dabei das Problem der kleinen Zahl auf. Wenn von 100.000 Menschen im Durchschnitt pro Jahr nur etwa 10-15 an einem Hirntumor erkranken, dann reicht dies für eine statistisch abgesicherte Erhebung natürlich nicht aus. Ein weiteres Problem sind die so genannten „Confounder“, die vielen anderen, zumeist nicht erfassten, oftmals auch nicht erfassbaren Ursachen gesundheitlicher Störungen, an denen unsere moderne Umwelt bekanntlich reich ist.

Alle diese kritischen Bemerkungen haben zu einer deutlichen Verbesserung der neuen epidemiologischen Erhebungen geführt, zum Teil unter Nutzung von Angaben aus Krebsregistern^{13, 59, 67, 68}. Die Untersuchungen der letzten Jahre zeichnen sich dadurch aus, dass internationale Zusammenarbeit zu einer Erhöhung der Fallzahlen führte. Als Beispiel sei die INTERPHONE-Studie genannt, an der sich 13 Länder beteiligten. Obgleich keine der bisher durchgeführten Studien einen Einfluss von Mobilfunkanlagen oder Handys auf Wohlbefinden oder Gesundheit nachweisen konnten, finden wir doch fast bei jeder dieser Publikationen den Schlusssatz: „weitere Untersuchungen sind notwendig“. Dies mag an der Restunsicherheit jeder dieser Befunde liegen, zum Teil aber auch an den immer noch bestehenden Bedenken zu Langzeiteffekten. Dabei ist man heute besser in der Lage, Fehler zu erkennen und daraus Empfehlungen über die Art weiterführender Arbeiten auszusprechen^{77, 87, 96}.

Modelle und Hypothesen zu möglichen biophysikalischen Wirkungsmechanismen hochfrequenter elektromagnetischer Felder

An anderer Stelle wurde bereits ausführlich über Primärprozesse der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder berichtet³⁴. Hier sollen lediglich exemplarisch die Entwicklungen der letzten zwei Jahrzehnte beleuchtet und Tendenzen erkannt werden.

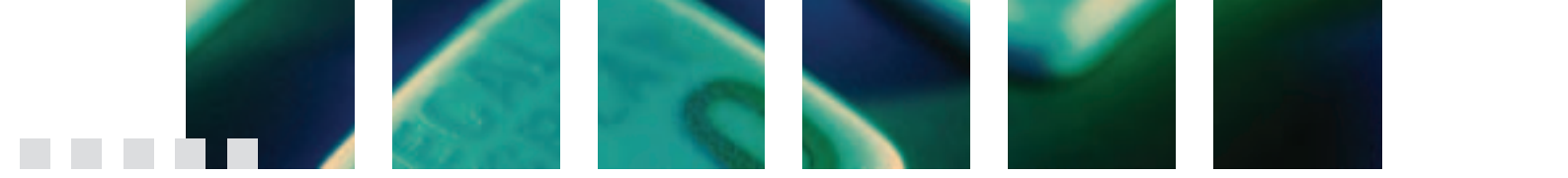
„*Hypotheses non fingo*“ – (Hypothesen erfinde ich nicht) meinte Newton und wies damit auf den Bezug zwischen Experiment und Theorie hin. In der EMF-Forschung ist diese Verbindung offensichtlich: Vermeintliche Feldeffekte spornten die Biophysiker immer wieder an über Mechanismen nachzudenken, theoretisch erarbeitete Modelle stimulierten zu neuen Experimenten. Diese Wechselwirkung zwischen Theorie und Experiment ergibt entweder eine Spirale, die sich asymptotisch dem Punkt der Erkenntnis nähert, oder, wenn es an objektiver Realität fehlt, einen Kreislauf der allmählich versandet.

Im Falle Dielektrophorese und Elektrorotation gab es eine Erfolgsspirale: Experiment und Theorie führten zu Erkenntnissen, die heute ihren unbestrittenen Platz in der Biotechnologie haben^{31, 35}. Diese beiden nicht-thermischen Prozesse der Polarisierung durch hochfrequente Felder erfordern jedoch Feldstärken, die mehrere Zehnerpotenzen über den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten liegen und deshalb für die

Thematik dieses Beitrages ohne Bedeutung sind. Die Forschung zu HF-Feldern geringerer Intensitäten gleicht hingegen bisher leider der Alternativsituation. Dies sei an zwei Beispielen erläutert.

