

Zusammenfassung und Überblick über den aktuellen Stand

# Biophysikalische hochfrequenter elektro

Roland Glaser

## 1. Einige grundsätzliche Fragen

### 1.1 Das eigentliche Problem

Haben die elektromagnetischen Felder des Mobilfunks oder anderer technischer Quellen unserer Umgebung schädliche Einflüsse auf unsere Gesundheit? Diese Frage, obgleich neu in ihrer Aktualität, beschäftigt Ärzte und Naturwissenschaftler schon seit über hundert Jahren. Der französische Erfinder und Arzt Jacques Arsène d'Arsonval (1851-1940) publizierte bereits 1896 seine Feststellung, wonach HF-Felder nicht in der Lage sind, Nerven und Muskeln zu reizen. Der



### Biophysikalische Primärreaktionen

Da diese Fragen auch in Expertenkreisen kontrovers diskutiert werden, fand vom 11. bis 13. September 2006 in Rostock der FGF-Workshop „Proposed Mechanisms for the Interaction of RF-Signals with Living Matter-Demodulation in Biological Systems“ statt – in Zusammenarbeit mit der Universität Rostock und der Europäischen Forschungsinitiative COST 281. Er gab einen Überblick über Methoden und Ergebnisse biologischer und theoretischer Studien, die speziell modulations-spezifische Effekte zum Thema haben.

deutsche Arzt Karl Franz Nagelschmidt formulierte 1906 den Begriff „Diathermie“ und erkannte damit die therapeutische Wirkung thermischer Effekte hochfrequenter Felder, die bis heute als „Kurzwellentherapie“ bei verschiedenen Gelenkerkrankungen verwendet wird [Rowbottom u. Susskind 1984].

Man stellte bald fest, dass bei Rundfunktechnikern in Sendeanstalten, die starken hochfrequenten Feldern ausgesetzt waren, vegetative Störungen auftraten – damals als „Senderkrankheit“ oder „Kurzwellenkater“ bezeichnet. Frühzeitig erkannte man, dass es sich auch dabei offensichtlich um „eine primär elektrische Allgemeinerwärmung des gesamten Organismus [handelt], die ohne thermometrisch grob nachweisbar zu sein, die Regulation vor eine eigentümliche Aufgabe stellt.“ [Schaefer u. Stachowiack 1946]. Heute ist dieses Problem nicht mehr nur eine Frage des Arbeitsschutzes weniger Funktechniker. Die Befürchtung gesundheitlicher Schäden durch hochfrequente elektromagnetische Felder technischen Ursprungs beunruhigt vielmehr große Teile der Bevölkerung. Dabei handelt es sich nicht um intensive Expositionen, wie sie in Sendern und anderen großtechnischen Anlagen auftreten könnten, sondern um Felder mit weit geringerer Intensität, etwa solche vom Handy am Ohr oder durch einen nahen Sendemast. Das Unwort „Elektrosmog“ wurde geboren, was einer Verurteilung ohne Indizien gleichkommt.

### 1.2 Drei mögliche wissenschaftliche Ansätze zur Lösung des Problems

Wie kann man dieses Problem lösen, wie kann man wissenschaftlich fundierte Schutzmaßnahmen ergreifen, die Sicherheit garantieren und auch dann noch Bestand haben, wenn sich unser bio-medizinischer Kenntnisstand weiter entwickelt?



# Primärreaktionen magnetischer Felder

Naheliegender ist zunächst die Frage an den Biophysiker: Wo könnten diese Felder angreifen? Wie könnte man sich ihre Wirkungsweise auf das biologische System vorstellen? Die Antwort darauf, kurz gefasst: Wenn die Feldstärke genügend stark ist, um viele Zehnerpotenzen größer als die eines Handys am Ohr, dann könnten Dipole in Molekülen und Zellen erzeugt und bewegt werden. Bei geringeren Intensitäten bleibt nur noch die Erwärmung.

Zu diesem Schluss ist man bereits vor einem Jahrhundert gekommen (siehe oben!), Tausende von Publikationen bestätigen inzwischen diese Aussage. Und doch kann sich der Theoretiker irren. Vielleicht werden ihn neue Erkenntnisse der schnell fortschreitenden Wissenschaft dereinst eines Besseren belehren? Vielleicht übersieht er Mechanismen die auch bei geringen Feldstärken auftreten können und sich als „nicht-thermisch“ erweisen?

Probieren geht über Studieren! Man wählt deshalb im zweiten Schritt das Experiment: Zellkulturen, Tiere, ja in gewissen Grenzen sogar freiwillige Probanden werden künstlich exponiert und auf mögliche Feldwirkungen hin untersucht. Damit begibt man sich allerdings auf ein vieldimensionales Parameterfeld: Frequenz, Pulsation, Modulation, Intensität des Feldes können variiert werden, andererseits kann man nach genetischen, biochemischen, zytologischen, physiologischen, psychologischen Parametern fragen, kann diese an diesem oder jenem Versuchsobjekt, oder in einigen Fällen sogar am Menschen testen. Die Anzahl möglicher Kombinationen geht ins Unermessliche. Ist das Resultat einer Studie negativ, so bleibt die Frage: Aber hätte man nicht vielleicht bei der Wahl eines anderen Parameters etwas gefunden?

Vielleicht hilft der dritte Ansatz: Gibt es in der Bevölkerung überhaupt Hinweise darauf, dass die häufige

Nutzung des Handys oder die Nähe des Wohnorts an einer Sendeantenne gesundheitliche Schäden erzeugen? Haben Handy-Nutzer häufiger Krebs („Kohortenstudie“), oder umgekehrt gefragt: Finden sich unter den Patienten im Krebs-Register häufiger Handy-Nutzer („Fallkontroll-Studie“)? Auch dieser Ansatz hat seine Grenzen: Zum Glück sind Hirntumoren, Kinderleukämie und ähnliche Krankheiten relativ selten. Auch bei der Erfassung großer Bevölkerungsgruppen sind die Zahlen der tatsächlich Betroffenen gering und damit die Unsicherheiten der Aussage groß. Wäre der Effekt stark, wie etwa beim Zusammenhang zwischen Rauchen und Lungenkrebs, dann ließe er sich leicht nachweisen. Doch so konnten epidemiologische Erhebungen bisher keinen überzeugenden Nachweis für einen Zusammenhang von HF-Feldern mit der Häufigkeit dieser Erkrankungen erbringen.

## 1.3 Die Notwendigkeit eines biophysikalischen Modells

Da die Wissenschaft prinzipiell die Nicht-Existenz eines Phänomens nicht beweisen kann, bleibt immer ein Zweifel. Die meisten Arbeiten enden mit dem Satz: „Weitere Forschung ist nötig!“. Doch Forschung kostet viel Geld; Experimente sind teuer und epidemiologische Erhebungen am teuersten. Auch wenn man von dem Biophysiker nur verlangen kann eine theoretische Erklärung für solche Effekte zu geben, die experimentell tatsächlich verifiziert wurden, die also offenbar tatsächlich existieren, so sind doch auch hypothetische Denkmodelle nützlich, die zunächst vielleicht nur auf „Hinweisen“ oder unsicheren „Vorbefunden“ basieren.

Eine vorausschauende Theorie könnte helfen die Planung des Experiments zu optimieren, indem sie aus der oben genannten Vielzahl der Parameter diejeni-

gen auswählt, die voraussichtlich den Effekt optimal zeigen, die folglich zur Verifizierung bzw. Falsifizierung der Hypothese führen könnten. Realistische Modelle müssten außerdem in der Lage sein, prinzipielle Fragen zu beantworten, etwa die nach den immer wieder postulierten Frequenz- oder Amplituden-Fenstern einer Wirkung. Ohne Kenntnis des Mechanismus ist es ferner nicht möglich, von einem gefundenen Effekt auf einen anderen bei veränderten Parametern zu schließen.

