

Warum Forschung

zu Feldern des Mobilfunks an Zellen und Geweben?

Die Ergebnisse zweier von der Forschungsgemeinschaft Funk (FGF) geförderter Projekte an der Humboldt-Universität Berlin

Forschung zum möglichen Einfluß, den elektromagnetische Felder (EMF) auf die belebte Natur und uns Menschen nehmen könnten, wird auf den Ebenen aller verschiedenen Organisationsstufen von Organismen unternommen: Angefangen bei Bevölkerungsstudien (Epidemiologie) über Untersuchungen an Individuen (Mensch und Tier), Zellen und Geweben (von Mensch, Tier und Pflanze sowie Einzeller und Bakterien) bis hin zu der untersten, molekularen Ebene, wo die Bausteine der lebenden Substanz (Moleküle, Ionen) und das Material aus dem die lebenden Zellen sind (z.B. Zellmembranen) betrachtet werden.

Auf allen Ebenen (Abb. 1) versucht man Hinweise darauf zu bekommen, ob sich von dem zunehmenden Einfluß der EMF, dem wir ausgesetzt sind, Belästigungen, Beeinträchtigungen oder gesundheitliche Gefahren ableiten lassen oder nicht. Erst das Zusammenfügen vieler solcher Mosaiksteinchen aus dem Bereich der wissenschaftlichen Forschung wird eines Tages ein Gesamtbild ergeben, das einen weitgehend zweifelsfreien Schluß über die Gefährlichkeit oder Ungefährlichkeit von Mobilfunkfeldern zuläßt.

Noch ist die Wissenschaft nicht so weit, und dem objektiven Betrachter bietet sich in vielen Gebieten dieser Forschung im-

mer noch ein geteiltes Bild mit einer Unmenge an positiven und negativen Einzelbefunden, die oft eine Bewertung der Resultate nur schwer zulassen. Oft findet man zum gleichen Thema Gegensätzliches. Niemandem ist es bisher zufriedenstellend gelungen, einen Zusammenhang zwischen den vielen Einzelbefunden und einer daraus abzuleitenden Relevanz für unsere Gesundheit herzustellen. Auch ist es kaum gelungen, die Bögen zu spannen zwischen den oben erwähnten Untersuchungsebenen, also zu erforschen, ob ein relevanter Effekt, der auf einer der Ebenen gefunden wurde, sich durchsetzt und übertragbar ist, so daß er auch auf der benachbarten




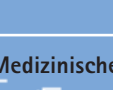
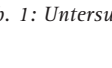
<p>Bevölkerung</p> 	<p>Epidemiologische Studien Suche nach den Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder, wobei der Untersuchung eine große Personenzahl zugrunde liegt.</p>
<p>Individuum</p> 	<p>Untersuchungen an Tieren Lässt sich durch die kontrollierte Anwendung eines bestimmten Faktors (z.B. eines elektromagnetischen Feldes) eine messbare Reaktion im Körper auslösen?</p>
<p>Zellen und Gewebe</p> 	<p>Zellbiologische Untersuchungen Kann durch elektromagnetische Felder das Verhalten von Zellen beeinflusst werden?</p>
<p>Moleküle</p> 	<p>Biochemische und molekular-biologische Untersuchungen Können biochemische Reaktionen oder molekulare Strukturen durch elektromagnetische Felder beeinflusst werden?</p>
<p>Medizinische Geräte</p> 	<p>Untersuchung der Störfestigkeit Beeinflussen elektromagnetische Felder, medizinische Geräte und medizintechnische Körperhilfsmittel?</p>

Abb. 1: Untersuchungsebenen

Ebene noch gesundheitlich relevant wäre. Hier scheiden sich meist die Geister. Solange noch keine Mechanismen eindeutig identifiziert sind, mit denen sich erklären ließe, wo in der lebenden Materie die Fehler überhaupt eine Chance hätten anzugreifen, solange wird auch die gesundheitliche Bewertung der vielen Einzelresultate unbefriedigend bleiben. Fachübergreifende Forschung, bei der gleich mehrere Organisationsstufen des Lebens abgedeckt werden, ist selten, in vielen Bereichen gar nicht möglich oder, sofern möglich, enorm teuer.