Das eine hängt mit der Cyclotron-Resonanz-Hypothese von A. R. Liboff zusammen, die sich zunächst auf das Zusammenwirken von statischem Magnetfeld und niederfrequenten EMF bezog⁶³, später auch auf niederfrequent modulierte HF-Felder ausgedehnt wurde. Besonders spektakulär waren damals die Experimente aus dem Labor von Ross Adey, wonach hochfrequente Felder (147 MHz) auf den Kalziumhaushalt des Gehirns einwirken sollten, wenn diese mit 16 Hz moduliert waren^{8, 10}. Bereits 1982 hatten allerdings Merritt und Shelton⁷¹ die Befunde dieser Gruppe als methodisch fehlerhaft und unreproduzierbar verworfen. Auch die von Bawin und Blackman behauptete Beeinflussung des Kalzium-Signalweges in Lymphozyten durch modulierte hochfrequente Felder ließ sich nicht reproduzieren¹⁵. Nicht nur experimentell, auch physikalisch erwies sich diese Hypothese inzwischen als unrealistisch¹. Unabhängig davon wurde klar, dass niederfrequente Felder nicht das Resultat einer Demodulation hochfrequenter Felder durch das biologische System sein können²⁸. So lief die ganze, mit vielen Publikationen unterlegte Richtung schließlich ins Leere. Nur in bestimmten Außenseitergruppen wird die Bawin-Publikation mitunter immer noch unkritisch zitiert, wenn sie sich gut als Argument verwenden läßt. Das zweite Beispiel bezieht sich auf die Theorie kohärenter Erregung von H. Fröhlich, dem unter anderem ein spezielles Symposium in Bad Neuenahr im Jahre 1982 gewidmet war³⁰. Auch diese Theorie und ihre vorausgesagten scharfen Resonanzfenster im GHz-Bereich ließ sich weder experimentell noch theoretisch verifizieren^{36, 37} trotz anfänglicher experimenteller Hinweise³⁸. Im Zusammenhang mit diesen Vorstellungen sind auch die Versuche von T. Litovitz zu sehen, der eine „coherence time“ postulierte, eine kurze Zeitspanne, die benötigt würde, die niederfrequente Kohärenz bei HF-Modulationen im biologischen System einzustellen⁶⁶. Er beharrte noch auf seiner Vorstellung von der Beeinflussung der Aktivität von Ornithindecaboxylase (ODC) durch niederfrequente Fenstereffekte^{73, 81} auch nachdem alle Versuche anderer Arbeitsgruppen fehlgeschlagen waren, dies zu reproduzieren [z.B.⁶] (speziell zu dieser Kontroverse siehe:^{32, 65}).

Als entscheidenden Fortschritt des letzten Jahrzehnts erscheint die experimentell wie theoretisch untermau-



erte Feststellung, dass es eine resonante Energieakkumulation hochfrequenter Schwingungen wegen der starken viskösen Dämpfung im wässrigen Milieu nicht geben kann^{2, 3, 12, 26, 82, 83}. Damit entfallen auch die Argumente für scharfe Frequenzfenster der Wirkung hochfrequenter Felder.

Weder die ursprünglich vermutete Induktion von Kalzium-Signalen, noch die ODC-Befunde^{19, 45, 50}, auch nicht die anfänglich behaupteten Veränderungen im Melatonin-Haushalt^{44, 90, 101} haben sich bestätigt. Viele dieser Befunde beruhten auf Methoden der Fluoreszenzmikroskopie. Dabei wird oftmals übersehen, dass die Zellen dabei mitunter einer UV-Strahlung ausgesetzt sind, die deutlichere Effekte setzt als die applizierten Hochfrequenzfelder⁵³.

