

Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder

Biological Effects of Electromagnetic Fields

J. Bernhardt

Institut für Radiologie, Krankenhausstr. 12, D-8520 Erlangen

Z. Naturforsch. 34 c, 616 – 627 (1979); eingegangen am 18. April 1979

Electromagnetic Fields, Thermal Effects, Nonthermal Effects, Central Nervous System, Current Densities

This résumé deals with thermal and nonthermal effects of electromagnetic fields on man. In consideration of two aspects a limitation is necessary. Firstly, there will be discussed only direct and immediate influences on biological cells and tissues, secondly, the treatment is limited to such phenomena, for which biophysical approximations, based on experimental data, could be developed.

Hazards for the human being may occur only by thermal effects within the microwave range. Regarding frequencies below approximately 30 kHz, excitation processes cannot be excluded in exceptional cases. Thermal effects are predominant, between 30 kHz and 100 kHz, before excitations can appear.

Furthermore, by comparing the electrically and magnetically induced currents with the naturally flowing currents in man caused by the brain's and heart's electrical activity, a "lower boundary-line" was estimated. Regarding electric or magnetic field strengths undercutting this boundary-line, direct effects on the central nervous system may be excluded; other mechanisms should be responsible for demonstrated biological effects.

The paper closes referring to some reports — presently discussed — on experimental findings of biological effects, which were observed as a result of the influence of electromagnetic fields of small field strengths.

Diese Übersicht beschreibt die Ergebnisse der Forschung auf dem Gebiet der Wechselwirkung elektromagnetischer Felder mit biologischen Systemen. Es werden thermische und nichtthermische Wirkungen beschrieben. Dabei wird nicht auf jeden in der Literatur beschriebenen biologischen Effekt eingegangen, sondern es erfolgt eine Beschränkung auf solche biologische Wirkungen, für die datengestützte biophysikalische Modellvorstellungen entwickelt werden konnten. Es soll herausgearbeitet werden, daß im Hinblick auf den Menschen bei bestimmten Frequenzen und Feldstärken gewisse grundsätzliche biophysikalische Mechanismen auftreten können, andere aber unmöglich sind. Zusätzlich sind in Kapitel VI einige Berichte über biologische Wirkungen bei geringen Feldstärken aufgenommen, die gegenwärtig diskutiert werden, deren Wirkungsmechanismen jedoch noch ungeklärt sind.

Der hier behandelte Bereich des elektromagnetischen Spektrums gehört zu den sogenannten nichtionisierenden Strahlen, der Wellenlängen größer als etwa 100 nm (12,4 eV) umfaßt. Bei etwa 12,5 eV liegt

die Elektronenablösearbeit für Sauerstoff (O_2), die Mindestenergie für eine Ionisierung der Luft (N_2 : 14,5 eV). Jedoch läßt sich eine exakte Abgrenzung zur ionisierenden Strahlung sowie der einzelnen Strahlenarten untereinander in den meisten Fällen nicht durchführen. Bei der Einwirkung von Strahlung mit kürzeren Wellenlängen kommt es zu Anregungen und Ionisationen von Atomen sowie zum Bruch von chemischen Bindungen, da die Bindungsenergie zwischen 2 und 5 eV liegt. Das ist der Grund für die unspezifische Wirkung der ionisierenden Strahlen. Diese Übersicht befaßt sich jedoch hauptsächlich mit dem Mikro- und dem Radiowellenbereich sowie mit niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern. Als Radiowellenbereich wird dabei der Frequenzbereich von 30 kHz (Wellenlänge 10 km) bis 300 GHz (Wellenlänge 1 mm) betrachtet, wobei der kurzwellige Teil dieses Bereiches, etwa 300 MHz bis 300 GHz (1 m bis 1 mm), als Mikrowellenbereich bezeichnet wird. Zu noch kürzeren Wellenlängen schließt sich der Infrarotbereich an.

Bei der Einwirkung von Mikrowellen und Radiowellen auf den Menschen können Gefahren einerseits aus einer direkten Einwirkung auf Zellen und Organe entstehen, andererseits können diese Strah-

Sonderdruckanforderungen an Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Dr. med. habil. Jürgen H. Bernhardt.

0341-0382/79/0700-0616 \$ 01.00/0



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

len aber auch indirekt oder mittelbar gefährlich werden. Eine mittelbare Gefährdung kann durch Berührung elektrisch leitender Gegenstände, in denen Spannungen erzeugt werden, oder durch Einwirkung auf elektronische oder nichtelektronische Hilfen für Körperfunktionen entstehen. Hier soll nur die direkte Wirkung auf biologisches Material besprochen werden.

Im Mikro- und Radiowellenbereich wird die Strahlung in biologischer Materie dadurch wirksam, daß Schwingungs- und Rotationsniveaus bei Molekülen angeregt werden, im langwelligen Bereich wird Energie auf freie Ladungen und auf Dipole übertragen. Die Folge sind elektrische Ströme, die zu einer Wärmeentwicklung führen können. Im niederfrequenten Bereich des Spektrums können diese Ströme überwiegend zu einer Erregung von Nerven- und Muskelzellen führen. Diese biologischen Wirkungen werden bereits seit langem für Therapiezwecke genutzt.

I. Elektrische Eigenschaften von biologischem Gewebe

Eine Berechnung der Absorption elektromagnetischer Strahlung in biologischem Material setzt die Kenntnis der elektrischen Eigenschaften von Zellen und Gewebe voraus. Diese hängen wesentlich ab von den Eigenschaften der biologischen Membranen, des Gewebewassers und der biologischen Makromoleküle. Abb. 1 zeigt die frequenzabhängigen Werte für die Dielektrizitätskonstante ϵ und den spezifischen Widerstand ρ von Muskelgewebe [1–3].

Mit zunehmender Frequenz nimmt die Dielektrizitätskonstante ϵ um etwa 6 Dekaden, der spezifische Widerstand ρ um etwa 2 Dekaden ab. Charakteri-

stisch sind drei Hauptdispersionsbereiche, α , β und γ , für die verschiedene Mechanismen verantwortlich sind. Jede Dispersion ist durch eine einzige Relaxationszeit (gestrichelte Kurve in Abb. 1) oder durch ein Spektrum von Relaxationszeiten charakterisiert. Aufgrund der Untersuchungen von Cole und von Schwan weiß man relativ gut Bescheid über die verschiedenen Relaxationsmechanismen.

Die γ -Dispersion kommt durch die Dipolrotation des freien Wassers zustande. Die β -Dispersion ist eine Maxwell-Wagner-Relaxation, die durch Ladungsvorgänge an Grenzflächen, in diesem Fall Membranen, verursacht wird. Zwischen der β - und γ -Dispersion gibt es noch sekundäre Dispersionsbereiche, die nicht immer deutlich zu sehen sind. Diese entstehen aus Maxwell-Wagner-Relaxationen subzellulärer Komponenten sowie aus Dipolrotationen biologischer Makromoleküle — wie Proteine — und der des an Proteinen gebundenen Wassers. Die α -Dispersion schließlich wird auf ein Relaxationsverhalten von Zellmembranen zurückgeführt, das seine Ursachen in Ladungsverschiebungen innerhalb oder auf Zellmembranen haben kann.

II. Zur thermischen Belastung des Menschen

Zunächst soll auf die thermischen Wirkungen eingegangen werden. Dabei ist der Mikrowellenbereich wegen seiner Bedeutung für Radaranlagen bisher am besten untersucht worden. Es sei an dieser Stelle besonders auf die Übersichtsarbeiten [4–15] verwiesen.