Weiterhin ist es allein aus Kenntnis des Wirkungsmechanismus überhaupt erst möglich einen Parameter zu definieren, der als Maß für die Dosis geeignet erscheint. Der im HF-Bereich derzeit verwendete SAR-Wert basiert auf der Vorstellung von einer thermischen Wirkung. Wäre die Wirkung akkumulativ, wie im Falle ionisierender Strahlung, bei welcher Mechanismus und Wirkung genau bekannt sind, dann müsste man die russische Dosisbestimmung anwenden, die als Dosis nicht W/kg, sondern  $W/kg \cdot \text{Expositionszeit}$ , also genau genommen:  $J/kg$  verwendet. Doch dafür sprechen bisher keine Befunde. Was nützt es jedoch, immer bessere Dosimeter zu bauen, wenn noch unklar ist, welcher Parameter überhaupt geeignet ist, als Dosis zur Charakterisierung der Wirkung hochfrequenter Felder auf biologische Systeme zu dienen? Biophysikalische Grundlagenforschung zu möglichen Feldeffekten und theoretische Berechnungen ist also notwendig, auch wenn die oben genannten Irrtümer dabei nicht auszuschließen sind.

## 1.4 Was heißt eigentlich Wirkungsmechanismus?

Das Grotthus-Draper-Prinzip der Biophysik besagt, dass bei irgend einer physikalischen Einwirkung auf ein System ausschließlich die im System tatsächlich absorbierte Energie wirksam ist. Im Falle biologischer Wirkung ist es dabei gleichgültig, ob diese zum Energiehaushalt desselben beiträgt, oder lediglich als Informationsquelle einen Rezeptor anregt [Glaser 1996, 2000]. Eine harte Röntgenstrahlung hoher Quantenenergie, die den Körper völlig durchdringt, ist zum Beispiel weniger effektiv als eine solche geringerer Quantenenergie, welche eine dichte Kette von Ionisationen hinterlässt. Ausgangspunkt einer jeden Hypothese zur Wirkung eines beliebigen physikalischen Faktors auf das lebende System muss folglich immer zuerst die Frage nach Art und Effektivität der Energie-

absorption sein. Dieser biophysikalische Primärschritt kann in Folge entweder im thermischen Rauschen untergehen oder eine Kette weiterer Reaktionen auslösen.

In den Systemen biologischer Informationsübertragung und -Verarbeitung sind inzwischen zahlreiche Signalketten mit molekularen Verstärkereigenschaften bekannt. Der Bruch eines DNA-Stranges, wenn er nicht repariert wird, kann zum Beispiel zur Krebsentstehung oder zu Missbildungen führen; die Anregung eines einzigen Rhodopsin-Moleküls im Auge, das über eine Kaskade von Folgeprozessen einen optischen Reiz auslöst, kann eventuell physiologische oder psychologisch erfassbare Folgen haben. Beispiele solcher Verstärkermechanismen gibt es unzählige. Mehr und mehr davon werden mit fortschreitender Forschung bekannt. Aus solchen Signalketten lassen sich leicht „biologische“ Mechanismen der Einwirkung eines Agens ableiten.

Häufig postuliert man einfach die Auslösung einer dieser Reaktionskaskaden durch den Einfluss von HF-Feldern und bezeichnet die anschließenden Folgeprozesse als „Mechanismus“ der Wirkung. Als Beispiel sei die Hypothese zum Einfluss von HF-Feldern auf das Regulationssystem der Sauerstoffradikale (ROS) in biologischen Zellen genannt [Liburdy und Vanek 1985, Scott 1992, Oktem et al. 2005, Koyu et al. 2005, Zmyslony et al. 2004, Lantow et al. 2006]. Unabhängig davon, dass selbst bei diesen Reaktionen ein möglicher gesundheitlicher Aspekt noch hypothetisch ist, bleibt die Frage völlig unberücksichtigt, wie das HF-Feld physikalisch überhaupt auf Radikale einwirken könnte. Es wird also eine Kette möglicher Wirkungen konstruiert, ohne das Anfangsglied, nämlich den physikalischen Primärprozess, zu hinterfragen, zu klären, ob die eingestrahlte HF-Energie überhaupt in der Lage ist, eine solche Kaskade auszulösen. Tatsächlich sind jedoch nicht so sehr die biologischen Folgereaktionen strittig, als vielmehr diese biophysikalischen Primärprozesse, die also in der Lage wären, solche überhaupt erst auszulösen.

In Hinblick auf viele populistische Argumentationen kann dieser Aspekt gar nicht oft genug unterstrichen werden. Der vorliegende Beitrag soll sich deshalb ausschließlich auf biophysikalische Mechanismen konzentrieren, nämlich auf die primären Prozesse der Umwandlung der Energie des HF-Feldes in molekula-

re Reaktionen. Wenn im Folgenden von „Mechanismus“ die Rede ist, geht es immer genau um eben diese biophysikalischen Primärprozesse, nicht um die Ketten biologischer Folgereaktionen.

### 1.5 Was sind „thermische“, was „nicht-thermische“ Mechanismen der Wirkung hochfrequenter Felder?

Die Begriffe „thermisch“ und „nicht-thermisch“ (oder „athermisch“) werden in der Literatur sehr unterschiedlich gebraucht [Glaser 2005]. Man spricht von „nicht-thermischen“ Effekten, wenn das Feld so schwach ist, dass mit einer Erwärmung des biologischen Objektes durch die Exposition nicht zu rechnen ist [Geletyuk et al., 1995; Kwee et al., 2001; Phillips et al., 1998; Preece et al., 1999; Weisbrot et al., 2003]. Andere Autoren nennen Effekte „nicht-thermisch“, wenn während der Exposition keine Erwärmung gemessen werden konnte, oder wenn eine gute Thermostatierung dies auszuschließen scheint [Bohr and Bohr, 2000; Byus et al., 1988; Leszczynski et al., 2002; Markkanen et al., 2004]. Wieder andere vergleichen die exponierte Probe mit einer solchen, die anderweitig auf die gleiche Temperatur aufgeheizt wurde. Als „nicht-thermisch“ identifiziert man dann Effekte der HF-erwärmten Probe, die bei konventioneller Erwärmung nicht auftreten [Cao et al., 1995; dePomerai et al., 2000; Peinnequin et al., 2000; Velizarov et al., 1999; Allis et al., 1987]. Bei diesen Definitionen bleiben allerdings die Fragen offen: Hat man nicht vielleicht kleinste Erwärmungen übersehen? Reicht die Empfindlichkeit des verwendeten Thermometers oder Thermistors aus? Ist eine Erwärmung durch ein HF-Feld gleichzusetzen mit einem solchen in einem Thermostat?

Im Unterschied zu dieser Art der Begriffsbestimmung lautet die biophysikalische Definition des Begriffes „nicht-thermisch“, auf die wir uns im Folgenden beziehen wollen, anders: *Ein Effekt ist dann nicht-thermisch, wenn unter dem Einfluss eines Feldes solche Veränderungen entstehen, die nicht durch eine Temperaturerhöhung erklärbar sind* [Fröhlich 1982]. Diese Definition hebt also auf den Mechanismus ab ohne dabei die Erwärmung zu berücksichtigen. Da jede Energieumwandlung aus Gründen der Thermodynamik letztlich in Wärme endet, ist eine Temperaturerhöhung schließlich unvermeidlich. Um ein technisches

Beispiel zu nennen: Ein Elektromotor funktioniert natürlich nicht als Wärmekraftmaschine, obgleich er sich während des Betriebes deutlich erwärmt.