Ein bereits 1985 vermuteter Einfluss hochfrequenter EMF auf das komplizierte System der Beseitigung schädlicher Sauerstoffradikale (ROS = „reactive oxygen species“) des Zellstoffwechsels⁶⁴ wurde in den letzten Jahren erneut aufgegriffen und widersprüchlich diskutiert^{25, 29, 57, 60, 78, 88, 102}. Diesen Vorstellungen liegt allerdings kein plausibler biophysikalischer Mechanismus zugrunde. Die Entwicklung wird zeigen, ob sich die Messungen verifizieren lassen, oder ob diejenigen Recht behalten, welche die biologische Variationsbreite dieses Systems und die Unsicherheit der Analysemethoden für die Ursache bisheriger Befunde halten. Resumiert man die Feststellungen dieses Abschnittes, so drängt sich der Schluss auf, dass die 15 Jahre dieses Berichtszeitraums eine Zeit des Aufräumens mit unrealistischen Hypothesen waren. Folgt man Newtons „*Hypotheses non fingo*“, so ist die Frage erlaubt: Welche unbestrittenen experimentellen Effekte erfordern eigentlich heute noch eine biophysikalische Erklärung?

„Nicht-thermische“ oder „subtle-thermal“ Effekte?

Betrachtet man die eingangs aufgeführten Messungen neurologischer Art, inklusive deren Variabilität, und zusätzlich die immer wieder publizierten Ergebnisse zum Auftreten von Hitzeschockproteinen^{16, 91}, so wird man letztlich doch wieder auf eine thermische Wirkung hochfrequenter Felder zurückverwiesen, auch wenn dies nicht immer als Temperaturerhöhung messbar ist. Bezüglich der Hitzeschockproteine scheint dies deutlich, denn viele Befunde in letzter Zeit zeigen, dass diese Reaktion der Zellen tatsächlich nur dann zu erwarten ist, wenn ein Temperaturstress auftritt^{47, 88, 98}.

Der Begriff „nicht-thermischer Effekt“ besitzt einen populistischen Anstrich, suggeriert er doch, es gäbe geheimnisvolle, noch unentdeckte gesundheitsschädliche Wirkungen elektromagnetischer Felder, die bei der Festlegung der Grenzwerte nicht berücksichtigt worden seien. Dem Laien ist leicht zu vermitteln, dass elektrische Schwingungen an Ladungen aller Art angreifen, und dadurch im biologischen System unvorstellbare Schäden anrichten könnten. Dabei liegt das Problem nicht im Prinzip dieser Einwirkungen, die es unbestreitbar gibt, sondern in der Frage der Dosimetrie und darin, ob diese Schwingungen im Rauschen untergehend unspezifisch zu Wärme dissipieren, also letztlich „thermisch“ sind, oder ob sie zuvor und unter Umständen in geringsten thermisch nicht nachweisbaren Energiebeträgen spezifische Auswirkungen haben könnten.

Diese Fragestellung ist so alt wie die Forschung zur Wirkung elektromagnetischer Felder selbst und reicht mithin bis an das Ende des 19. Jahrhunderts zurück³⁴. Die letzten Jahre haben durch wissenschaftliche Publikationen und vor allem auch durch Diskussionen in Fachkonferenzen ganz wesentlich zur Klärung beigetragen.

Eingangs wurde bereits darüber berichtet, wie manche „nicht-thermischen“ Effekte nach einer Korrektur der Applikationseinrichtung verschwanden, weil sie eben doch das Resultat unkontrollierter Erwärmung waren. Doch selbst nach Abzug von Ergebnissen aus Publikationen, in denen Erwärmungseffekte nachgewiesen oder zumindest zu vermuten sind, bleiben eine Reihe von Befunden, die nicht so leicht durch eine messbare Erwärmung erklärbar sind. Fortschritte auf dem Gebiet thermosensibler Ionenkanäle und sogenannter „Riboswitches“ haben im letzten Jahrzehnt allerdings gezeigt, dass diese molekularen Thermometer in vielen Zellen in bestimmten Temperaturbereichen so empfindlich reagieren, und biochemische Signalketten auslösen können, dass makroskopische Temperaturänderungen nicht messbar sind^{27, 33}. Das Resultat solcher Reaktionen können sowohl spezielle Proteinexpressionen als auch lokale Änderungen der Durchblutung sein, was zu messbaren Änderungen im EEG führen könnte. Da diese Reaktionen jedoch außerdem von verschiedenen anderen physiologischen Parametern abhängen, erklärt sich die oben beschriebene Schwierigkeit der Reproduktion dieser neurologischen Effekte. Somit sind die „nicht-thermischen“ Effekte in Wirklichkeit als „subtle-thermal“, also minimal-thermische