Für eine höchstzulässige Dauerexposition des Menschen durch Mikrowellenstrahlung gilt in den sogenannten westlichen Ländern nach wie vor der Grenzwert von 10 mW/cm^2 für die Leistungsfluß-

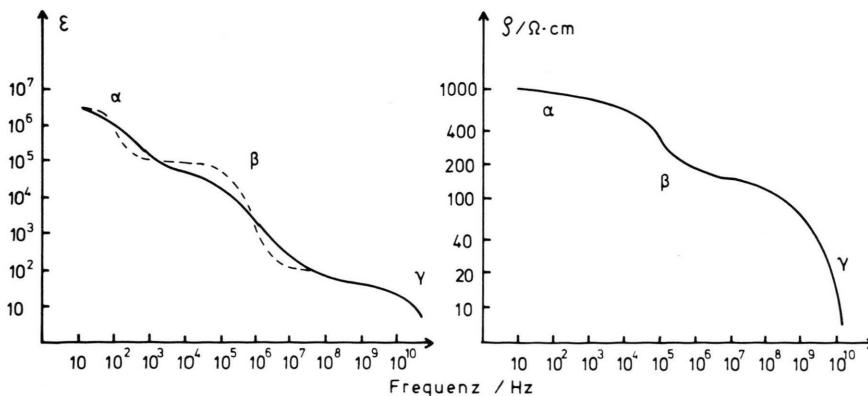


Fig. 1. Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten ϵ und des spezifischen Widerstandes ρ von Muskelgewebe (nach Schwan [1]).

dichte. Dieser Grenzwert ist zuerst von Schwan aufgrund elementarer Überlegungen über die thermische Belastung des Menschen formuliert worden. Dabei wird der Grundumsatz beim Menschen betrachtet, der einer Leistungsproduktion von etwa 80 Watt entspricht. Rechnet man diesen Wert auf die durchschnittliche Leistungsproduktion bezogen auf 1 cm^3 Gewebe um, so ergibt sich ein Wert von etwa 1 mW/cm^3 Gewebe. Die gleiche thermische Belastung kann man auch mit einem hochfrequenten Strom erzeugen, wenn die Gewebestromdichte 3 mA/cm^2 beträgt. Der Mikrowellenstandard von 10 mW/cm^2 entspricht — vorausgesetzt, die Strahlung wird voll absorbiert und auf den ganzen Körper verteilt — ebenfalls einer Wärmeproduktion von etwa 1 mW/cm^3 .

Da die Energieproduktion des Menschen schon bei leichter Tätigkeit um ein Vielfaches steigt, scheint der gegenwärtig akzeptierte Mikrowellenstandard aufgrund dieser Überlegungen vernünftig zu sein. Diese recht groben Abschätzungen sind durch biophysikalische Modellüberlegungen ergänzt worden, auf die im folgenden eingegangen wird.

III. Thermische Wirkungen

III.1 Eindringtiefen und Wärmequellenverteilungen

Mit der Kenntnis der dielektrischen Gewebe-eigenschaften kann man — etwa für ebene Modelle

— die Eindringtiefe von Mikrowellen und die produzierten Wärmemengen berechnen [4].

Als Beispiel zeigt Abb. 2 (nach Schwan) die Eindringtiefen für wasserreiches Gewebe, und zwar einmal für Gewebe mit hohem Proteingehalt (Augenlinsenmaterial) und zum anderen für niedrige Proteingehalt (Glaskörperflüssigkeit). Die meisten biologischen Organe mit hohem Wassergehalt — zum Beispiel Leber und Muskel — liegen zwischen den beiden Kurven. Unter Eindringtiefe versteht man hier die Weglänge, bei der die Strahlungsintensität auf $1/e$ abnimmt. Die Eindringtiefe nimmt zunächst langsam ab mit zunehmender Frequenz. Bei 1 MHz ist sie 20 bis 30 cm, bei 1 GHz 1 bis 3 cm. Zu noch höheren Frequenzen hin gibt es dann einen steilen Abfall, und Mikrowellen über 10 GHz verhalten sich praktisch wie Infrarot. Für Gewebe mit geringem Wassergehalt — wie Knochen und Fett — sind die Eindringtiefen etwa 3 bis 5 mal höher und abhängig vom Wassergehalt. Es gilt allgemein: je höher der Wassergehalt ist, desto kleiner ist die Eindringtiefe. Aber immer ist es so, daß die Eindringtiefe für Frequenzen oberhalb von 10 GHz sehr klein ist.

Im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz spielt auch die Wahrnehmbarkeit für Wärme eine Rolle; sie ist nur bei hohen Frequenzen gegeben, wo es zu großen Temperaturgradienten in der Haut kommt. Es muß hier darauf hingewiesen werden, daß manche Tiere eine sehr viel tiefere Wahrnehmbarkeits-

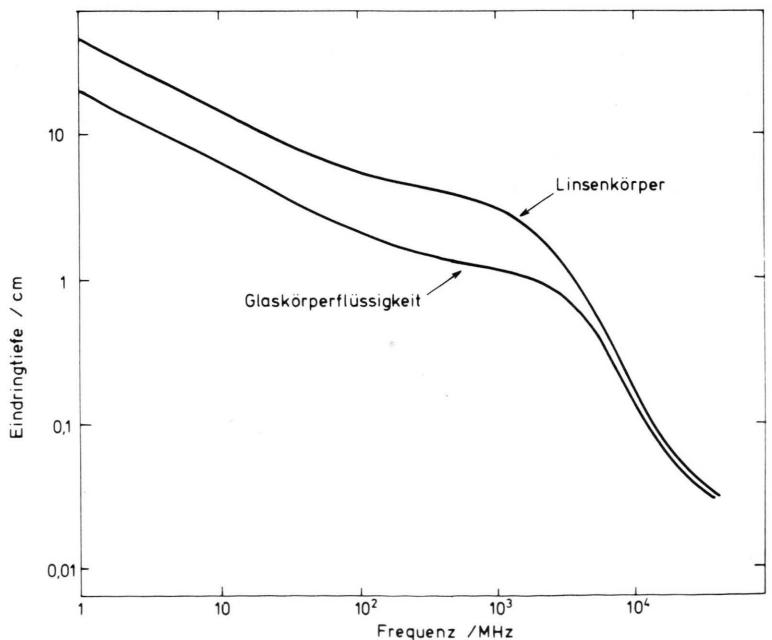


Fig. 2. Eindringtiefen als Funktion von der Frequenz für Gewebe mit hohem Proteingehalt (Linsenkörper) und für niedrigen Proteingehalt (Glaskörperflüssigkeit). Die meisten biologischen Gewebe mit hohem Wassergehalt liegen zwischen den beiden Kurven (nach Schwan [6]).

schwelle für Wärme besitzen. Das muß bei der Extrapolation von Tierversuchen auf den Menschen berücksichtigt werden.

Bei der Berechnung der Wärmeproduktion hat sich gezeigt, daß verhältnismäßig einfache Modellüberlegungen die gemessenen Daten ausgezeichnet wiedergeben. Natürlich hat man auch komplizierte Mehrschichtenmodelle durchgerechnet, wobei der Mensch durch Kugel-, Ellipsoid- und Zylindermodelle approximiert und auch die Polarisationsrichtung des elektrischen und magnetischen Feldvektors im Vergleich zum Phantommodell variiert wurde. Für die Praxis des Strahlenschutzes ist dabei wichtig, daß etwa 20 bis 100% der einfallenden Mikrowellenenergie absorbiert und in Wärme umgesetzt werden. Ein Absorptionsquerschnitt von 1/2 bis 1 im gesamten Mikrowellenbereich bedeutet, daß man für Strahlenschutzzwecke mit einem Meßgerät im Strahlungsfeld messen darf.

Die Verteilung der Wärmequellen im Menschen in Abhängigkeit von der Tiefe hängt allerdings in komplizierter Weise davon ab, wie dick die Haut ist, wie dick das Unterhautfettgewebe ist, wie die Frequenzen sind usw. Solche Rechnungen sind bereits in den dreißiger Jahren durchgeführt worden, und zwar im Hinblick auf die Entwicklung von Geräten für die Diathermie. Da hier umfangreiche Literatur vorliegt (siehe Schriftum ref. [4]), soll als Beispiel nur die Wärmeerzeugung in Kugelmodellen besprochen werden.