Diese beiden Definitionen führen mitunter zu gegensätzlichen Einschätzungen: Dielektrophorese, zum Beispiel (s. Abschnitt 2.2., Abb. 2), als biophysikalisch eindeutig „nicht-thermischer“ Effekt von HF-Feldern geht mit einer beträchtlichen Erwärmung des Systems einher, würde also entsprechend der konventionellen Definition „thermisch“ sein. Andererseits müsste man die molekularen Mechanismen der Wärmerezeption vieler Tiere nach der allgemeinen Definition als „nicht-thermisch“ bezeichnen, denn ihre Schwellenwerte liegen zumeist unterhalb der Empfindlichkeit technischer Thermometer [Glaser 2005].

### 1.6 Mögliche Besonderheiten gepulster oder amplitudenmodulierter Felder

Es wurde eingangs bereits erwähnt, dass zwischen der Wirkung hoch- und derjenigen niederfrequenter Felder deutlich zu unterscheiden ist. Muskel- und Nervenerregungen erfordern niederfrequente Felder oder Gleichspannungspulse und sind ab 100 kHz kaum noch auslösbar. Dies liegt einmal an der dielektrischen Eigenschaft der Zellmembran, die spätestens ab 10 MHz kapazitiv überbrückt wird und zum anderen an der Refraktärzeit erregbarer Membranen, die in der Größenordnung von Millisekunden liegt [Glaser 1996, 2000].

Wenngleich demnach das Feld eines Mobiltelefons mit einer Frequenz im GHz-Bereich diese Prozesse nicht auslösen kann, bleibt die Frage, ob niederfrequente Effekte nicht vielleicht als Ergebnis einer Demodulation hochfrequenter Felder auftreten könnten. Wenn überhaupt, so könnte dies höchstens bei amplitudenmodulierten oder gepulsten Schwingungen erfolgen. Das wären zum Beispiel die Amplitudenschwankungen des UMTS-Signals oder die 217 Hz-Pulse im GSM-System.

Unter Beachtung der oben dargelegten Unterscheidung zwischen biophysikalischem Primärmechanismus und biologischen Folgereaktionen muss auch hier zwischen einer physikalischen und einer biologischen Demodulation unterschieden werden:

Als *physikalisch* ist eine Demodulation dann zu bezeichnen, wenn ein niederfrequentes elektromagnetisches Feld das Resultat dieses Prozesses ist, wenn

also tatsächlich ein niederfrequent schwingendes elektromagnetisches Feld entsteht, das den Amplitudenschwankungen oder der Pulsation des HF-Feldes folgt. Derartige Prozesse sind prinzipiell aufgrund dielektrischer Eigenschaften von Membranproteinen möglich, allerdings nur in einem Frequenzbereich der Trägerwellen, der weit unterhalb von 10 MHz liegt, also nur bis zu derjenigen Frequenz, bei welcher die Membran kapazitiv überbrückt wird und die Proteine ihre Rolle als nichtlineare elektrische Bauelemente verlieren. Man schließt daraus, dass eine Demodulation in biologischen Systemen im physikalischen Sinne des Wortes für Frequenzen des Mobilfunks nicht vorkommt. Niederfrequente Felder oder entsprechende Pulse können also auf diese Weise nicht entstehen [Challis 2005, Foster u. Repacholi 2004].

Dies schließt allerdings keine *biologische* Demodulation aus. Diese würde dann erfolgen, wenn beispielsweise jeder Puls eines GSM-Signals für sich eine biologische Reaktion auslöst. 217 mal in der Sekunde würde dann die entsprechende Signalkette angestoßen. Ähnlich könnten sich auch Amplitudenschwankungen des Feldes als niederfrequente Schwankungen einer biologischen Reaktion manifestieren. Wenn dies zufällig der Frequenz der Schwingung einer biochemischen Reaktion entspricht, könnte sich diese aufschaukeln [Glaser 1992]. Im Unterschied zu der Wirkung physikalisch demodulierter Felder wirkt jedoch hier nicht ein elektrischer 217-Hz-Puls, oder die Umhüllende einer Amplitudenschwankung, sondern die Hochfrequenz selbst.

Bedenkt man, dass jedes Wellenpaket eines GSM-Pulses etwa eine Millionen Schwingungen enthält, also  $10^6$  Einzelereignisse, die jedes für sich eine molekulare Wirkung ausüben könnten, dann ist der Puls bezüglich des biophysikalischen Primäreffektes nicht anders zu behandeln als ein kontinuierliches Feld. Gibt es keinen Wirkungsmechanismus eines kontinuierlichen Feldes entsprechender Intensität und Frequenz, dann kann es auch keine biologische Modulation einer Pulsfolge geben, vorausgesetzt, man bezieht sich auf den SAR-Wert des Pulses selbst und nicht auf das zeitliche Mittel der Pulsfolge.

Übrigens hat kürzlich ein Vorschlag von Q. Balzano, mögliche Demodulationen von HF-Feldern in biologischen Systemen elektronisch nachzuweisen [Balzano 2002], zu einer kontroversen Diskussion geführt

[Balzano 2003 a, b, Marino 2003, Adair 2003], die letzten Endes zeigte, dass trotz Einsatz von Hochqualitäts-Resonatoren („high-Q-quality“) diese Methode am thermischen Rauschen scheitert.

## 2. Biophysikalische Mechanismen nicht-thermischer Einwirkung

### 2.1 „Ionisierende“ und „nicht-ionisierende“ Strahlung

Elektromagnetische Wellen und Strahlen überstreichen ein weites Spektrum, ausgehend von den niederfrequenten Schwingungen des industriellen Wechselstroms, über die Hochfrequenz der elektronischen Nachrichtenübertragung zur Wärmestrahlung, Licht, bis hin zu Röntgen und Gammastrahlen. Dieses Spektrum kann als Abfolge verschiedener Frequenzen, Wellenlängen oder auch Quantenenergien dargestellt werden. Diese drei Parameter sind durch Naturkonstanten ineinander umrechenbar. Je nach Fragestellung interessiert die eine oder die andere Eigenschaft. Um z. B. zu klären, ob die Schwingungen in der Lage sind, Nerven oder Muskeln zu erregen, betrachtet man ihre Frequenz. Interessiert man sich für die Frage, wie wirksam die Körperlänge eines Versuchstieres oder des Menschen als HF-Antenne sein könnte, so ist die Wellenlänge von Interesse. Bei einer Diskussion darüber, wie die Schwingung am Molekül angreifen könnte, ist wiederum die Quantenenergie der Strahlung von Bedeutung.

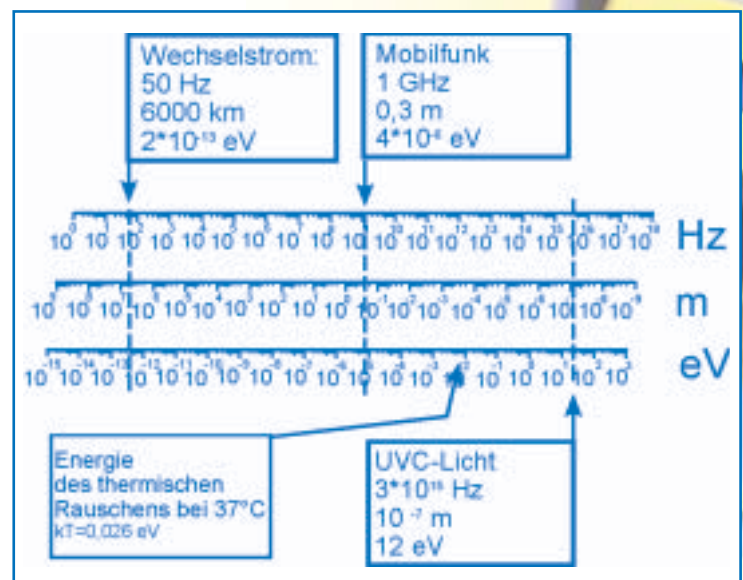
Die Quantenenergie ist also ein Qualitätsmaß einer elektromagnetischen Strahlung, genau wie Frequenz und Wellenlänge, und darf nicht mit ihrer Intensität verwechselt werden. Zur Veranschaulichung sei an ein Hagelwetter gedacht. Die Quantenenergie wäre dann vergleichbar mit der kinetischen Energie der einzelnen Hagelkörner, die sich aus ihrer Größe und Geschwindigkeit ergibt. Die Intensität der Strahlung, in der Physik als Flussdichte oder Strahlungsleistungsdichte bezeichnet, würde dann der Intensität des Hagelschlags entsprechen, also etwa der Anzahl der Hagelkörner, die pro Sekunde einen Quadratmeter Fläche treffen. Die Entscheidung darüber, ob der Hagel einen Apfel vom Baum schlagen kann, wird nicht durch die Dichte des Hagelschlags, sondern durch die Energie der einzelnen Hagelkörner bestimmt. Es sind große Hagelkörner nötig, um einen fest sitzenden Apfel abzuschlagen.