Wo lohnt es sich also überhaupt noch genauer nachzuforschen, als dies ohnehin schon geschehen ist? Immerhin geht man mittlerweile von etwa 40.000 wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu der Thematik aus, die jedoch bei genauerem Hinsehen allerdings zum überwiegenden Teil mit erheblichen Mängeln in der Durchführung der entsprechenden Untersuchungen behaftet sind.

Eine bessere Qualität der Forschung ist also eindeutig wünschenswert und wird heutzutage auch zunehmend erreicht. Dabei sind Mechanismen und daraus ableitbare Erklärungsmodelle für mögliche Angriffspunkte der EMF an biologischem Material gefragt. Auf welcher Untersuchungsebene lassen sich solche Mechanismen entdecken?

Die Untersuchungsebene der Zellen und Gewebe

Führt man Experimente auf der Untersuchungsebene von Zellen und Geweben durch, dann beleuchten solche Untersuchungen oft auch Aspekte, die zu der untersten Ebene gehören, der Ebene der molekularen Bausteine des Lebens. Der Übergang zwischen diesen beiden Untersuchungsebenen ist fließend. Die zu untersuchenden Zellen und Gewebe gewinnen die Forscher meist aus Versuchstieren, die sich auch in der Pharma-Forschung bewährt haben, oder durch Biopsie (Gewebeentnahme mit einer Kanüle) oder Blut-

entnahme vom Menschen. Außerdem kommen Zellkulturen menschlicher, tierischer und pflanzlicher Zellen sowie Bakterienkulturen zum Einsatz.

Der herausragendste Vorteil dieser Untersuchungsebene ist, daß alle störenden Einflüsse, die im ganzen Organismus vom Gehirn und vom sonstigen Nervensystem ausgehen, hier nicht vorkommen können. Ob beim Verhaltensexperiment mit Tieren, ob im Schlaflabor mit Probanden oder beim Ausfüllen von Fragebögen bei einer Bevölkerungsstudie: immer spielen dabei Gefühle, Täuschungen oder unterbewußte Handlungen eine erhebliche Rolle und müssen sorgfältig von den eigentlichen, unbeeinflussten Zuständen, Handlungen oder Aussagen abgetrennt werden. Diese Tatsache stellt bei allen Studien auf den höheren Ebenen der Individuen und der Bevölkerung eine große Schwierigkeit dar. Man versucht, den sogenannten „Störgrößen“ durch ausgefeilte statistische Methoden und durch das Erkennen und den Ausschluß möglichst vieler solcher Größen zu begegnen. Die Fachliteratur zeigt jedoch, dass dies oft genug nicht gelungen ist.

Viele Untersuchungen leiden also unter einem unzureichenden Ausschluß störender Einflüsse, die ein falsches Ergebnis vor spiegeln und damit die Entdeckung und Bewertung von möglichen Gesundheitsgefahren unmöglich oder zumindest sehr schwer machen. So kommt es zu dem bereits erwähnten Dilemma, daß sicher über die Hälfte (manche sprechen von 80%) der in wissenschaftlicher Literatur veröffentlichten Ergebnisse zu Problemen der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit (EMVU) bei einer sinnvollen Einschätzung von möglichen Gesundheitsgefahren praktisch unberücksichtigt bleiben müßten. Ob dies immer beachtet wird, steht auf einem anderen Blatt.

Zellen und Gewebe haben keine störenden Gedanken und Nervenimpulse; an ihnen kann man also sozusagen „biologische Reaktionen in Reinform“ studieren. Auch bei Experimenten an Zellen und Ge-

weben gibt es natürlich eine Vielzahl möglicher Störgrößen. Diese lassen sich jedoch viel einfacher und gezielter als bei ganzen Organismen mit geeigneten technischen Maßnahmen in den Griff bekommen. Das heißt zwar nicht, dass dies immer hundertprozentig gelingt, jedoch erscheint der Anteil der im obigen Sinne „brauchbaren“ Literatur hier zumindest größer.