Kritikos und Schwan [16, 17] haben das sogenannte Wärmepotential (erzeugte Wärmemenge pro Volumeneinheit) in Abhängigkeit von der Frequenz für Kugeln mit dielektrischen Eigenschaften wie Gewebe berechnet. Dabei sind Wärmeleitung, Blutzirkulation und eine Mehrschichtung nicht berücksichtigt. Man hat sich gefragt, wo in der Kugel die größte Wärmeerzeugung stattfindet. Dabei ergibt sich, daß für große Kugeln (Radius = 10 cm) die maximale Erwärmung immer an der Frontseite der Kugel stattfindet, und zwar ist sie – bis auf kleine Abweichungen – vergleichbar mit der Fronterwärmung eines ebenen Modells. Bei kleinen Kugeln sehen die Verhältnisse völlig anders aus. Bei einer Kugel mit einem Radius von 5 cm ist für Frequenzen zwischen 300 MHz und 3 GHz die Innenerwärmung höher als die Oberflächenerwärmung. Insbesondere tritt bei etwa 1 GHz ein sogenannter „Hot Spot“ auf, das heißt, innerhalb der Kugel gibt es einen Volumenbe-

reich, der etwa 4 bis 5mal so warm wird wie die Oberfläche eines ebenen Modells.

Geschichtete Modelle führen zu ähnlichen Ergebnissen. Das bedeutet praktisch, daß zum Beispiel Katzen (R klein) bei kritischen Leistungsflußdichten empfindlicher reagieren können als Menschen. Das bedeutet aber auch, daß man wiederum vorsichtig sein muß, wenn man von Tierversuchen auf den Menschen extrapoliieren will.

Von der neueren Literatur über Messungen und Berechnungen von Wärmequellenverteilungen sei hier noch auf [8] und [18 – 22] hingewiesen.

III.2 Einfluß von Blutzirkulation und Wärmeleitung

Die aus der Energieabsorption resultierende Temperaturerhöhung zeigt einen charakteristischen Verlauf [4, 23]. Bei Dauerexposition gibt es zunächst einen linearen Temperaturanstieg, der nach etwa 5 bis 6 Minuten infolge Wärmeleitung und Blutzirkulation einem Endwert zustrebt. Der Einfluß der Zirkulation ist jedoch ein nichtlineares Phänomen, das heißt, es kommt nach 15 bis 20 Minuten zu einer Gefäßerweiterung, die zu einer besseren Durchblutung und zur Kühlung führt. Schlecht durchblutete Organe – wie zum Beispiel die Augen – sind daher stärker gefährdet.

Der lineare Anstieg der Temperaturerhöhung für kurze Expositionszeiten hat eine wichtige Konsequenz für den Strahlenschutz im Mikrowellenbereich. Für kleine Zeiten ist nicht mehr die Leistungsflußdichte der Strahlung die maßgebende Größe, sondern die insgesamt verabreichte „Dosis“, das heißt, das Produkt aus Leistungsflußdichte und Zeit.

III.3 Vorkommende Leistungsflußdichten

Zum Abschluß der thermischen Überlegungen soll noch auf die Werte für die Leistungsflußdichten eingegangen werden, die in der Praxis vorkommen.

Leistungsflußdichten bis 1000 mW/cm² werden therapeutisch lokal angewendet, bei 100 mW/cm² liegen die Schwellenwerte für beobachtete Schäden – wie etwa die Bildung von Katarakten.

Um einen Faktor 10 unter diesem Wert liegt der Mikrowellenstandard für berufliche Strahlenexposition in den westlichen Ländern (vor allem wichtig für Radaranlagen). Trotz detaillierter Erkenntnisse in den letzten Jahren hat sich dieser Sicherheitsstandard bis heute bewährt.

Angaben von Leistungsflußdichten werden jedoch sinnlos bei Überlagerung mehrerer Mikrowellenfelder sowie im Nahfeldbereich. Auf die Problematik des Nahfeldbereiches wird immer hingewiesen (zum Beispiel [24, 25]). Als Strahlenschutzgrößen sind dann Werte für die elektrische und magnetische Feldstärke zu verwenden (s. auch Kapitel V).

Bei 5 mW/cm^2 liegt der Wert, der als Durchlaßstrahlung für Mikrowellenöfen zugelassen ist. Zwischen 1 und 10 mW/cm^2 sind gewisse subtile Effekte nachgewiesen, die aber nicht gefährlich sind – zum Beispiel das Hören von pulsierenden Mikrowellen [26 – 29] und einige bedingte Reflexe bei Tieren [30]. Im letzteren Fall können jedoch der niedrige Grenzwert der Wärmeempfindlichkeit oder „Hot Spots“ die Ursache sein.

$10 \mu\text{W/cm}^2$ ist der Standard für Dauerexposition in der UdSSR. Für den Bereich zwischen $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ und 1 mW/cm^2 werden verschiedene Effekte beschrieben; insbesondere wird behauptet, daß dort nichtthermische Effekte auftreten und das Zentralnervensystem beeinflußt werden kann [13]. Jedoch gibt es für den Mikrowellenbereich und auch für den niederfrequenten Bereich des elektromagnetischen Spektrums eine Fülle von Berichten, die zum Teil nicht nachprüfbar sind oder in anderen Laboratorien unter den angegebenen Bedingungen nicht reproduzierbar sind. Die Erfahrung hat gezeigt, daß ein widerspruchsfreier Nachweis für einen Kausalzusammenhang zwischen einer charakteristischen Größe des elektromagnetischen Feldes und einer biologischen Wirkung beim Menschen insbesondere bei kleinen Feldstärken außerordentlich schwierig ist.

IV. Nichtthermische Wirkungen

Von den nichtthermischen Effekten sind felderzeugte Kräfte und felderzeugte Potentialdifferenzen am besten untersucht worden. Auf diese beiden Phänomene wird in diesem Kapitel ausführlicher eingegangen.

IV.1 Felderzeugte Kräfte

Bringt man biologische Zellen, etwa Erythrozyten, in Medien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit, so beobachtet man folgendes: Die Zellen können sich unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes (auch bei Mikrowellenstrahlung) orientieren, oder die Zellen können sich zu Ketten anordnen (Perlschnurket-

tenbildung). Ebenso kann es zu einer Teilchenbewegung im inhomogenen Feld kommen sowie zu Änderungen der Zellform oder zu einer Zytosplasmastömung [31 – 35]. Diese Effekte sind theoretisch gut untersucht [36 – 38]. Die Ursache ist eine Kraftwirkung des elektrischen Feldes auf Ladungsgruppen und Dipole in biologischen Systemen.

Von besonderer Wichtigkeit ist auch der Nachweis, daß gepulste Felder nicht wirksamer sein können als kontinuierliche Felder mit derselben mittleren Feldenergie [39].

Allen diesen Effekten gemeinsam ist, daß sie erst dann auftreten können, wenn die elektrische potentielle Energie eines Teilchens oder deren feldbedingte Änderung größer ist als die thermische Energie kT . Es gibt daher eine Schwellenfeldstärke, die erreicht werden muß, um den Effekt auszulösen. Die Schwellenfeldstärke hängt dabei nicht von der Frequenz ab – wie experimentell gezeigt werden konnte. Auf eine wichtige Schlußfolgerung soll kurz eingegangen werden [7].

Da die elektrische potentielle Energie proportional E^2 und dem Volumen V des betreffenden Teilchens ist, gilt für den Schwellenwert $E_{th}^2 \cdot V \approx a \cdot kT$, wobei die Konstante a von dem Effekt selbst, der Teilchenform und den elektrischen Eigenschaften des Teilchens und der Umgebung abhängt. Für einen bestimmten Effekt unter konstanten Bedingungen ergibt sich somit für die Schwellenfeldstärke (R : Radius des Teilchens): $E_{th}^2 \approx 1/R^3$. Diese Beziehung ist experimentell bestätigt. Die Schwellenfeldstärke im Gewebe für $10 \mu\text{m}$ große Teilchen beträgt etwa 10 V/cm , die für Makromoleküle von 100 \AA Durchmesser bereits 10 kV/cm . Dabei treten feldinduzierte Kräfte in Konkurrenz mit der durch Strahlung erzeugten Erwärmung.