Diese Überlegung führt uns zu der wichtigen Grenze zwischen dem Bereich der „ionisierenden“ und der „nicht-ionisierenden“ Strahlung. Es ist mindestens eine Quantenenergie von 12 eV (Elektronenvolt) erforderlich um eine kovalente chemische Bindung zu brechen, d. h. aus einem Molekül ein Ion zu machen. Diese Grenze wird im „harten“ UV-Licht erreicht. Bei den noch kurzwelligeren Röntgen- und Gammastrahlen steigt die Quantenenergie weiter an und erreicht Werte von Millionen Elektronenvolt (MeV) und mehr. Auf diesem Mechanismus basiert die Wirkung ionisierender Strahlung. Jedes einzelne absorbierte Energiequant kann prinzipiell zum Bruch einer chemischen Bindung führen, im ungünstigsten Fall zum Bruch eines DNA-Stranges. Dies erfolgt auch tatsächlich ständig durch den Einfluss natürlicher Radioaktivität im Körper, durch Höhenstrahlung etc. Der Organismus schützt sich davor durch ein nahezu perfektes System von Reparaturmechanismen. Trotzdem erhöht jede zusätzliche Bestrahlung die Wahrscheinlichkeit einer molekularen Störung, die dem Reparatursystem entgangen ist, und die sich als Krebsgeschwulst oder Missbildung äußert. Deshalb gibt es für die ionisierende Strahlung keinen Schwellenwert. Die Grenzwerte sind vielmehr an der natürlichen Strahlenbelastung orientiert und liegen im Sicherheitsabstand darunter. Da sich genetische Defekte akkumulieren können, ist ferner nicht nur die Intensität der Strahlung von Bedeutung, sondern zusätzlich ihre Dauer bzw. das Integral der Dosis über die Lebenszeit. Der Hinweis auf die Besonderheiten der Dosimetrie ionisierender Strahlung ist erforderlich, weil leider immer wieder unkritisch aus diesem Bereich auf nicht-ionisierende Strahlen extrapoliert wird. Wie aus Abb. 1 ersichtlich, liegt bei den hochfrequenten Feldern des Mobilfunks die Quantenenergie um das Millionenfache unterhalb der 12-eV-Grenze. Der Bruch eines DNA-Moleküls ist deshalb nicht möglich. Wenn auch diese Aussage der Boltzmann-Statistik unterliegt, d.h. Wahrscheinlichkeitscharakter hat, so wird sie doch dadurch gestützt, dass die Stabilität der DNA selbst den Stößen der thermischen Bewegung standhält, deren Energie etwa tausendfach unter der 12-eV-Grenze, aber immerhin noch ebenso weit über der des Mobilfunks liegt.

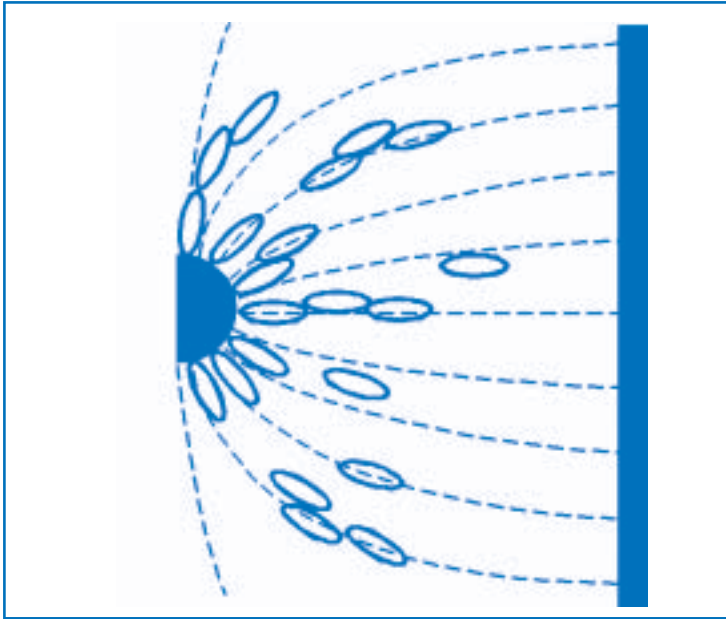
Das Postulat, auch die Wirkung der HF-Felder des Mobilfunks hätte keinen Schwellenwert und ihre Grenz-

werte müssten folglich auf das Niveau unterhalb der Feldstärke der „Spherics“, der atmosphärischen Schwingungen, abgesenkt werden, entbehrt damit jeder Grundlage. Gleichermäßen ist die Annahme nicht haltbar, unterschwellige Effekte, z. B. die ständige, aber sehr schwache Exposition einer Person durch eine nahe Basisstation könnten sich im Laufe der Zeit akkumulieren.

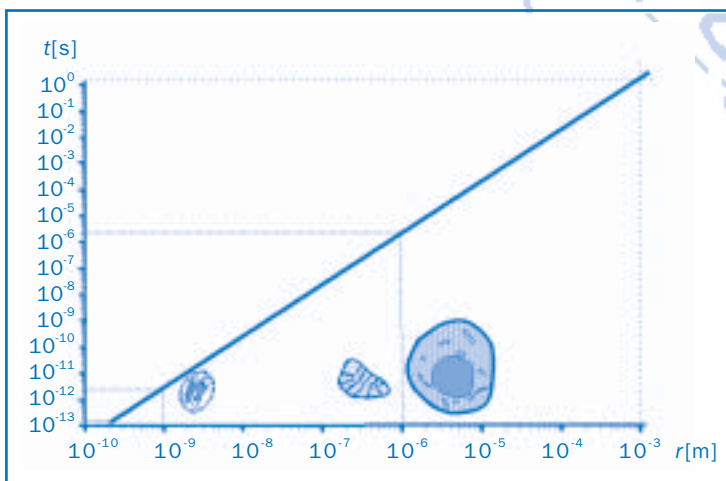
Andererseits erlauben es diese theoretischen Betrachtungen nicht, das Auftreten von DNA-Schäden generell auszuschließen. Auch wenn die Quantenenergie der nichtionisierenden Strahlung nicht ausreicht, DNA-Strang-Brüche direkt zu erzeugen, so ist doch prinzipiell denkbar, dass sie einen Einfluss auf die Reparaturprozesse haben könnte. Die Wahrscheinlichkeit des