Dafür ist die direkte Ableitung einer gesundheitlichen Relevanz für den Menschen bei Untersuchungen an Zellen und Geweben natürlich schwieriger. Eine erhöhte Teilungsrates von Gehirnzellen in einer Kulturschale unter Einfluß eines simulierten Mobilfunkfeldes bedeutet natürlich noch lange nicht, daß sich bei entsprechender Feldexposition auch im Kopf des Menschen eine verstärkte Teilung, also womöglich eine Tumorbildung, abspielen muß. Um diese Beziehung herstellen zu können, müßte man die bereits erwähnten, für eine solche Reaktion verantwortlichen Mechanismen und Erklärungsmodelle für die Wirkung kennen. Dies ist in den meisten Fällen noch nicht der Fall. Aber gerade hier bieten die lebenden Zellen, aus denen ein jeder Organismus aufgebaut ist, den Schlüssel für weitergehende Erkenntnisse.

Die Zelle bietet Angriffspunkte

Lebende Zellen sind, sehr vereinfacht ausgedrückt, im Grundprinzip immer gleich aufgebaut: eine doppelschichtige, halbflüssig erscheinende Membran aus flächig angeordneten Phospholipiden (Phosphatmoleküle, die mit Fettmolekülen verbunden sind) umgibt einen flüssigkeitsgefüllten Raum. In diesem Raum befinden sich u.a. gelöste Salze (Ionen), Aminosäuren, Nukleinsäuren (Erbsubstanz: DNA, RNA), Eiweißstoffe, Fette und eine Reihe verschiedener, wiederum von einfachen oder doppelten Membranen umschlossene kleine Räume mit besonderen Funktionen, sogenannte „Organellen“ (oder „Zellkompartimente“). Die Eiweißstoffe bilden u.a. ein sogenanntes „Zellskelett“ zur Stützung

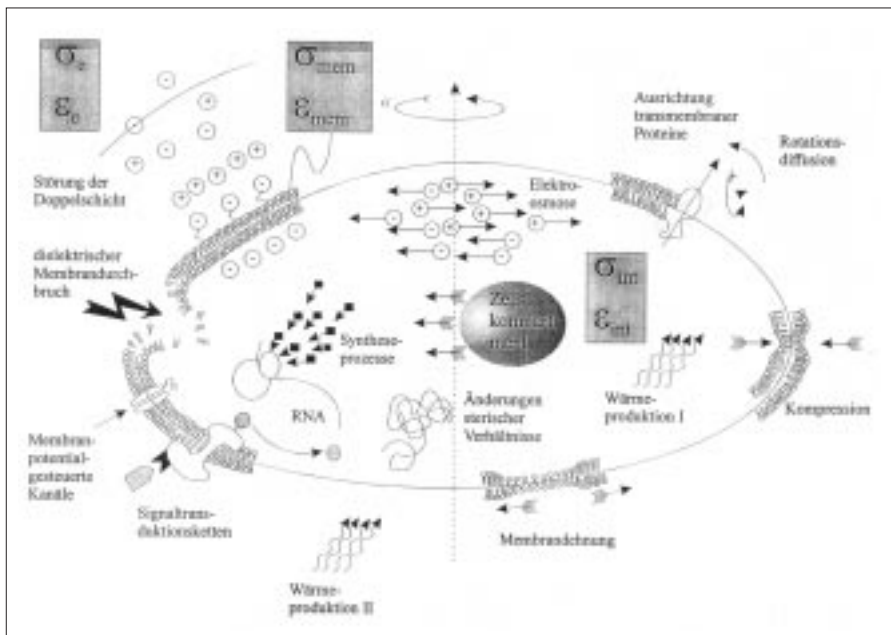


Abb. 2: Schematische Darstellung einer ovalen biologischen Zelle. Hervorgehoben sind Strukturen, Prozesse und Kraftwirkungen, die grundsätzlich durch äußere elektrische Felder beeinflussbar sind. (Zeichnung: H. Glasser)

und Zellbewegung, der Zellkern beinhaltet als größtes Kompartiment die Erbinformation. Nicht besonders spezialisierte Zellen sind durchschnittlich etwa 1/30 mm groß. Von diesem (sogar bei Pflanzen und Tieren fast gleichen) Grundbauplan ausgehend hat sich im Laufe der Evolution bekanntlich eine Vielzahl spezialisierter Zellen entwickelt.

Wichtig für die hier behandelte Fragestellung ist, wo eine Zelle eigentlich Strukturen oder Inhaltsstoffe besitzt, die einen Angriffspunkt für die Beeinflussung durch externe EMF bieten könnten. Hierbei müssen beeinflussbare Strukturen und Prozesse in wie auch an den Zellen unterschieden werden.