Unter physiologischen Bedingungen und beim Menschen ist die elektrische Leitfähigkeit so hoch, daß bereits meßbare Wärmewirkungen auftreten, bevor die feldinduzierten Kräfte wirksam sind. Sie spielen daher bei Strukturen, die kleiner sind als ein normaler Zelldurchmesser, keine Rolle. Eine Denaturierung von Makromolekülen auf diese Weise ist nicht möglich, da die hierfür notwendigen Feldstärken zu hoch sind und die Wärmewirkung überwiegt. Auch eine häufig diskutierte Denaturierung von Makromolekülen infolge von Resonanzeffekten ist nicht möglich, weil das im biologischen Material stets vorhandene Wasser unterhalb von 100 GHz eine dämpfende Wirkung ausübt.

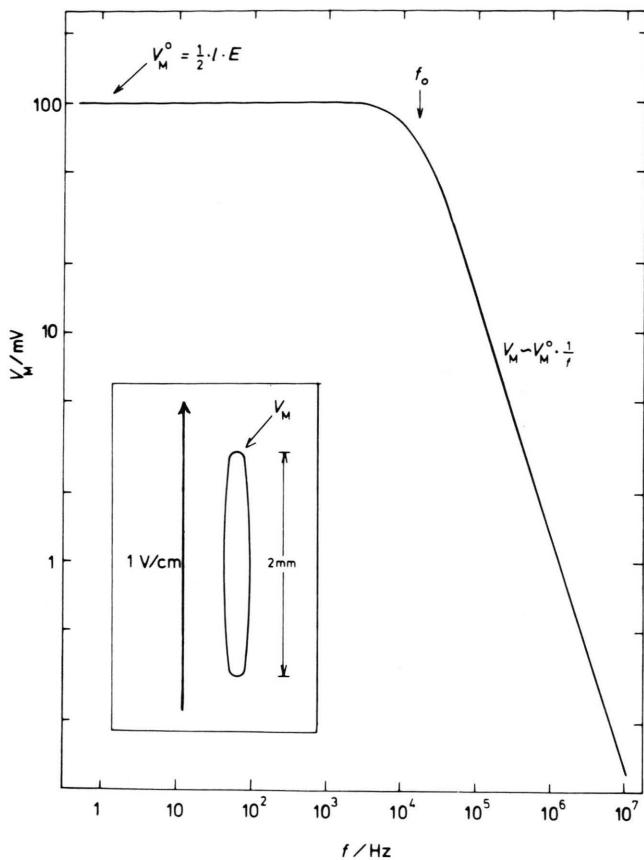


Fig. 3. Felderzeugtes Membranpotential (Maximalwert V_M) als Funktion von der Frequenz für eine biologische Zelle, die sich längs in einem äußeren elektrischen Feld befindet.

Bei Strukturen, die größer sind als $100 \mu\text{m}$, sind Kraftwirkungen nicht auszuschließen. Für 1 mm große Teilchen errechnet sich eine Schwellenfeldstärke von etwa 10 mV/cm . In diesem Zusammenhang ist in den letzten Jahren der Einfluß auf Mittelohrstrukturen diskutiert worden, um das Hörphänomen von pulsierenden Mikrowellen zu erklären. Andere Theorien führen allerdings diesen Effekt auf eine Druckwelle zurück, die durch eine wärmebedingte Ausdehnung eines Hot Spot-Bereiches zu stande kommt [27 – 29].

IV.2 Felderzeugte Potentialdifferenzen

Eine biologische Zelle besitzt eine elektrisch schlecht leitende Zellmembran, verglichen mit der Leitfähigkeit des Zellinnen- und -außenraumes. Daher muß die Zelle sich im elektrischen Feld wie ein Dipol verhalten, und dem normal vorhandenen Membranruhepotential überlagert sich eine zusätzliche frequenzabhängige Potentialdifferenz, die mit Hilfe der Potentialtheorie berechnet werden kann.

Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang langgestreckte, erregbare Zellen, die sich längs in einem elektrischen Feld befinden. Eine solche Situation zeigt Abb. 3.

Eine biologische Zelle (Länge $l = 2 \text{ mm}$) befindet sich längs in einem elektrischen Feld. Die Feldstärke in dem die Zelle umgebenden Gewebe beträgt 1 V/cm . Wichtig ist die Orientierung der Zelle. Das felderzeugte Membranpotential V_M erreicht seinen Maximalwert an den beiden Enden der Zelle. V_m ist mit zunehmender Frequenz zunächst konstant ($V_M^0 = 0,5 \cdot l \cdot E$) und fällt dann oberhalb einer bestimmten Frequenz steil ab. Diese charakteristische Frequenz hängt von der Geometrie der Zelle und von den elektrischen Daten ab ([40], siehe auch Schrifttum dort). In diesem Falle ergibt sich bei kleinen Frequenzen bis etwa 10 kHz eine Depolarisation um 100 mV , bei 1 MHz aber nur noch um 1 mV .

Im Mikrowellenbereich spielen feldinduzierte Potentialdifferenzen daher keine Rolle. Bei höheren

Werten für die Feldstärke im Zellaußenraum dominiert wiederum die Wärmewirkung aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit von biologischem Gewebe. Nur unter speziellen Laborbedingungen kann bei hinreichend niedrigen Frequenzen und hohen Feldstärkewerten die feldinduzierte Potentialdifferenz zum dielektrischen Durchbruch von Zellmembranen führen [41].

Für das in Abb. 3 angegebene Beispiel könnte eine Depolarisation von 100 mV jedoch ausreichen, um Nerven- oder Muskelzellen zu erregen. Um zu entscheiden, ob tatsächlich eine Reizwirkung stattfindet, muß man die bekannten Tatsachen aus der Nervenphysiologie berücksichtigen. Dabei kann die Frequenzabhängigkeit der Schwellenstromstärke für einen sinusförmigen Reizstrom, der zur Auslösung eines Aktionspotentials führt, herangezogen werden. Es ergibt sich je nach der Art der erregbaren Zelle ein Frequenzoptimum. Das ist auch vom Elektroanfall (siehe z. B. [42]) und von der Reizstromtherapie her bekannt.

Für sehr kleine Frequenzen tritt das für alle erregbaren Membranen charakteristische Phänomen der Akkommodation auf, ein sich Einschleichen langsamer veränderlicher Ströme. Es sind höhere Schwellenstromstärken notwendig, um die Zelle zu erregen. Andererseits muß durch die Zelle eine gewisse Mindestentladungsmenge fließen, um das Aktionspotential auszulösen. Diese Ladungsmenge kann während einer Sinushalbwelle für höhere Frequenzen nur

durch eine höhere Schwellenstromstärke erreicht werden. Deshalb nimmt die Schwellenstromstärke oberhalb des Frequenzoptimums mit zunehmender Frequenz zu.

Der Autor hat versucht, in einer einfachen Modellrechnung die äußeren Feldstärkewerte zu berechnen, die – abhängig von der Frequenz – zum Beispiel bei erregbaren Nervenzellen in der Hirnrinde des Menschen zu Aktionspotentialen führen ([43], siehe auch Kapitel V). Für dieses biophysikalische Modell müssen noch Aussagen über feldbedingte Stromdichten im Menschen gemacht werden und die beiden oben erwähnten Tatsachen – felderzeugte, frequenzabhängige Potentialdifferenzen an Zellmembranen sowie frequenzabhängige Schwellenwerte für die Membranstromstärken, die zur Erregung führen – berücksichtigt werden. Dabei ist der Niederfrequenzbereich von besonderem Interesse.