Alltagseffekte einzustufen. Sie treten auch auf, wenn der Mensch an Sommertagen schwitzt, den wohltuenden Strahl einer warmen Dusche spürt oder anderweitig seine Thermoregulation aktiviert. Der Biophysiker interessiert sich natürlich für jeden unzweifelhaft nachgewiesenen Effekt hochfrequenter Felder auf das biologische System, der Strahlenschützer hat hingegen nur solche Einflüsse zu beachten, die in irgend einer Form gesundheitlich relevant sind. Es hat sich die von Bernhardt bereits 1999 publizierte Feststellung erhärtet⁹: „Eine mögliche pathologische Bedeutung bisher beschriebener Berichte über sogenannte nichtthermische Effekte ist derzeit rein spekulativ.“

Schlussfolgerungen

Kommen wir also zu dem Schluss: „Das Problem ist geklärt. Die Wissenschaft hat bewiesen, dass es im Rahmen der Grenzwerte keine gesundheitsschädlichen Einwirkungen der Felder des Mobilfunks gibt.“ - Leider kann dieses Postulat nur mit Einschränkungen gelten: Prinzipiell kann die Wissenschaft die Nicht-Existenz eines Prozesses nicht beweisen. Der Satz müsste also lauten: „Die Forschung der letzten Jahrzehnte konnte einerseits mit vielen Irrtümern bezüglich der Wirkung hochfrequenter Felder aufräumen und trotz weltweiter Bemühungen bisher keinen reproduzierbaren Beleg einer gesundheitlichen Gefahr durch diese Felder im Rahmen der gültigen Grenzwerte nachweisen.“

Da es sich aber hierbei nicht um ein Agens handelt, das nur einen geringen Prozentsatz der Population betrifft, sondern um Felder, denen qualitativ und quantitativ unterschiedlich zunehmend jeder Bürger der zivilisierten Welt inzwischen ausgesetzt ist, kann man sich mit dieser Aussage nicht zufrieden geben. Folgende Aktivitäten auf diesem Gebiet erscheinen dem Autor für die Zukunft von Bedeutung:

- Die technische Nutzung hochfrequenter Felder ist in schneller Entwicklung und damit erhöht sich qualitativ und quantitativ die Exposition des Bürgers. Wenn bisher auch enge Fenstereffekte für spezielle Frequenzen und Intensitäten hochfrequenter Felder nicht nachweisbar waren, so sind in dem breiten Frequenzbereich in den Größenordnungen von 0,1 bis 10 GHz durchaus unterschiedliche Wirkungsmechanismen bei stärkeren Intensitäten zu erwarten. Daraus ergibt sich die Verpflichtung, bei jeder technischen Neuerung die gesundheitlichen Konsequenzen der dort verwendeten Intensitäten,

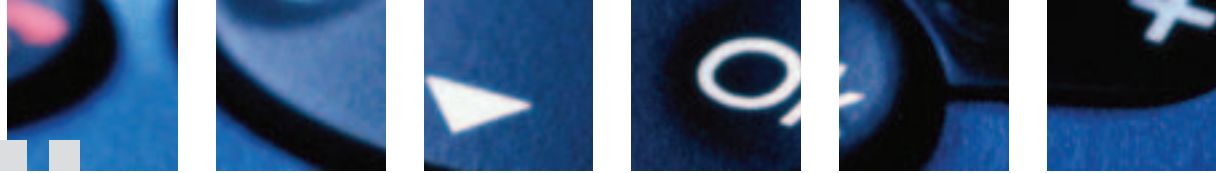
Frequenzen und Modulationen neu einzuschätzen und gegebenenfalls neue Forschungsprojekte auszulösen, um möglichen gesundheitsrelevanten Einwirkung vorzubeugen.