Abbildung 2 zeigt schematisch eine ovale Zelle, in der die hierbei in Frage kommenden Elemente und Kraftwirkungen hervorgehoben sind. Wie man erkennt, konzentrieren sich die möglichen Wirkungen auf die Membranen, die Zellkompartimente, die Eiweiße und die damit in Zusammenhang stehenden Synthese-, Regulations- und Transportprozesse, die Nukleinsäuren sowie auf elektrisch geladene, gelöste Teil-

chen (z.B. Ionen), die mit „Plus“ (+) und „Minus“ (-) bezeichnet sind.

Dass die gezeigten Wirkungen durch äußere EMF hervorgerufen werden können, ist unbestritten. Der als Beispiel gezeigte „dielektrische Membrandurchbruch“ kommt natürlich nur bei extrem hohen Feldstärken unter experimentellen Bedingungen vor, aber niemals auch nur annähernd unter Bedingungen wie beim Mobiltelefonieren.

Entscheidend in der Diskussion um mögliche schädliche Einflüsse von Feldern des Mobilfunks sind daher zwei Fragen: Ab welchem Ausmaß können die dargestellten Wirkungen an Zellen überhaupt gesundheitlich relevant für unseren Körper werden, und wie groß müssen die Feldstärken sein, damit die gezeigten Wirkungen auf Strukturen und Prozesse erst einmal in Gang kommen und tatsächlich irgend etwas in der Zelle verändern? Diesen Fragen geht die Wissenschaft bereits seit geraumer Zeit nach, und nur in den Antworten auf diese Fragen wird man jemals Erklärungen, Bestätigungen oder auch keine Bestätigung dafür finden, dass Störun-

gen, die auf höheren Organisationsstufen eines Organismus gefunden werden, auch tatsächlich ihre Ursache in den Wirkungen der elektromagnetischen Felder haben. Ohne einen Wirkungsmechanismus aus der Zelle zu kennen, der sich auch effektiv auf den Körper auswirken kann, ist eine im Körper beobachtete Störung erst einmal nur ein Phänomen und kann genauso gut auch durch andere Einflüsse verursacht worden sein, die man bei dieser speziellen Untersuchung vielleicht übersehen hat. Letzteres versucht man natürlich auszuschließen; dies geht aber umso schwerer, je höher die Organisationsstufe des untersuchten Objekts ist - am schwersten also bei Untersuchungen am Menschen, bei dem sich die Psyche und die subjektive Wahrnehmung nie vollständig ausblenden lassen. Befindet sich die Forschung somit in einer Sackgasse?

Beide Herangehensweisen - auf der niedrigen Ebene der Zellen und auf der höheren Ebene des ganzen Organismus - machen Sinn bei der ernsthaften Erforschung möglicher gesundheitlicher Gefahren durch EMF. Nur das Zusammenbringen der Ergebnisse aus beiden Bereichen und der Nachweis eindeutiger Reaktionswege zwischen Ursache bzw. Angriffspunkt für eine Wirkung der EMF in den Zellen und deutlich messbaren Auswirkungen im Organismus wird letztendlich unangreifbar Klarheit geben, ob wir bei Mobilfunkfeldern mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen rechnen müssen oder nicht.

Ganz in diesem Sinne fand auch der im letzten Jahr im Dezember von der FGF organisierte internationale Workshop „Übertragbarkeit von Forschungsergebnissen ...“ statt, bei dem Fachleute aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen sich u.a. dem hier behandelten Thema widmeten (siehe Bericht im vorliegenden Heft). Es zeigte sich, dass man von dem gewünschten klaren Gesamtbild noch ein ganzes Stück weit entfernt ist.