V. Feldbedingte Stromdichten und Folgerungen für eine direkte Feldwirkung für Frequenzen unter 30 MHz

Für viele Überlegungen über die Feldwirkung reicht es aus, den Menschen als elektrisch leitenden, gewebeäquivalenten Ellipsoid zu approximieren, der sich in einem elektrischen bzw. magnetischen Wechselfeld befindet bzw. einer elektromagnetischen Strahlung ausgesetzt ist. Beschränkt man sich dar-

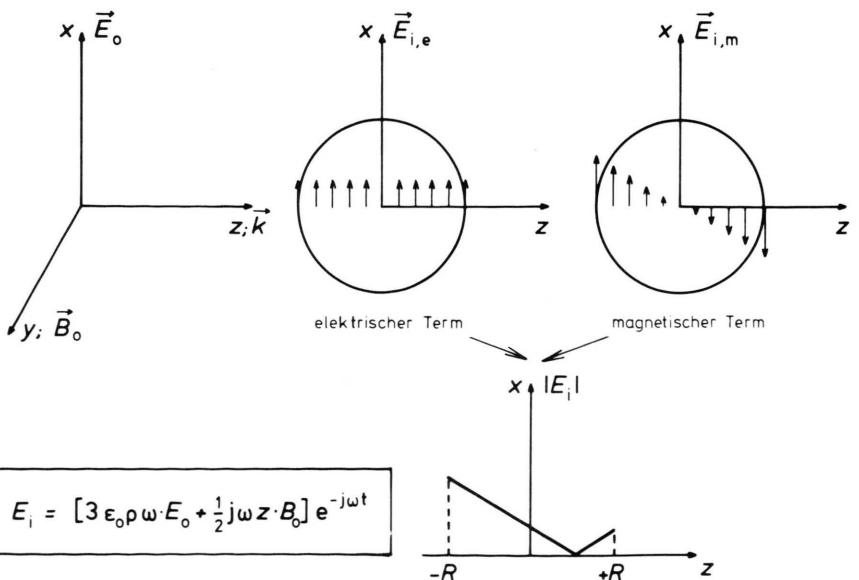


Fig. 4. Das elektrisch und magnetisch erzeugte elektrische Feld in einer Kugel bei der Einwirkung eines langwelligen elektromagnetischen Feldes mit den angegebenen Polarisationsrichtungen. Es ist hier nur der Spezialfall der feldinduzierten Feldstärken entlang der z-Achse betrachtet und dargestellt.

auf, die Größenordnung der äußeren Feldstärken anzugeben, die zum Beispiel zu Aktionspotentialen erregbarer Zellen im Menschen führen, so genügt sogar ein gewebeäquivalentes Kugelmodell.

Ausführliche Berechnungen von Feldstärken in Kugelmodellen in Abhängigkeit von äußeren Feldstärken und deren Frequenz findet man bei Lin *et al.* [44] (siehe auch [17] und [45]).

In einem hier betrachteten Spezialfall genügt es, Polarisationsrichtungen der äußeren Feldstärken wie in Abb. 4 zu betrachten und sich die feldinduzierten Feldstärken in der Kugel nur entlang der z -Achse anzusehen. Abb. 4 zeigt, wie die Lösungen aussehen. Für Frequenzen von unterhalb etwa 10 bis 30 MHz ergibt sich für die Feldstärke E_i in der Kugel die in Abb. 4 eingerahmte Beziehung (ρ ist der spezifische Widerstand des Materials der Kugel). Das elektrisch erzeugte E -Feld in der Kugel ist entlang der x -Achse polarisiert wie das äußere ungestörte E -Feld in großer Entfernung und ist dazu unabhängig von der Kugelgröße. Das magnetisch erzeugte E -Feld dagegen ist nur in diesem Spezialfall entlang der z -Achse

in x -Richtung polarisiert und hängt außerdem noch von der Kugelgröße ab.

Wichtig ist dabei, daß das gesamte Feld die additive Summe aus einem elektrischen und einem magnetischen Anteil ist. Das macht es möglich, den Einfluß beider Feldkomponenten zu trennen, weist aber auch darauf hin, daß im unteren Frequenzbereich sowohl das E -Feld als auch das H -Feld bekannt sein müssen, um Aussagen über biologische Wirkungen machen zu können.

Die Zahlenwerte zeigen, daß für Frequenzen unterhalb von 30 MHz und für Objekte von der Größe des Menschen, approximiert durch eine Kugel mit 25 cm Radius, das magnetisch erzeugte E -Feld – allerdings nur in den peripheren Bereichen der Kugel – bis zu einer Größenordnung größer sein kann als das elektrisch erzeugte E -Feld [44–46]. Das führt insgesamt zu einer recht komplizierten Stromdichteverteilung, die jedoch ihren Maximalwert in der Nähe der Frontoberfläche hat. Ausführliche Untersuchungen über die räumliche Verteilung des elektrischen Feldes und der absorbierten Ener-

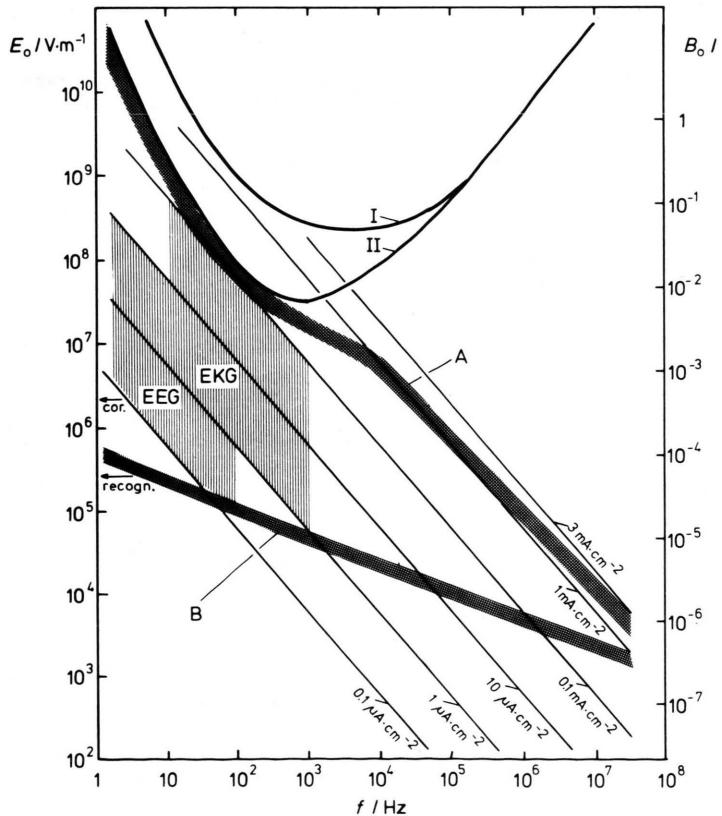


Fig. 5. Frequenzabhängigkeit von äußeren elektrischen und magnetischen Feldstärken, die zu den angegebenen elektrischen Stromdichten in einem gewebeäquivalenten Kugelphantom führen. Details siehe Text, ebenso für die Schwellenwertkurven I und II für Reizwirkung und für die Begrenzungslinien A und B.

gie in Kugeln, Ellipsoiden und in beliebigen Phantommodellen findet man in [17, 18, 20, 44, 47, 48].

Abb. 5 zeigt zunächst die Frequenzabhängigkeit von elektrischen Stromdichten, die in einem Kugelphantom durch eine äußere elektrische Feldstärke (linke Ordinate) erzeugt werden. Die sechs Geraden sind aus dem elektrischen Term der in Abb. 4 angegebenen Gleichung unter Verwendung der Beziehung für die Stromdichte $J_i = E_i / \rho_i$ berechnet worden. Dabei sind für Frequenzen über 10 kHz elektrische Gewebedaten von Schwan [1, 2] verwendet worden. Für Frequenzen unter 10 kHz sind die Geraden mit einer größeren Unsicherheit behaftet, da die Anisotropie der elektrischen Gewebeleitfähigkeit berücksichtigt werden muß [49 – 51].