- Der in Abb. 1 gezeigte quantitative Anstieg der Anzahl wissenschaftlicher Publikationen erfordert eine erhöhte Aufmerksamkeit. Da immer wieder Experimente publiziert werden, die ohne zuverlässige Dosimetrie, ohne Doppelblind-Auswertung und Positivkontrolle, also mit mangelhafter Qualität entsprechend moderner Technik durchgeführt werden und daher häufig fehlerhaft sind, ist eine wachsame Qualitätskontrolle erforderlich. Leider gibt es viele Beispiele dafür, dass Ergebnisse von oberflächlich oder falsch durchgeführten Experimenten, durch die Presse hervorgehoben, zu spektakulären Reaktionen in der Öffentlichkeit führten. Millio-nenteure Forschungsprojekte wurden dann erforderlich, die letztlich diese Ergebnisse nicht aus der Welt schaffen konnten, auch wenn diese keine Bestätigung fanden und Fehlerquellen nachweisbar waren. Dem gilt es durch Kontrolle und Anleitung vorzubeugen. Hierzu ist eine sorgfältige Beobachtung der Forschungsaktivitäten und eine gut koordinierte internationale Kooperation erforderlich.
- Eine wichtige und nicht abklingende Aufgabe besteht darin, unbegründeten Bedenken des Bürgers bezüglich möglicher Gefahren durch hochfrequente Felder durch sachliche Aufklärung entgegenzuwirken. Diesbezüglich erscheint es auch wichtig, selbst den oben erwähnten Effekten nachzugehen, die eigentlich im Rahmen von Alltagsveränderungen liegen ohne gesundheitlich relevanten Charakter. Nur durch Kenntnis des Mechanismus auch solcher Alltagseffekte kann eine wissenschaftliche Extrapolation und Wertung von Expositionen generell vorgenommen werden.

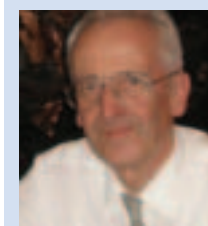
Literaturnachweise

(Die ausführlichen Zitate finden Sie in der Internet-Version dieses Artikels)

1. Adair, R. K. *Bioelectromagnetics* 19 (98) 181.
2. Adair, R. K. *Biophys. J.* 82 (2002) 1147.
3. Adair, R. K. *Bioelectromagnetics* 24 (2003) 440.
4. Adair, R. K. *Bioelectromagnetics* 24 (2003) 444.
5. Ahlbom, A., Green, A. et al. *Environ. Health Persp.* 112 (2004) 1741.
6. Azadniv, M., Klänge, C. M. et al. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 214 (95) 627.
7. Balmori, A. *Electromagnetic Biology and Medicine* 24 (2005) 109.