Auf dem Weg dahin stellen die beiden von der FGF geförderten Forschungs-

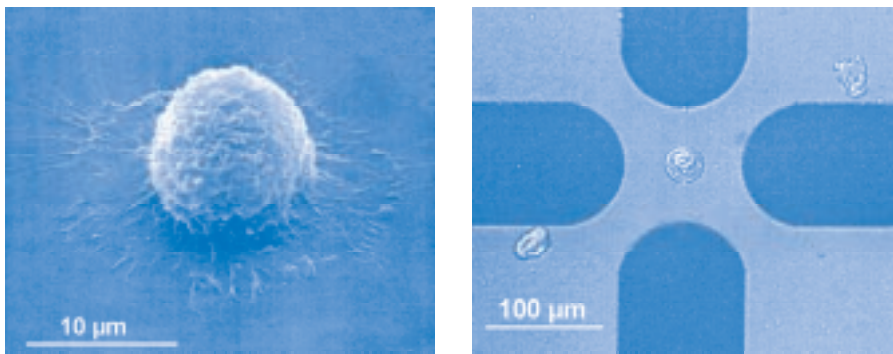


Abb. 3: (a) Abgerundete Zelle aus dem Bindegewebe der Maus. (b) Von der Zellwand befreite Zelle (Protoplast) aus unreifem (embryonalem) Gewebe der Lärche zwischen vier Elektroden auf einem Halbleiter-Elektrodenchip (vergleiche auch Abb. 5)

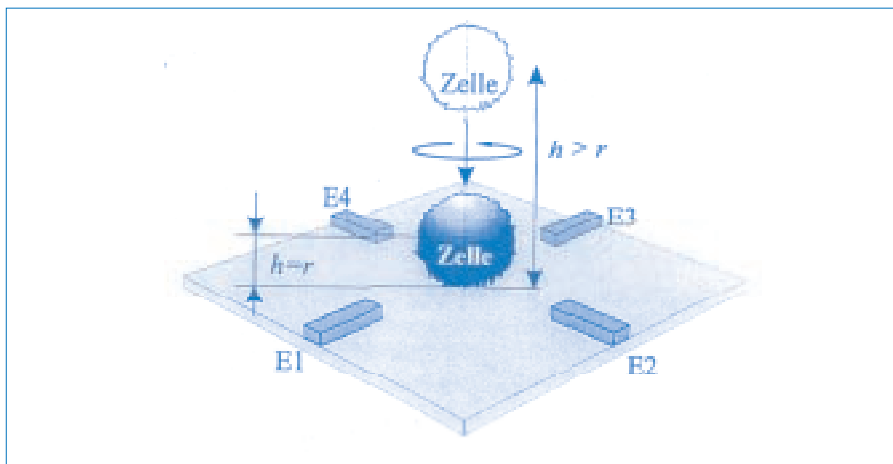


Abb. 4: Anordnung zur Messung der Feldkräfte und anschließenden Berechnung der auftretenden Feldstärke in einer Zelle auf einem Halbleiter-Elektrodenchip. Darstellung einer Zelle zwischen vier Elektroden (E1 - E4), die durch die Kräfte des angelegten rotierenden Feldes angehoben und in Rotation versetzt wird. Zur Eichung wird die Zelle durch eine ebenso große Latexkugel ersetzt.

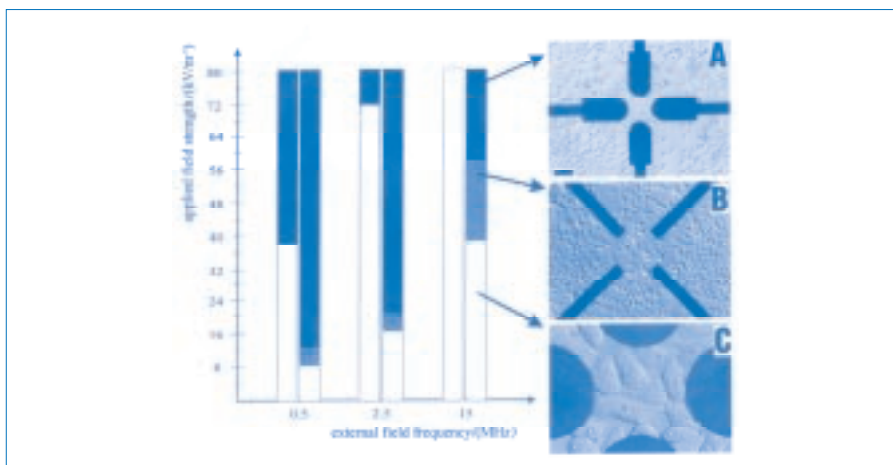


Abb. 5: Darstellung der Folgen einer kurzzeitigen (20 Sekunden, jeweils linke Säule) und einer langfristigen (3 Tage, jeweils rechte Säule) Exposition von Zellkulturen (Zellen vom Bindegewebe der Maus) bei drei verschiedenen Frequenzen (0,5, 2,5 und 15 MHz, unmoduliert) und elektrischen Feldstärken von 1 bis 80 kV/m. Bedeutung der Schattierung in den Säulen: siehe Text. Ausgewertet wurden mikroskopische Aufnahmen, wie in A, B und C gezeigt.