Außerdem sind noch magnetische Feldstärken für die angegebenen Stromdichtewerte berechnet worden. Dabei wurde eine Kugel ($R = 25$ cm) mit elektrischen Eigenschaften wie Muskelgewebe zugrunde gelegt. Die angegebenen Werte B_0 für die äußere magnetische Induktion (rechte Ordinate in Abb. 5) beziehen sich nur auf die maximalen Stromdichten in peripheren Bereichen der Muskelkugel. Nur in diesem Fall sind (mit einer größeren Unsicherheit) die für den elektrischen Fall berechneten Geraden auch für die magnetisch erzeugten Stromdichten zu verwenden [43]. Weiter kann man zeigen, [43], daß die B_0 -Werte für die magnetisch erzeugten Stromdichten für periphere Bereiche eines menschlichen Kopfes (berechnet für $R = 7,5$ cm in einer Kugel aus Gehirnmaterial) etwa um eine Größenordnung größer sind als die für die gleichen maximalen Stromdichtewerte in einer Muskelkugel mit 25 cm Radius.

Mit Hilfe weiterer neurophysiologischer Daten [52 – 58] sowie mit den Frequenzabhängigkeiten für die felderzeugten Potentialdifferenzen und für die Schwellenstromstärken für Aktionspotentiale kann schließlich eine quantitative Beziehung zwischen dem Schwellenwert für eine Reizwirkung und der Gewebestromdichte bzw. der äußeren Feldstärke gewonnen werden [43].

Das Ergebnis für in Feldrichtung langgestreckte erregbare Nerven- oder Muskelzellen in einer gewebeäquivalenten Kugel ist ebenfalls in Abb. 5 dargestellt. Die Kurven I und II zeigen die Frequenzabhängigkeit der Schwellenwerte für die äußeren Feldstärken, die für die Auslösung von Aktionspotentialen notwendig sind, entweder in einer 1 mm langen Zelle (Kurve I) oder in einer 10 mm langen Zelle (Kurve II). Auffallend sind die astronomisch hohen

Werte für die so berechneten Schwellenwerte für die Feldstärken. So sind zum Beispiel die Feldstärkewerte unter einer 765 kV-Überlandleitung in der Größenordnung von etwa $10^4 \cdot \text{Vm}^{-1}$ [46].

Mit Hilfe des vorhandenen experimentellen Datenmaterials lassen sich die Kurven nur punktweise bestätigen. So können Ergebnisse von Reizversuchen mit Mikroelektroden im Zentralnervensystem herangezogen und entsprechend in Stromdichtewerte umgerechnet werden [54 – 57]. Vom Elektrounfall kennt man ebenfalls kritische Gewebestromdichten; es ergibt sich als untere Grenze etwa $0,1 \text{ mA/cm}^2$ (siehe zum Beispiel [42] und [59]). In Abb. 5 berührt die entsprechende Gerade bei etwa 100 Hz die Kurve II.

Das eingezeichnete obere breite Band ist eine Begrenzungslinie. Aufgrund des beschriebenen biophysikalischen Modells muß man davon ausgehen, daß für Werte der elektrischen Feldstärke – oder auch der Stromdichten –, die oberhalb dieser Grenzlinie liegen, eine Gefahr nicht ausgeschlossen werden kann. Diese mögliche Gefahr wird ausgelöst durch Reizwirkungen bei Frequenzen unterhalb etwa 10 bis 30 kHz und durch thermische Wirkungen oberhalb von 10 bis 30 kHz. Dabei sind oberhalb von 10 kHz ähnliche thermische Überlegungen durchgeführt worden wie im Mikrowellenbereich. Es ist die Stromdichte berechnet worden, welche dieselbe Wärmeproduktion erzeugt wie der Grundumsatz. Aufgrund der frequenzabhängigen Gewebeleitfähigkeit ergibt sich für den Mikrowellenbereich 3 mA/cm^2 , bei 10 MHz etwa 2 mA/cm^2 und bei 10 kHz etwa 1 mA/cm^2 . Normalerweise ist durch das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes eine Reizwirkung nicht möglich, da die notwendigen Feldstärken den Koronawert überschreiten (etwa $2 \times 10^6 \text{ V/m}$, [60, 61]). Ausnahmen sind denkbar, wenn etwa sehr lange Muskelzellen in den Extremitäten solchen Feldstärken ausgesetzt sind, zum Beispiel bei Technikern in Hochspannungsanlagen. Die eingezeichnete B_0 -Skala sollte nur für Aussagen über mögliche Gefährdungen in den Randbereichen einer muskeläquivalenten Kugel von 25 cm Radius benutzt werden.

Selbstverständlich muß davon ausgegangen werden, daß auch bei Feldstärken, die unter der eingezeichneten Grenzlinie A in Abb. 5 liegen, biologische Effekte auftreten können. Inwieweit solche nachgewiesenen Wirkungen zu einer Gefährdung

des Menschen führen können, muß im Einzelfall untersucht werden.

Hinsichtlich eines direkten Wirkungsmechanismus der Feldkomponenten etwa auf das Zentralnervensystem läßt sich folgende grundsätzliche Überlegung anstellen, deren Ergebnis ebenfalls in Abb. 5 dargestellt ist (vgl. auch [43] und Schriftum dort). Man kann die durch elektromagnetische, elektrische und magnetische Felder erzeugten Ströme verglichen mit den elektrischen Strömen, die natürlicherweise fließen, nämlich verursacht durch die elektrische Aktivität des Gehirns und des schlagenden Herzens. Diese Signale können bekanntlich als EEG von der Kopfhaut bzw. als EKG von der Körperoberfläche abgegriffen werden. Diese im menschlichen Körper stets vorhandenen Stromdichten sind in Abb. 5 schraffiert dargestellt.

Man kann nun den Schluß ziehen, daß bei künstlich erzeugten Stromdichten, die den gleichen Frequenzgehalt und die gleiche Größenordnung haben wie zum Beispiel die EEG-Ströme, ein Einfluß auf das Zentralnervensystem nicht ausgeschlossen werden kann. Diese Einflüsse sind möglicherweise meßbar, sicher aber nicht gefährlich. Man kann weiter den Schluß ziehen, daß es eine untere Grenze für Stromdichten und damit auch für die Feldstärken gibt, unterhalb der ein *direkter* Einfluß etwa auf das Zentralnervensystem ausgeschlossen werden kann.

Bei Frequenzen um 10 kHz und Stromdichten von der Größenordnung $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ist eine Wechselwirkung mit physiologischen Vorgängen denkbar (aber noch nicht bewiesen), die an Zellmembranen mit Zeitkonstanten von 0,1 msec ablaufen.

Eine Grenze für einen möglichen direkten Einfluß auf Nerven- und Muskelzellen soll durch die untere Grenzlinie B angedeutet werden. Das bedeutet nicht, daß biologische Effekte bei Feldstärken unterhalb dieser unteren Begrenzungslinie unmöglich sind. Möglicherweise handelt es sich in solchen Fällen um Wechselwirkungen von Feldern mit ausgedehnten Strukturen. Auf die Existenz von Wirkungsmechanismen zwischen elektrischen Feldern und räumlich ausgedehnten Strukturen – zum Beispiel bei der Elektrorezeption von einigen Fischarten – weist besonders Schwan [7] hin (vgl. auch Kapitel VI).

VI. Biologische Wirkungen bei kleinen Feldstärken

Es gibt eine Fülle von Berichten über biologische Effekte elektromagnetischer Felder, die bei kleinen

Feldstärken bzw. Leistungsdichten beobachtet worden sind (siehe zum Beispiel [30, 62–66, 88] sowie Schriftum dort). Nicht alle Arbeiten halten einer ernsthaften Kritik stand. Dieses Kapitel beschränkt sich daher lediglich auf einige Hinweise und Berichte über biologische Wirkungen bei kleinen Feldstärken, die gegenwärtig diskutiert werden. Viele der erwähnten experimentellen Befunde sollten jedoch durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.

Immer wieder zitiert werden Beobachtungen über Änderungen der Reaktionszeit durch Feldeinfluß (siehe z. B. in [66]). Auch bei höheren Feldstärken energietechnischer Felder wird eine Verkürzung der Reaktionszeit beobachtet (zum Beispiel [67]).