**Abb. 1: Die Qualität elektromagnetischer Schwingungen lässt sich als Frequenz [Hz], Wellenlänge [m] oder auch Quantenenergie [eV = Elektronenvolt] angeben. Diese drei Größen sind durch Lichtgeschwindigkeit und Planck'sche Konstante ineinander umrechenbar. Das Spektrum, von den langwelligen Schwingungen des industriellen Wechselstroms über die Frequenzen des Mobilfunks zum Licht, UV und letztlich den Röntgen- und Gamma-Strahlen, umfasst viele Zehnerpotenzen. Exemplarisch sind für Wechselstrom, Mobilfunk und UVC-Licht die Parameter angegeben. Bei den 12 eV dieses harten UV-Lichtes liegt die Grenze zu den „ionisierenden“ Strahlen, die hier nicht verzeichnet sind. Zusätzlich ist die Energie von 0,026 eV angegeben, welche das thermische Rauschen charakterisiert, d.h. die durchschnittliche Energie, mit der sich bei 37 °C die Moleküle thermisch bewegen.**



**Abb. 2: Die dielektrophoretische Sammlung von Hefezellen in einem inhomogenen elektrischen Wechselfeld, das zwischen einer abgerundeten (links) und einer flächigen (rechts) Elektrode ausgespannt wird. In Lösungen geringer Leitfähigkeit bündeln die Zellen das Feld, erhöhen die lokale Inhomogenität desselben und ziehen sich dadurch gegenseitig an. Je nach Frequenz und dielektrischen Eigenschaften kann die Dielektrophorese positiv (Bewegung in Richtung hoher Feldstärke) oder negativ (entgegengesetzte Bewegung) sein (nach Glaser 2000).**



**Abb. 3: Charakteristische Zeit der Temperaturänderung (t in Sekunden) kugelförmiger Körper mit unterschiedlichem Radius (r in Meter) nach dem Modell von Foster [1997]. Angegeben sind die Größenordnungen von Makromolekülen, Mitochondrien und Zellen.**


Auftretens nicht-reparierter Schäden durch natürliche Strahlung, so genannter „spontaner“ Mutationen, könnte auf diese Weise erhöht werden. Hier muss das Experiment entscheiden, das allerdings bisher keine Effekte dieser Art reproduzierbar nachgewiesen hat [Vijayalaxmi and Obe, 2004, 2005, Challis 2005].

## 2.2 Nichtthermische Effekte starker hochfrequenter Felder

Wenngleich die Quantenenergie der HF-Felder des Mobilfunks bei weitem nicht ausreichen chemische Bindungen zu brechen, so übt doch ihr elektrischer Vektor zweifellos Kräfte auf geladene und polarisierbare Strukturen aus. Schon frühzeitig wurde festgestellt, dass sich Hefe- und andere Zellen unter dem Einfluss elektrischer Wechselfelder kettenförmig aneinander lagern. In stark inhomogenen Feldern findet eine Bewegung statt, die man, ist sie in Richtung höherer Feldstärke gerichtet, als positive, anderenfalls als negative Dielektrophorese bezeichnet (Abb. 2) [Pohl 1978]. Ursache dafür ist die Polarisierung der Zellen durch das externe Feld. Da sich verschiedene Komponenten der Zelle mit unterschiedlichen Zeitkonstanten polarisieren lassen, ergeben sich komplizierte Frequenzspektren positiver und negativer Dielektrophorese.

Erzeugt man mit speziellen Elektrodensystemen rotierende Felder, so folgen mit gewisser Verzögerung die induzierten Dipole dieser Rotation. Es entsteht eine resultierende Kraft, welche zu einer Rotation der Zellen führt. Diese als „Elektrorotation“ [Glaser and Fuhr 1986] bezeichnete Methode erlangte einige Bedeutung in der modernen Biotechnologie.

Dielektrophorese und Elektrorotation sind entsprechend der unter Pkt. 1.5 angeführten Definition echte „nicht-thermische“ Effekte, haben sie doch ihrer Natur nach nichts mit Wärme zu tun. Sie erfordern allerdings Feldstärken von über 10 kV/m, was zu einer starken Wärmeentwicklung führt, die durch Thermostatierung begrenzt werden muss. Die Feldintensität liegt damit um viele Zehnerpotenzen über den gesetzlichen Grenzwerten. Dieses Phänomen wäre folglich für die in diesem Beitrag zu behandelnde Problematik uninteressant, wäre nicht nachgewiesen, dass Gewebszellen unterschiedlicher Art in ihrer normalen Entwicklung selbst durch diese extrem starken Felder auch nach vielstündiger Applikation nicht be-



einflusst werden [Fuhr et al. 1994]. Anderenfalls wäre ihr Einsatz in der Biotechnologie als Methode der Zellmanipulation nicht möglich.

### 2.3 Modelle zur Erklärung nicht-thermischer Effekte im Frequenz- und Intensitätsbereich des Mobilfunks

Überschlagsmäßige Berechnungen zeigen, dass Einflüsse hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf Ionen und Dipole in biologischen Strukturen verschwindend klein sind, vergleicht man sie mit dem thermischen Rauschen des Systems [Taylor 1981, Pickard u. Moros 2001, Adair 2002, Foster u. Repacholi 2004, Challis 2005]. Auch wenn es kein spezielles Sinnesorgan für diese Strahlen gibt, so sollte man dennoch spezielle Mechanismen der Verstärkung oder Rauschunterdrückung in Zelle und Organismus nicht von vornherein ausschließen. Zahlreiche Möglichkeiten wurden diesbezüglich in den letzten Jahrzehnten erwogen und durchgerechnet. Wir werden hier allerdings lediglich solche Hypothesen diskutieren, die sich auf mögliche Wirkungen hochfrequenter Felder beziehen. Wie bereits erwähnt, münden prinzipiell alle Prozesse der Energieabsorption letztlich in einer Erwärmung des Systems. Die Frage lautet demnach zunächst: Gibt es molekulare Veränderungen, die unmittelbar in irgend eine biologische Signalkaskade einmünden, gleichgültig, ob dies zu einem biologischen Effekt führt, der letztlich kompensiert wird oder ob irgendwelche gesundheitlich relevanten Konsequenzen daraus resultieren könnten? Prinzipiell lassen sich die vorgeschlagenen Modelle einteilen in solche, die eine additive Wirkungssteigerung vorsehen, solche, die von einer Verstärkung durch sich aufschaukelnde Oszillationen ausgehen und schließlich jene, die das Ereignis in einen molekularen Bereich verlagern, in dem es einem reduzierten thermischen Bombardement ausgesetzt ist. Zunächst wäre zu fragen, ob nicht wenigstens Wasserstoff-Brückenbindungen beeinflusst werden könnten, deren Energie um das 10 - 20-fache schwächer ist als jene kovalenter Bindungen, wenn man gleichzeitig postuliert, dass es auch Multiphotonen-Anregungen durch die Quanten der GHz-Strahlung gäbe. Auf den ersten Blick ist jedoch zu sehen (Abb. 1), dass eine Vervielfachung der  $4 \cdot 10^{-6}$  eV der GHz-Schwingung diese auch einem um das 20-fache reduzierten 12 eV-Grenzwert nicht signifikant näher bringt.

Pickard und Moros [2001] wiesen zudem nach, dass dieser Mechanismus für die Mobilfunk-Problematik auch deshalb auszuschließen sei, weil Multiphotonen-Übergänge dem Frequenzbereich des Lichtes, höchstens noch der Wärmestrahlung, vorbehalten sind.