projekte an der Humboldt-Universität in Berlin jedoch zwei weitere wichtige Mosaiksteinchen dar. Prof. Günter Fuhr schreibt in seinem Abschlußbericht für die FGF: „Es ist zu kurz gegriffen, wenn man meint, Feldwirkungen auf Tiere und speziell den Menschen allein auf organischer Ebene klären zu können. (...) Nach allen naturwissenschaftlichen Kenntnissen erfolgt eine Wirkung auf atomarer und molekularer Ebene, egal, welche Feldform eingesetzt wird. Es ist demzufolge zwingend, mit der kleinsten lebenden Einheit zu experimentieren, die möglich ist, und das sind isolierte Zellen. Wir denken, mit dem zum Abschluss gebrachten Forschungsprojekt in diesem Sinne einen Beitrag geleistet zu haben.“

Halbleiter-Elektrodenchips als Träger für Zellkulturen

Bei dem von Prof. Günter Fuhr am Institut für Biologie der Humboldt-Universität Berlin geleiteten Projekt wurde erstmals Halbleitermaterial als Untergrund für die Kultivierung von Zellen in speziellen Kammern zur direkten Feldexposition in solchen Kultivierungskammern verwendet. Halbleitermaterial ist mittlerweile jedem aus der Elektronik und Computertechnik als Träger und Grundmaterial für elektronische Schaltungen und Mikrochips bekannt. Der Stoff bietet die Möglichkeit, elektrische Leiter so stark zu miniaturisieren, dass sie in bisher nicht gekannter Weise sehr dicht an die auf dem Trägermaterial kultivierten Zellen herangebracht werden können. Das heißt, dass die im Experiment verwendeten Elektroden - die quasi die „Sendeantennen“ für die teilweise eingespeisten Hochfrequenzfelder darstellen - in ihrer Größe den getesteten Zellen sehr nahe kommen (Abb. 3).

Dadurch eröffneten sich in bezug auf die genaue Feldberechnung im Bereich der getesteten Zellen und in bezug auf die Stärke der einsetzbaren Felder (fast ohne störende Wärmeproduktion) ganz neue Dimensionen. Hier wurde ein System

geschaffen, mit dem - bei bisher nicht gekannter Genauigkeit bei der Abschätzung der Feldstärke in und an der Zelle - verlässliche Eckdaten darüber produziert wurden, was mit den Zellen eines Körpers passieren *könnte*, wenn sie durch zu starke Feldeinwirkung geschädigt *würden*. Für Feldstärken unter 100 V/m ist das System allerdings nicht mehr geeignet. Dieser Wert liegt etwa zwischen der Aussendung eines Bildschirms (ca. 10 V/m) und der Stärke des Erdmagnetfelds (ca. 200 V/m). Es werden also mit dem Halbleiter-Elektrodenchip eher stärkere Feldwirkungen experimentell erfassbar.

Ganz neue Wege wurden in dem Projekt auch bei der genauen Berechnung der tatsächlichen Feldstärken und Temperaturen in den Zellen beschritten: In einer Salzlösung wurden lebende runde Zellen oder runde Testpartikel aus Latex zwischen vier Elektroden (sogen. „Quadrupolanordnung“) unter Beobachtung von dem angelegten rotierenden Feld angehoben und in Rotation versetzt. Der Zeitpunkt des Abhebens beim Hochfahren des Feldes und die Umdrehungsgeschwindigkeit der Zelle bei einem konstant rotierenden Feld gaben genaue Rückschlüsse auf die in der Ebene der Zellen auftretenden Feldstärken (Abb. 4).

Hierbei konnte ein weiter Frequenz- und Feldstärkebereich getestet werden. Die Ungenauigkeit lag dabei nur bei $\pm 10\%$; eine Berechnung, die bei der Größe der Objekte (ca. 1/100 mm) mit den üblichen Feldsimulationen im Computer bislang nicht möglich gewesen ist.