Zahlreiche Untersuchungen befassen sich mit möglichen Wirkungen extrem niederfrequenter elektrischer Felder mit Frequenzen um 10 Hz. In diesem Zusammenhang sind auch Versuche zu sehen, die eine Wirksamkeit der natürlichen atmosphärischen Impulsstrahlung (sog. Sferics) mit einer Impulsfrequenz von etwa 10 Hz nachweisen wollen. So hat zum Beispiel Jacobi [68, 69] eine Erhöhung der Thrombozytenadhäsivität bei künstlichen Sferics gefunden, die bei einer elektrischen Abschirmung des Kopfes der Versuchsperson nicht mehr nachweisbar war.

Eine direkte Wechselwirkung niederfrequenter Felder mit dem Zentralnervensystem vermutet auch Adey, Bawin und Adey [70–72] und in [66] stützen ihre Vermutung vor allem auf Beobachtungen, daß sowohl unter dem Einfluß von niederfrequenten elektrischen Feldern (6 bis 12 Hz) als auch bei 147 MHz-Feldern, amplitudenmoduliert mit 6 bis 20 Hz (0,1 bis 1 mW/cm²), Veränderungen der Kalzium-Ausscheidungsrate bei isolierten Hühner- und Katzengehirnen gefunden wurden.

Besonders zu erwähnen sind noch die sorgfältig durchgeführten Versuche von Wever (zum Beispiel [73, 74] sowie in [63, 66]). In einem speziellen Bunker wurde unter Ausschluß aller Zeitgeber die circadiane Periodik des Menschen untersucht. Einer von zwei gleichausgehenden Versuchsräumen war elektrisch und magnetisch abgeschirmt und mit Einrichtungen zur Erzeugung künstlicher elektromagnetischer Felder versehen. Wever stellte fest, daß schwache 10 Hz-Felder eine Verkürzung der circadianen Periode bewirken und daß das künstliche Feld „interne De-Synchronisation“ (Auseinanderweichen von Aktivitäts- und vegetativen Perioden) verhindert.

Im Hinblick auf mögliche Wirkungsmechanismen befindet man sich noch im Stadium der Spekulation. Jedoch scheint insoweit eine Übereinstimmung zu bestehen, daß – falls die berichtete Empfindlichkeit von Nervengewebe bestätigt wird – außerordentlich wirksame räumliche und zeitliche Integrationsmechanismen beteiligt sein müssen [7, 66].

Andererseits liegt für einen möglichen nichtthermischen Wirkungsmechanismus im kurzwelligen Mikrowellenbereich – abgesehen von felderzeugten Kräften – eine Modellvorstellung von Fröhlich vor. Fröhlich hat in mehreren Arbeiten (zum Beispiel [75 – 78] und in [66]) gezeigt, daß biologische Makromoleküle metastabile angeregte Zustände mit hohem Dipolmoment besitzen können, die zu longitudinalen elektrischen Schwingungen mit großer Reichweite bei Frequenzen von etwa 10^{11} Hz fähig sind. Es gibt einige experimentelle Befunde, die Fröhlich's Postulate zu bestätigen scheinen ([79, 80] und Literatur dort).

Erwähnt sei hier das Ergebnis von Mikrowellenbestrahlungen an wäßrigen Kulturen von Hefezellen [81]. Die Wachstumsrate zeigte bei etwa 42 GHz eine Frequenzabhängigkeit in Form von scharfen Resonanzen.

Die Übersicht sei abgeschlossen mit zwei zusätzlichen Bemerkungen.

Es wird immer wieder behauptet, daß einzelne natürliche luftelektrische Größen in der Umgebung des Menschen – wie geladene Partikel, statische und langsam veränderliche Felder, Sferics –, eine biologische Wirkung auf den Menschen haben. Reiter weist in einer kritischen Übersicht ([82] und Schriftum dort) darauf hin, daß nicht nur sich widersprechende Befunde vorliegen, sondern daß in diesem Zusammenhang auch der Mensch selbst starke statische bzw. sehr niederfrequente Felder erzeugt, während er sich in seiner täglichen Umgebung mit synthetischen Produkten bewegt. Biologische Effekte, die hieraus resultieren, sind hinreichend bekannt: etwa der unangenehme elektrische Schlag bei einer Entladung oder die Bewegung von Haaren – etwa auf dem Handrücken, wenn dort die elektrische Feldstärke höher ist als etwa 10^5 V/m (Erkennbarkeitschwelle).

Auf eine mögliche Gefährdung des Menschen durch eine mittelbare Einwirkung elektromagnetischer Felder wurde bereits in der Einleitung hingewiesen. Als Beispiel sei eine Beeinflussung von Herzschrittmachern durch Radarstationen oder Mikrowellenöfen herausgegriffen (zum Beispiel [83 – 87]). Hier kann man heute jedoch davon ausgehen, daß bei modernen implantierten Schrittmachern eine Gefährdung nicht gegeben ist, wenn die Leistungsflußdichten unterhalb von 10 mW/cm^2 bleiben.

- [1] H. P. Schwan, Advances in Biological and Medical Health Physics, Vol. V, p. 147 – 209 (J.H. Lawrence u. C. A. Tobias, Eds.), Academic Press, New York 1957.
- [2] H. P. Schwan, Biophysik 1, 198 – 208 (1963).
- [3] K. S. Cole, Membranes, Ions, and Impulses. Berkeley, University of California Press, California 1968.
- [4] H. P. Schwan, Therapeutic Heat and Cold, p. 63 – 125 (S. Licht, Ed.), Conn.: E. Licht, New Haven 1965.
- [5] H. P. Schwan, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-19, 146 – 152 (1971).
- [6] H. P. Schwan, IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-19, 304 – 312 (1972).
- [7] H. P. Schwan, Ann. N. Y. Acad. Sci. 103, 198 – 213 (1977).
- [8] C. C. Johnson u. A. W. Guy, Proc. IEEE 60, 692 – 718 (1972).
- [9] S. M. Michaelson, Ibid., 60, 389 – 421 (1972).
- [10] S. M. Michaelson, Amer. Ind. Hyg. Ass. J. 35, 766 – 784 (1974).
- [11] S. M. Michaelson et al. (Eds.), Fundamental and Applied Aspects of Nonionizing Radiation, Plenum Press, New York and London 1975.
- [12] S. M. Michaelson, Microwave and Radiofrequency Radiation. Document ICP/CEP 803, Copenhagen, WHO 1977.
- [13] P. Czersky et al. (Eds.), Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. Polish Medical Publishers, Warsaw 1974.
- [14] P. Czersky, Proc. IEEE 63, 1540 – 1544 (1975).
- [15] C. H. Dodge u. Z. R. Glaser, J. Microwave Power 12, 319 – 334 (1977).
- [16] H. N. Kritikos u. H. P. Schwan, IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-19, 53 – 58 (1972).
- [17] H. N. Kritikos u. H. P. Schwan, ibid., BME-22, 457 – 463 (1975).
- [18] B. S. Guru u. K.-M. Chen, IEEE Trans. Microwave Theroy Tech. MTT-24, 433 – 440 (1976).
- [19] K.-M. Chen u. B. S. Guru, ibid., MTT-25, 746 – 756 (1977).
- [20] C. C. Johnson et al., Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook. Interim Report SAM-TR-76-35, USAF School of Aerospace Medicine, Brooks AFB, Tx., 1976.
- [21] C. C. Johnson, C. H. Durney, P. W. Barber, H. Massoudi, S. J. Allen u. J. C. Mitchell, Radio Science 12, 57 – 59 (1977).
- [22] C. H. Durney et al., Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook. Interim Report SAM-TR-78-22, USAF School of Aerospace Medicine, Brooks AFB, Tx., 1978.
- [23] K. R. Foster, H. N. Kritikos u. H. P. Schwan, IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-25, 313 – 316 (1978).
- [24] S. J. Rogers, Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation. Symp. Proc. Med. College of Virginia, Richmond, Va., Rep. RRH/DBE 70-2, 222 – 232 (1969).