Zu einem ähnlichen Schluss kommt auch Prohofsky [2004]. Er betrachtet eine mögliche Beeinflussung intra-molekularer Bewegungen biologischer Makromoleküle, also Vibrationen, oder Rotationen von Bindungen mit biologischer Relevanz durch die hochfrequenten Schwingungen von GHz-Feldern. Denkbar wären beispielsweise Einflüsse auf Prozesse biologischer Energieübertragung. Könnten sich nicht vielleicht Schwingungen von Ladungen und Dipolen in biologischen Makromolekülen durch hochfrequente Wechselfelder allmählich aufschaukeln und dabei Energie akkumulieren? Diesem Verhalten widersprechen zwei Umstände. Zum einen liegen die Frequenzen dieser Prozesse um das Hundert- bis Tausendfache über denen des Mobilfunks. Für Myoglobin berechnet Prohofsky z. B. eine akustische Eigenresonanz bei 240 GHz und auch für ein DNA-Molekül kommt er nicht weit darunter. Dies macht eine direkte Kopplung bei der Frequenzen außerordentlich uneffektiv. Zum anderen verhindert die Dämpfung ein solches Aufschaukeln, verursacht durch die umgebenden Wassermoleküle.

Letzteres ist ein Umstand, der prinzipiell gegen alle Hypothesen spricht, die auf dem Resonanzprinzip beruhen. Prominentes Beispiel dafür ist die viel diskutierte Theorie kohärenter Erregung („coherent excitations“) von H. Fröhlich [Fröhlich 1980, Fröhlich u. Kremer 1983]. Diese Vorstellung setzt die strenge Orientierung der Dipole funktioneller Membranproteine im statischen Feld der Zellmembran voraus, das unter physiologischen Bedingungen Werte von  $10^7$  V/m erreicht. Dadurch ist ein kohärentes Verhalten möglich. Sind diese Proteine außerdem funktionell ausgelenkt, so lassen sich Schwingungen voraussagen, die mit einem äußeren Feld im Frequenzbereich von mehr als 10 GHz in Resonanz geraten könnten (Nähere Erläuterung siehe Haberland 1999). Vorausgesagt wurden scharfe Resonanzbereiche, die man ursprünglich sogar bei wachsenden Hefezellen glaubte nachweisen zu können [Grundler u. Keilmann 1983, 1989]. Diese Resultate haben sich jedoch in Folge nicht bestätigt [Gos et al. 1997, 2000]. Unbestätigt blieben auch andere Experimente, bei denen entsprechende

Resonanzen vermutet wurden [Jelinek et al. 1996, 2005, Hadjiloucas et al. 2002].

Wie bei Prohofsky [2004], so ergaben auch die Berechnungen anderer Autoren [Foster u. Baish 2000, Pickard u. Moros 2001, Adair 2002, 2003, Challis 2005], dass bedingt durch die wässrige Umgebung der Biomoleküle jede induzierte Oszillation sofort abgedämpft wird, so dass es zu keiner resonanten Aufschaukelung und damit Energie-Akkumulation kommen kann. Ein von Astumian vorgeschlagenes Ratschen-Modell [Astumian 1997, 2003], das allerdings vorwiegend für den niederfrequenten Bereich gedacht ist, scheitert an dem Umstand, dass einmal absorbierte Energie schneller wieder dissipiert, als sie sich durch einen neuen Akt der Absorption addieren könnte.

Eine Reihe von allerdings nicht reproduzierbaren Experimenten lenkte in den 80-er Jahren die Aufmerksamkeit auf die Rolle des Kalziums in möglichen Mechanismen der Wirkung sowohl nieder- als auch hochfrequenter Felder. Angeblich lösen Felder von 147 MHz, die speziell mit 16 Hz amplitudenmoduliert sind, in Hirn-Schnitten von Hühnern Kalzium-Signale aus und damit eine Kaskade biologischer Folgereaktionen [Bawin et al. 1978]. Diese Befunde sind sicher falsch, denn, abgesehen von methodischen Fehlern, konnten sie trotz vieler Bemühungen anderer Laboratorien nie reproduziert werden [Merrit et al. 1982, Cranfield et al. 2001]. (Leider werden diese Resultate bis heute mitunter immer noch unkritisch zitiert [Westerman u. Hocking 2004, Stevens 2004, Weinberger u. Richter 2002].)

Diese Kalzium-Hypothese führte jedoch damals zu theoretischen Überlegungen über mögliche Mechanismen. A. Chiabrera zeigte an Hand quantenmechanischer Berechnungen, dass auch geringe Quantenenergien ausreichen könnten, um im rauscharmen hydrophoben Bereich der Kalzium-Bindungsstellen entsprechender Rezeptorproteine bestimmte Effekte hervorzurufen, insbesondere, wenn diese metabolisch ausgelenkt sind [Chiabrera et al. 2000]. Ein anderes Modell stammt von J. C. Thompson, der kooperative Effekte in quasikristallinen Strukturen der Membran für möglich hält [Thompson et al. 2000]. Letztlich erlauben alle diese Modelle jedoch keine konkreten Aussagen über Schwellenwerte und konnten auch experimentell nicht bestätigt werden (Kritik dieser und ähnlicher Modelle siehe: [Adair 2006]).


## 3. Thermische Reaktionen und ihre Besonderheiten

### 3.1 Thermische Effekte bei intensiver Exposition durch HF-Felder

Wie eingangs erwähnt, ist die Erwärmung biologischer Gewebe unter dem Einfluss hochfrequenter Felder seit über 100 Jahren bekannt und wird unter der Bezeichnung Diathermie- bzw. Hyperthermie-Behandlung als Therapie genutzt. Die dabei verwendeten Frequenzen werden entsprechend der gewünschten Eindringtiefe variiert. Dabei geht man nicht von spezifischen Effekten der Felder aus, hat solche bisher auch nicht gefunden, sondern nutzt einfach die therapeutische Wirkung der Wärme. Natürlich werden dabei Feldintensitäten verwendet, die weit über denen liegen, die bei Mobiltelefonen auftreten können [Wust et al. 2002]. Ein seit langem bekanntes und experimentell gut untersuchtes Phänomen ist das Hören gepulster Hochfrequenzfelder [Frey 1961, Foster u. Fynch 1974, Chou et al. 1985, Lin 2002, Elder u. Chou 2003]. Ursache dieses Phänomens ist eine pulsierende Erwärmung von „hot spots“ im Kopf, was zu thermoelastischen Dehnungen und dem Entstehen von Druckwellen führt, die schließlich im Innenohr als Schall wahrgenommen werden. Für diesen Effekt sind jedoch Leistungsdichten erforderlich, die weit oberhalb der Grenzwerte liegen. Die Intensität der Pulse des Mobiltelefons reicht dafür nicht aus.

### 3.2 „Hot spots“ und mikrothermische Effekte

Schon in den 30er und 40er Jahren des vergangenen Jahrhunderts hat man sich Gedanken darüber gemacht, ob im heterogenen Dielektrikum biologischer Systeme nicht vielleicht Orte höherer Erwärmungen entstehen könnten [Rajewsky 1938]. Strukturen unterschiedlichen Ionen- und Wassergehalts und damit unterschiedlicher Impedanz, wie etwa Knochen und Muskelgewebe, aber auch geladene Oberflächen oder unterschiedlich polarisierbare Makromoleküle wie Proteine und Lipide, absorbieren frequenzabhängig die HF-Felder in unterschiedlicher Weise. Tatsächlich muss bei diesen Vorgängen jedoch nicht nur die Energieaufnahme betrachtet werden, sondern ebenso die Wärmeableitung. In den Organen des Körpers wird dieses im Allgemeinen durch den Blutkreislauf reguliert [Foster et al. 1998, Foster u. Erdreich 1999]. Für künstliche Systeme, etwa Fetttropfchen in Wasser,



oder Wassertröpfchen in Öl, kann man Gleichungen ansetzen, welche die Wärmeableitung über die Oberfläche berücksichtigen, die bekanntlich relativ zum Volumen mit kleiner werdendem Radius größer wird. Setzt man am Modell einer Kugel die Geschwindigkeit einer Erwärmung durch Energieabsorption in Relation zur Abkühlung, so erhält man für die charakteristische Zeit der Temperaturveränderung eine Funktion, die umgekehrt proportional zum Quadrat des Radius verläuft (Abb. 3). Während eine 1 mm große Kugel noch eine Zeitkonstante der Temperaturveränderung von wenigen Sekunden aufweist, liegt dieser Wert bei einer 1 Mikrometer großen Struktur nur noch im Mikrosekundenbereich und fällt dann schnell weiter ab. Entsprechend wird auch die stationäre Temperaturdifferenz immer kleiner. Daraus wird geschlossen, dass es echte „hot spots“, also Regionen erhöhter Temperatur durch selektive Erwärmung im elektromagnetischen Feld, nur im Maßstab anatomischer Strukturen geben kann. Mikroskopische Bereiche unterschiedlicher dielektrischer Eigenschaften gleichen ihre Temperatur zu schnell mit der Umgebung ab [Schäfer u. Schwan 1943, Foster 1997, Foster et al. 1998, Foster u. Erdreich 1999, Laurence et al. 2003, Foster u. Glaser 2006].