8. Bawin, S. M., Adey, W. R. et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 75 (78) 6314.
9. Bernhardt, J. H. *Deutsches Ärzteblatt* 96 (99) 845.
10. Blackman, C. F., Benane, S. G. et al. *Bioelectromagnetics* 1 (80) 35.
11. Blettner, M., Schlehofer, B. *Med. Klin.* 94 (99) 150.
12. Challis, L. J. *Bioelectromagnetics Supplement* 26 (2005) S98-S106.
13. Christensen, H. C., Schüz, J. et al. *Am. J. Epidemiol.* 159 (2004) 277.
14. Cook, C. M., Saucier, D. M. et al. *Bioelectromagnetics* 27 (2006) 613.
15. Cranfield, C. G., Wood, A. W. et al. *Intern. J. Radiation Biology* 77 (2001) 1207.
16. Czyz, J., Guan, K. et al. *Bioelectromagnetics* 25 (2004) 296.
17. de Pomerai, D., C. Daniellset al. *Nature* 405 (2000) 417.
18. de Pomerai, D. I., Smith, B. et al. *FEBS Letters* 543 (2003) 93.
19. Desta, A. B., Owen, R. D. et al. *Radiat. Res.* 160 (2003) 488.
20. Diem, E., Schwarz, C. et al. *Mutat. Res. – Gen. Toxicol. Environ. Mutag.* 583 (2005) 178.
21. Dolk, H., Elliott, P. et al. *Am. J. Epidemiol.* 145 (97) 10.
22. Elwood, J. M. *Environ. Health Persp.* 107 (99) 155.
23. Elwood, J. M. *Bioelectromagnetics Suppl.* 6 (2003) S63-S73.
24. Eulitz, C., Ullsperger, P. et al. *Neuroreport* 9 (98) 3229.
25. Ferreira, A. R., Bonatto, F. et al. *Bioelectromagnetics* 27 (2006) 487.
26. Foster, K. R., Baish, J. W. *J. Biol. Phys.* 26 (2000) 255.
27. Foster, K. R., Glaser, R. *Health Physics* 92 (2007) 609.
28. Foster, K. R., Repacholi, M. H. *Radiat. Res.* 162 (2004) 219.
29. Friedman, J., Kraus, S. et al. *Biochem. J. Published on 25 Apr 2007 as manuscript BJ20061653* (2007)
30. Fröhlich, H., Kremer, F. eds. - Springer Verlag, Berlin (83)
31. Fuhr, G., Hagedorn, R. In: Lynch, P. T., M. R. Davey (eds.): Chapman & Hall, New York (96) 38.
32. Glaser, R. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 46 (1998) 301.
33. Glaser, R. *Edition Wissenschaft* 21 (2005) 3.
34. Glaser, R. *News Letter FGF* (2006) 10.
35. Glaser, R., Fuhr, G. In: M. Blank and E. Findl (eds.): Plenum Press, New York (1987) 271.
36. Gos, P., Eicher, B. et al. *Bioelectromagnetics* 18 (1997) 142.
37. Gos, P., Eicher, B. et al. *Bioelectromagnetics* 21 (2000) 515.
38. Grundler, W., Keilmann, F. *Z. f. Naturforsch.* 44c (89) 863.
39. Hamblin, D. L., Wood, A. W. *Int. J. Radiat. Biol.* 78 (2002) 659.
40. Hamblin, D. L., Wood, A. W. et al. *Clinical Neurophysiology* 115 (2004) 171.
41. Hardell, L., Hallquist, A. et al. *Europ. J. Cancer Prevention* 11 (2002) 377.
42. Hardell, L., Mild, K. H. et al. *Intern. J. Oncology* 22 (2003) 399.
43. Hardell, L., Näsman, Å. et al. *Intern. J. Oncology* 15 (99) 113.
44. Hata, K., Yamaguchi, H. et al. *Bioelectromagnetics* 26 (2005) 49.
45. Heikkinen, P., Kosma, V. M. et al. *Intern. J. Radiat. Biol.* 79 (2003) 221.
46. Heynick, L. N., Johnston, S. A. et al. *Bioelectromagnetics Suppl.* 6 (2003) S74-S100.
47. Hirose, H., Sakuma, N. et al. *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 99.
48. Hirose, H., Sakuma, N. et al. *Bioelectromagnetics* 27 (2006) 494.
49. Hocking, B., Gordon, I. R. et al. *Med. J. Aust.* 165 (96) 601.
50. Hoytö, A., Sihvonen, A.-P. et al. *Radiat. Environ. Biophys.* 45 (2006) 231.
51. Huber, R., Treyer, V. et al. *J. Sleep Res.* 11 (2002) 289.
52. Huber, R., Treyer, V. et al. *Europ. J. Neurosci.* 21 (2005) 1000.
53. Ihrig, I., Heese, C. et al. *Bioelectromagnetics* 18 (1997) 595.
54. Inskip, P. D., Tarone, R. E. et al. *N-Engl-J-Med* 344 (2001) 79.
55. Kheifets, L. I. *Bioelectromagnetics S5* (2001) S120-S131.
56. Klitzing, I. von. *Physica Medica* 11 (95) 77.
57. Koyu, A., Cesur, G. et al. *Toxicology Letters* 157 (2005) 257.