- [25] P. F. Wacker u. R. R. Bowman, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **MTT-19**, 178 – 187 (1971).
- [26] A. H. Frey, Aerospace Medicine **32**, 1140 – 1142 (1961).
- [27] A. W. Guy, C. K. Chou, J. C. Lin u. D. Christensen, Ann. N. Y. Acad. Sci. **247**, 194 – 215 (1975).
- [28] J. C. Lin, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **MTT-25**, 605 – 613 (1977).
- [29] J. C. Lin, ibid., **MTT-25**, 938 – 943 (1977).
- [30] A. S. Presman, Electromagnetic Fields and Life, Plenum Press, New York und London 1970.
- [31] A. A. Teixeira-Pinto, L. L. Nejelski, J. L. Cutter u. J. H. Heller, Exp. Cell Res. **20**, 548 – 564 (1960).
- [32] L. D. Sher, Mechanical Effects of AC Fields on Particles Dispersed in a Liquid. Biological Implications. Ph. D. Thesis, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pa., 1963.
- [33] A. A. Füredi u. I. Ohad, Biochim. Biophys. Acta **79**, 1 – 8 (1964).
- [34] H. P. Schwan u. L. D. Sher, J. Electrochem. Soc. **116**, 170 – 174 (1969).
- [35] B. Novak u. F. W. Bentrup, Biophysik **9**, 253 – 260 (1973).
- [36] G. Schwarz, J. Phys. Chem. **66**, 2636 – 2642 (1962).
- [37] G. Schwarz, M. Saito u. H. P. Schwan, J. Chem. Phys. **43**, 3562 – 3569 (1965).
- [38] M. Saito, H. P. Schwan u. G. Schwarz, Biophys. J. **6**, 313 – 327 (1966).
- [39] L. D. Sher, E. Kresch u. H. P. Schwan, Biophys. J. **10**, 970 – 979 (1970).
- [40] J. Bernhardt u. H. Pauly, Biophysik **10**, 89 – 98 (1973).
- [41] U. Zimmermann, G. Pilwat u. R. Riemann, Biophys. J. **14**, 881 – 889 (1974).
- [42] C. F. Dalziel, IEEE Spectrum **9**, 41 – 50 (1972).
- [43] J. Bernhardt, Radiat. and Environm. Biophys., **16**, im Druck (1979).
- [44] J. C. Lin, A. W. Guy u. C. C. Johnson, IEE Trans. Microwave Theory Tech., **MTT-21**, 791 – 797 (1973).
- [45] R. J. Spiegel, IEEE Trans. Biomed. Eng. **BME-23**, 387 – 391 (1976).
- [46] R. J. Spiegel, ibid., **BME-24**, 466 – 472 (1977).
- [47] C. H. Durney, C. C. Johnson u. H. Massoudi, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **MTT-23**, 246 – 253 (1975).
- [48] C. C. Johnson, C. H. Durney u. H. Massoudi, ibid. **MTT-23**, 739 – 747 (1975).
- [49] S. Rush, J. A. Abildskov u. R. McFee, Circ. Res. **12**, 40 – 50 (1963).
- [50] P. W. Nicholson, Exp. Neurol. **13**, 386 – 401 (1965).
- [51] J. B. Ranck jr. u. S. L. BeMent, Exp. Neurol. **11**, 451 – 463 (1965).
- [52] W. H. A. Rushton, J. Physiol. **63**, 357 – 377 (1927).
- [53] S. L. BeMent u. J. B. Ranck jr., Exptl. Neurol. **24**, 147 – 170 (1969).
- [54] S. L. BeMent u. J. B. Ranck jr., ibid. **24**, 171 – 186 (1969).
- [55] R. A. Wise, Amer. J. Physiol. **223**, 545 – 548 (1972).
- [56] W. J. Roberts u. D. O. Smith, Acta Physiol. Scand. **89**, 384 – 394 (1973).
- [57] F. E. Barry, M. S. Walter u. C. R. Gallistel, Physiology and Behavior **12**, 749 – 754 (1974).
- [58] J. B. Ranck jr., Brain Research **98**, 417 – 440 (1975).
- [59] P. Osypka, Elektromedizin **8**, 153 – 179; 193 – 214 (1963).
- [60] W. B. Kouwenhoven, C. J. Miller jr., H. C. Barnes, J. W. Simpson, H. L. Rorden u. T. J. Burgess, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, **PAS-85**, 403 – 411 (1966).
- [61] W. B. Kouwenhoven, M. L. Langworthy, M. L. Singewald u. G. G. Knickerbocker, ibid. **PAS-86**, 506 – 511 (1967).
- [62] J. G. Llaurodo, A. Sances u. J. H. Battocletti (Eds.), Biologic and Clinical Effects of Low-Frequency Magnetic and Electric Fields. Springfield, Ill., C. C. Thomas 1974.
- [63] M. A. Persinger, ELF and VLF Electromagnetic Field Effects, Plenum Press, New York 1974.
- [64] H. L. König, Unsichtbare Umwelt, H. Moos Verlag, München 1975.
- [65] A. A. Marino u. R. O. Becker, Physiol. Chem. Phys. **9**, 131 – 147 (1977).
- [66] W. R. Adey u. S. M. Bawin, Brain Interactions with Weak Electric and Magnetic Fields. Neurosci. Res. Prog. Bull. **15**, Mass.: MIT Press, Cambridge 1977.
- [67] R. Hauf, Elektrotechn. Z. **B 28**, 181 – 183 (1976).
- [68] E. Jacobi, G. Hagemann u. W. Kunke, Dtsch. med. Wschr. **98**, 434 – 440 (1973).
- [69] E. Jacobi, Untersuchungen zur Physiologie der Thrombozytenadhäsivität. Habilitationsschrift, Medizinische Fakultät der Universität Düsseldorf 1977.
- [70] S. M. Bawin, R. J. Gavalas-Medici u. W. R. Adey, Brain Res. **58**, 365 – 384 (1973).
- [71] S. M. Bawin u. W. R. Adey, Proc. Nat. Sci. USA, **73**, 1999 – 2003 (1976).
- [72] S. M. Bawin, A. Sheppard u. W. R. Adey, Bioelectrochem. Bioenergetics **5**, 67 – 76 (1978).
- [73] R. Wever, Z. vergl. Physiol. **56**, 111 – 128 (1967).
- [74] R. Wever, Naturwissenschaften **55**, 29 – 32 (1968).
- [75] H. Fröhlich, Int. J. Quantum Chem. **2**, 641 – 649 (1968).
- [76] H. Fröhlich, Nature **228**, 1093 (1970).
- [77] H. Fröhlich, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, **72**, 4211 – 4214 (1975).
- [78] H. Fröhlich, Revista del Nuovo Cimento **7**, 399 – 418 (1977).
- [79] S. J. Webb u. A. D. Booth, Nature **222**, 1199 – 1200 (1969).
- [80] W. Grundler, F. Keilmann u. H. Fröhlich, Physics Letters **62 A**, 463 – 466 (1977).
- [81] W. Grundler u. F. Keilmann, Z. Naturforsch. **33 c**, 15 – 22 (1978).
- [82] R. Reiter, Heizung, Lüftung, Haushaltstechnik (VDI) **21**, 258 – 262; 279 – 285 (1970).
- [83] R. Blaser, H. Dittrich, U. Kirsch u. M. Schaldach, Biomedizin. Technik **17**, 109 – 116 (1972).
- [84] D. Röhl, M. E. T. Hauber, H. M. Laun, H. Voigt u. M. Stauch, ibid. **19**, 27 – 30 (1974).
- [85] D. Röhl, Dtsch. med. Wschr. **100**, 26 – 29 (1975).
- [86] H. J. Bisping, W. Irnich, J. Meyer u. S. Effert, ibid. **97**, 1773 – 1779 (1972).
- [87] H. J. Bisping u. W. Irnich, ibid. **101**, 668 – 672 (1976).
- [88] A. R. Sheppard u. M. Eisenbud, Biological Effects of Electric and Magnetic Fields of Extremely Low Frequency, New York University Press, New York 1977.
- [89] M. A. Stuchly, Rad. and Environm. Biophys. **16**, 15 – 27 (1979).