Unter diesem Aspekt ist auch die Hypothese von J. L. Kirschvink zu betrachten. Dieser Autor verweist auf das Vorkommen von Ferrit-Kristallen in der Größenordnung von 50 nm, die er glaubt in verschiedenen Geweben, so auch im Gehirn des Menschen, wenn auch in sehr geringer Konzentration nachgewiesen zu haben [Kirschvink et al 1992]. Diese Strukturen, den Magnetiten der Magnetobakterien ähnelnd, macht er im niederfrequenten Bereich unmittelbar für die Wirkung schwingender Magnetfelder, im hochfrequenten hingegen für Orte mikroskopischer Erwärmung verantwortlich [Kirschvink et al 1996]. Abgesehen davon, dass das Auftreten dieser Magnetite selbst noch nicht sicher nachgewiesen ist, sind sie nach der oben genannter Abschätzung zu klein, um tatsächlich effektiv zu sein [Challis 2005].

Diese Ansätze gründen allerdings auf phänomenologischen Parametern, wie Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit. Selbst die Temperatur ist physikalisch nur für „große“ Systeme definiert und kann in molekularen Dimensionen höchstens als „effektiver“ Parameter betrachtet werden (zu „effektiven“ Para-

metern in der Biophysik siehe Glaser 1996, 2000). Im Bereich einzelner Moleküle, und in Hinblick auf die Verstärkerprozesse molekularer Reaktionen in biologischen Systemen, löst sich der Temperaturbegriff in ein komplexes Geschehen von Vibrationen und Schwingungen auf und muss mit anderen Ansätzen bearbeitet werden. Dies knüpft an die Berechnungen von E.W. Prohofsky an, die im Abschnitt 2.3. erwähnt wurden [Prohofsky 2004].

Da sich auch die technische Chemie für die Möglichkeit interessiert, chemische Prozesse durch HF-Felder zu beeinflussen, gibt es eine Vielzahl von Publikationen aus dieser Sicht, die das Bild komplettieren. Einige Studien beschäftigen sich auch mit der Möglichkeit mikrothermischer Beeinflussung biochemischer Reaktionen [Nölting 1998, Bohr u. Bohr 2000, Coptly et al. 2005]. Kürzlich konnte nachgewiesen werden, dass es unter dem Einfluss von HF-Feldern zu einer Monomerisierung des normalerweise als Dimer vorkommenden Enzyms Acetylcholin-Esterase kommen kann [Barteri et al. 2005]. Ein interessantes Experiment wurde an einem kleinen synthetischen DNA-Molekül durchgeführt, dem man einen 1,4 nm großen Goldkristall kovalent angeheftet hatte. Durch Felder im Frequenzbereich von 1 GHz gelang es, dieses Molekül selektiv thermisch zu aktivieren [Hamad-Schifferli et al. 2002].

Diese Publikationen zeigen, dass die Diskussion zum Thema selektiver thermischer Anregungen von Makromolekülen durch HF-Felder noch im Fluss ist und weitere Beachtung verdient.

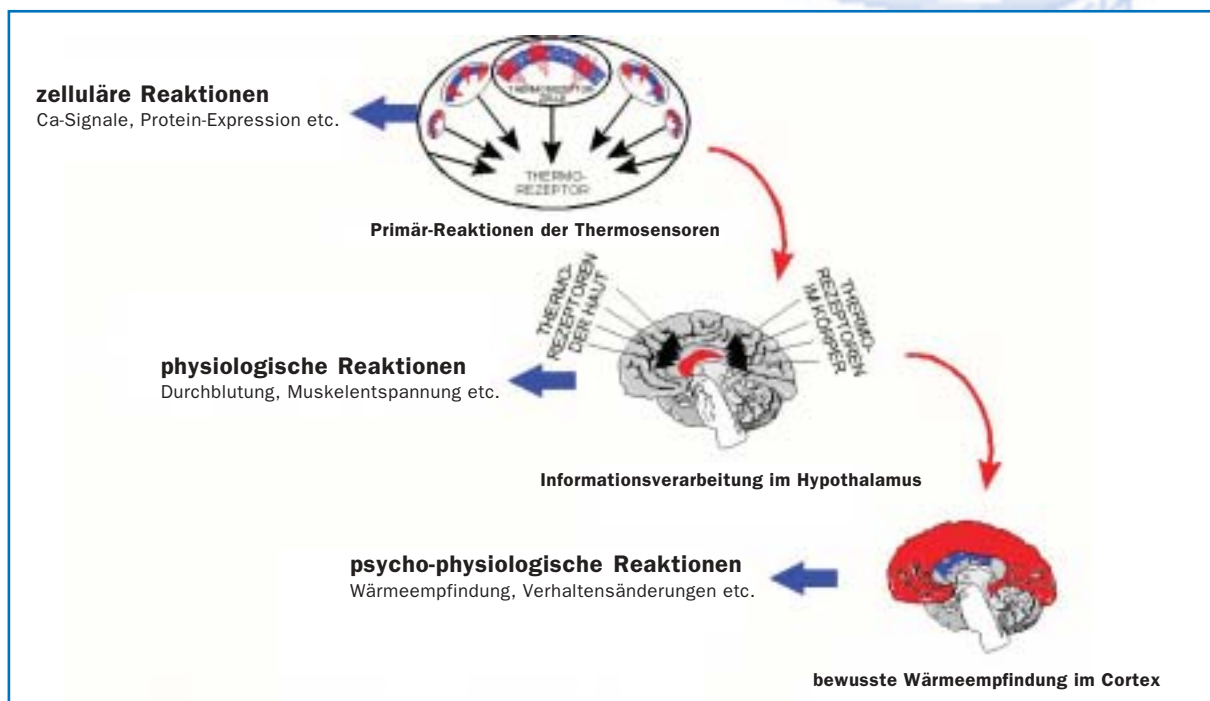
### 3.3 Thermische Effekte und molekulare Thermometer

Bei der Diskussion zu Definitionen „nicht-thermischer“ Effekte (Abschn. 1.5) wurde die Empfindlichkeit biologischer Thermorezeption erwähnt. Seit langem kennt man im Tierreich Thermorezeptoren, deren Empfindlichkeit offenbar noch unterhalb von 0,01 Grad liegt [Harris u. Gamow 1971, Neuweiler 2003, Schmitz u. Trenner 2003]. Auch Thermorezeptoren der menschlichen Haut weisen Empfindlichkeiten von weniger als 0,1 °C auf [Hendler et al. 1963, Glaser 2005, Foster u. Glaser 2006]. Sie liegen allerdings etwa 0,2 mm tief im Gewebe. Dadurch sind sie gegen eine schnell wechselnde Erwärmung von außen abgepuffert, nicht jedoch gegen thermische Einflüsse von HF-Feldern.