58. Krause, C. M., Bjornberg, C. H. et al. *Intern. J. Radiat. Biol.* 82 (2006) 443.
59. Lakkola, A., Auvinen, A. et al. *Int. J. Cancer* 120 (2007) 1769.
60. Lantow, M., Schuderer, J. et al. *Radiat. Res.* 165 (2006) 88.
61. Leszczynski, D., Joenvaara, S. et al. *Differentiation* 70 (2002) 120.
62. Leszczynski, D., Metz, M. L. *Proteomics* 6 (2006) 4674.
63. Liboff, A. R. In: A. Chiabrera et al. (eds.), Plenum, London (1985) 281.
64. Liburdy, R. P., Vanek, P. F. *Radiat. Res.* 102 (1985) 190.
65. Litovitz, T. A. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 46 (1998) 303.
66. Litovitz, T. A., Krause, D. et al. *Bioelectromagnetics* 14 (93) 395.
67. Lonn, S., Ahlbom, A. et al. *Am. J. Epidemiol.* 164 (2006) 637.
68. Lönn S, Forssen U et al. *Occup Environ Med* 61 (2004) 769.
69. Mascarinec, G., Cooper, J. et al. *J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol.* 13 (94) 33.
70. McKenzie, D. R., Yin, Y. et al. *Austral. New Zealand J. Pub. Health* 22 (98) 360.
71. Merritt, J. H., Shelton, W. W. Chamness A. F. *Bioelectromagnetics* 3 (82) 475.
72. Morgan, R. W., Kelsh, M. A. et al. *Epidemiology* 11 (2000) 118.
73. Mullins, J. M., Litovitz, T. A. et al. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 44 (98)
74. Muscat, J. E., Malkin, M. G. et al. *Neurology* 58 (2002) 1304.
75. Muscat, J. E., Malkin, M. G. et al. *JAMA* 284 (2000) 3001.
76. Navarro, E. A., Segura, J. et al. *Electromagnetic Biology and Medicine* 22 (2003) 161.
77. Neubauer, G., Feychting, M. et al. *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 224.
78. Oktem, F., Ozguner, F. et al. *Arch. Med. Res.* 36 (2005) 350.
79. Ozguner, F., Bardak, Y. et al. *Mol. Cell. Biochem.* 282 (2006) 83.
80. Panagopoulos, D. J., Chavdoula, E. D. et al. *Mutat. Res.-Genetic Toxicol. Environ. Mutag.* 626 (2007) 69.
81. Penafiel, L. M., Litovitz, T. et al. *Bioelectromagnetics* 18 (97) 132.
82. Pickard, W. F., Moros, E. G. *Bioelectromagnetics* 22 (2001) 97.
83. Prohofsky, E. W. *Bioelectromagnetics* 25 (2004) 441.
84. Repacholi, M. H., Basten, A. et al. *Radiat. Res.* 147 (97) 631.
85. Röschke, J., Mann, K. *Bioelectromagnetics* 18 (97) 172.
86. Rothman, K. J., Chou, C. K. et al. *Epidemiology* 7 (96) 291.
87. Schüz, J., Johansen Ch. *Bioelectromagnetics* 28 (2007) 130.
88. Simko, A., Hartwig, C. et al. *Toxicology Letters* 161 (2006) 73.
89. Speit, G., Schuetz, P. et al. *Mutat. Res.-Genetic Toxicol. Environ. Mutag.* 626 (2007) 42.
90. Sukhotina, I., Streckert, J. R. et al. *J. Pineal Res.* 40 (2006) 86.
91. Sun, L. X., Yao, K. et al. *Mutat. Res.-Fund. Mol. Mech. Mutag.* 602 (2006) 135.
92. Szmigielski, S. *Sci. Total Environ.* 180 (96) 9.
93. Utteridge, T. D., Gebiski, V. et al. *Radiat. Res.* 158 (2002) 000.
94. Vanderwaal, R. P., Cha, B. et al. *Intern. J. Hyperthermia* 22 (2006) 507.
95. Vijayalaxmi. *Radiat. Res.* 166 (2006) 532.
96. Vrijheid M, Deltour I et al. *J Expo Sci Environ Epidemiol* (2006)
97. Wagner, P., Röschke, J. et al. *Bioelectromagnetics* 19 (98) 199.
98. Wang, J., Koyama, S. et al. *Bioelectromagnetics* 27 (2006) 479.
99. Weisbrot, D., Lin, H. et al. *J. Cell. Biochem.* 89 (2003) 48.
100. Wilén, J., Sandström, M. et al. *Bioelectromagnetics* 24 (2003) 152.
101. Wood, A. W. *Archives of Disease in Childhood* 91 (2006) 361.
102. Zmyslony, M., Palus, J. et al. *Bioelectromagnetics* 25 (2004) 560.



Prof. em. Dr. rer. nat. habil. Roland Glaser war Inhaber eines Lehrstuhls für Biophysik an der Humboldt-Universität zu Berlin. Prof. Glaser ist Mitglied der Arbeitsgruppe „Mikrodosimetrie HF“ der Strahlenschutzkommission.