Erst im letzten Jahrzehnt ist man dem Problem molekularer Mechanismen biologischer Temperaturmessung etwas näher gekommen. Bisher sind zwei völlig unterschiedliche Arten biomolekularer Thermometer bekannt. Zur einen Klasse gehören thermosensible RNA-Schalter („Riboswitches“), die besonders in Bakterien gefunden wurden. In verschiedenen Modifikationen sorgen diese für eine temperaturregulierte Expression bestimmter Proteine, u.a. auch der im Bereich der Wirkung von HF-Feldern immer wieder diskutierten Hitzeschockproteine [Lai 2003, Grimshaw et al. 2003, Narberhaus et al. 2006]. Die zweite Kategorie bilden spezielle Transportproteine in der Membran vieler Zellen, die zur Gruppe der TRP-Kanäle („transient receptor potential“) gehören [Xu 2002, Watanabe et al. 2002, Benham et al. 2003, Brauchi et al. 2006]. Die Besonderheit dieser Makromoleküle liegt darin, dass sie jeweils in einem kleinen Temperaturbereich von wenigen Grad eine definierte Strukturänderung erfahren, die ihre Funktion verändert. Während sich

die Geschwindigkeit normaler chemischer und biochemischer Reaktionen bei einer Temperaturerhöhung von 10 Grad etwa um das Zweifache erhöht, erreicht dieser, als  $Q_{10}$ -Koeffizient bekannte Faktor, bei diesen Molekülen im Übergangsbereich Werte zum Teil bis über 20. Die entsprechenden Zellen enthalten viele solcher Moleküle unterschiedlicher Art, die jeweils verschiedene Temperaturbereiche abdecken. Ihre Konformationsänderung löst biologische Informationskaskaden aus, die sich bereits in jeder einzelnen Zelle und darüber hinaus über die vielen Zellen eines Thermorezeptors mitteln. Dies stellt offenbar einen effektiven Mechanismus der Rauschunterdrückung dar.

Wie in Abb. 4 dargestellt, muss man sich die biologische Thermorezeption als ein mehrstufiges System der Informationsverarbeitung vorstellen. Die thermische Veränderung vieler Moleküle bestimmt die Reaktion einer einzigen thermosensiblen Zelle. Viele Zellen bedienen dann einen Thermorezeptor. Viele Ther-



**Abb. 4: Schematische Darstellung der Thermorezeption, ausgehend von den molekularen Rezeptoren der Membran, die sich sowohl in Zellen der Haut als auch in solchen im Inneren des Körpers befinden, über die Verarbeitung der Information im Hypothalamus bis zur bewussten Wärmeempfindung als Reaktion des Großhirns. Auf jeder Stufe erfolgt eine Auswertung mit möglichen Konsequenzen auf der entsprechenden Ebene. So sind bei geringer lokaler Erwärmung viele Reaktionen möglich, ohne dass eine bewusste Wärmeempfindung folgt [nach Glaser 2005].**



morezeptoren wiederum, sowohl in der Haut als überall im Körper, senden ihre Impulse zum neuronalen Zentrum der Thermoregulation im Hypothalamus. Von dort aus wird gegebenenfalls ein Signal an das Großhirn weitergeleitet und erst dann als Wärme- oder auch Kälteempfindung bewusst.

Entscheidend ist jedoch, dass auf allen Stufen des Systems bereits Reaktionsketten ausgelöst werden können, ohne dass das Signal auf der nächst höheren Stufe als „relevant“ gewertet wird. Spezielle Protein-Expressionen könnten eingeleitet werden, Durchblutungsänderungen induziert etc., ohne dass eine Wärmeempfindung bewusst wird.

Geht man nun davon aus, dass eine Diathermie-Erwärmung des biologischen Systems durch HF-Felder andersartig ist als eine Erwärmung von außen oder durch körperliche Aktivitäten von innen, also etwa das Schwitzen beim Laufen, so kommt man unmittelbar auf die eingangs zitierte Feststellung aus dem Jahre 1946 zurück, wonach es sich bei der Wirkung starker HF-Felder auf den Menschen um „eine primär elektrische Allgemeinerwärmung des gesamten Organismus [handelt], die ohne thermometrisch grob nachweisbar zu sein, die Regulation vor eine eigentümliche Aufgabe stellt.“ [Schaefer u. Stachowiack 1946]. Unter diesem Aspekt werden auch Resultate verständlich, die als schwer reproduzierbare „nicht-thermische“ EEG-Änderungen publiziert wurden, oder als Effekte, die man durch verschiedene Psychotests ermittelte [Huber et al. 2002, Krause et al. 2000, 2004, 2006, Loughran et al. 2005, Curcio et al. 2005, u.a.]. Offensichtlich bedeutet die – wenn auch geringfügige – Erwärmung des Gewebes durch ein Handy am Ohr eine geringe Beeinflussung des thermoregulatorischen Systems. Natürlich ist diese Reaktion vom physiologischen Zustand des Organismus abhängig und in der Messung deshalb unzuverlässig. Letztlich unterscheidet sie sich jedoch prinzipiell nicht von andersartigen Erwärmungen und ist deshalb als unbedeutende Alltagsreaktion zu verstehen (Näheres zu diesem Aspekt siehe [Glaser 2005]).

#### 4. Schlussfolgerungen

Die hier dargestellten Sachverhalte lassen sich in folgenden Thesen zusammenfassen:

- Trotz jahrzehntelanger Bemühungen gibt es bisher keine biophysikalisch vertretbare Vorstellung über

eine mögliche nicht-thermische Wirkung hochfrequenter Felder im Intensitätsbereich gültiger Grenzwerte. Da auch experimentell derartige Wirkungen bisher nicht zweifelsfrei nachgewiesen wurden, können sie mit einiger Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

- Wiederholt gemessene, allerdings schwer reproduzierbare Effekte neuronaler Aktivitäten unter dem Einfluss von Feldern des Mobilfunks, die von Experten zudem als gesundheitlich unbedenklich gewertet werden, sind als „Alltags-Reaktionen“ auf lokale Erwärmungen zu betrachten. Dabei spielen offenbar auch lokale Reaktionen von Thermorezeptoren eine Rolle, die zu lokalen Durchblutungsänderungen führen können.
- Eine *physikalische* Demodulation amplitudenmodulierter oder gepulster HF-Felder im GHz-Bereich, also die Entstehung entsprechend niederfrequenter elektromagnetischer Schwingungen, ist in biologischen Systemen nicht vorstellbar und auch nicht nachgewiesen. Eine *biologische* Demodulation, also eine periodische niederfrequente Anregung eines biologischen Signalsystems, würde eine Primärwirkung voraussetzen, die jedoch im ersten Punkt der Schlussfolgerung ausgeschlossen wird.
- Da im Bereich geltender Grenzwerte ausschließlich thermische Einflüsse hochfrequenter Felder zu erwarten sind, erscheint trotz aller Kritik der SAR-Wert als brauchbares Maß für die wirksame Dosis. Im Gegensatz zur Wirkung ionisierender Strahlung muss im Frequenzbereich des Mobilfunks von einem Schwellenwert der Wirkung ausgegangen werden. Da es keinen Hinweis auf eine Akkumulation thermischer Wirkungen gibt, erscheint die Einführung einer zeitlichen Integration der Energieabsorption als Dosis-Größe unbegründet.
- Forschung erscheint notwendig, um die theoretisch postulierte Möglichkeit sub-thermischer Effekte auf molekularem Niveau zu belegen. Unter Nutzung etablierter Modelle von Molekular-Thermometern („Riboswitches“, TRP-Transportern und anderen thermosensiblen Molekülen), eventuell auch spezieller Thermorezeptoren von Tieren, sollte die HF-Wirkung gezielt untersucht werden.

Roland Glaser, Prof. em. Experimentelle Biophysik,  
Institut für Biologie an der Humboldt-Universität Berlin