Der Anteil des angelegten Feldes, der sich in den Zellen als eine Erhöhung der Temperatur auswirkt, wurde mit einer ebenso raffinierten Methode erfasst: Man machte die Teilungsrate von Zellen, die auf dem Elektrodenchip kultiviert wurden, zum Anzeiger für den Eintrag an „thermischer Energie“ (= Temperatur) durch das jeweils zum Test angelegte elektromagnetische Feld. Zellen unseres Körpers teilen sich nur in einem recht engen Temperaturbereich optimal, d.h. mit größtmöglicher

Geschwindigkeit. Ober- und unterhalb dieses Temperaturfensters werden die Verdoppelungszeiten deutlich länger. Zum Test wurden Zellen von Mäusen auf Halbleitermaterial kultiviert, das zwischen 30 und 40 °C auf 0,1 °C genau temperiert werden konnte. Bei jeder eingestellten Temperatur (in 0,5 °C Schritten) wurden die Zellteilungsgeschwindigkeiten gemessen und so ein Teilungsoptimum ermittelt. Legten die Forscher nun bei gleich temperierter Unterlage (und Umgebung der Messkammer) zusätzlich ein Feld an, verschob sich das Optimum zu tieferen eingestellten Temperaturen hin. Der Differenzbetrag an Temperatur zur vorher ermittelten optimalen Temperatur musste also vom Energiebeitrag des angelegten Feldes herrühren. Die Zellen „erlebten“ dabei natürlich in beiden Fällen die gleiche Temperaturskala. Deutlich wurde der Effekt anhand der niedriger einzustellenden Temperatur beim Heizen des Elektrodenchips. Dieser „thermische“ Effekt der angelegten EMF trat selbstverständlich nur bei relativ starken Feldern und weit unterhalb des Frequenzbereichs des Mobilfunks auf. Die Methode zeigt aber einen Weg auf, wie anhand einer deutlichen Reaktion von Zellen die tatsächlich in ihnen „erlebte“ Temperatur gemessen werden kann und nicht nur die Temperatur in ihrer unmittelbaren Umgebung (wie sonst bei Messungen an Zellen üblich). Auch bei höheren Frequenzen bietet sich das Verfahren an, um zwischen Wärmeeffekten und möglichen anderen Effekten, die durch die angelegten Felder hervorgerufen werden, zu unterscheiden.

Ebenfalls mit vier kreuzweise angeordneten Elektroden auf Halbleitermaterial wurde der Einfluss auf Wachstum, Überlebensrate und Beweglichkeit (Verformung und Wanderung) von Zellen über einen weiten Frequenz- und Feldstärkebereich (500 kHz - 15 MHz, 1 - 80 kV/m) erforscht (Abb. 5).

(A, B, C) Beispielhafte Darstellung verschiedener Grade des Feldeinflusses auf die

Zellen im Zentrum der vier Elektroden: (A) keine überlebenden Zellen im Zentrum (B) überlebende aber geschädigte Zellen im Zentrum, erkennbar an der ausgedünnten Zellschicht mit abgerundeten Zellen (C) gesunde Zellen. Maßstrich in (C) entspricht 1/13 mm.

Dabei wurde bei kurzzeitigen Feldexpositionen von 20 Sekunden der Bereich ermittelt, bei der die Exposition zu schweren Schäden an der Zellmembran führt (schwarze Bereiche in den jeweils linken Säulen im Diagramm). Bei langfristiger Dauereexposition (drei Tage; rechte Säulen) wurde unterschieden zwischen keinerlei Schäden (weiße Bereiche), Verschlechterung mindestens eines der oben genannten Parameter (graue Bereiche; meist verringerte Wachstumsrate) und keinen überlebenden Zellen im Zentrum der Elektroden (schwarze Bereiche). Man erkennt z.B., dass erstaunlicherweise bei 15 MHz Feldexposition über drei Tage eine Feldstärke von bis zu 40 kV/m keine messbare Beeinflussung der Zellen ergab (Abb. 5C).

Schlitzleitungssysteme für höhere Frequenzen

Um auch den Frequenzbereich des Mobilfunks im Experiment erfassen zu können, wurden von Prof. Fuhr im Laufe des FGF-Projektes vollkommen neuartige Halbleiter-Elektrodenchips zur Feldexposition im GHz-Bereich entwickelt. Diese sogenannten „planaren Schlitzleitungsresonatoren“ bestehen aus einer Art dünnen Platine („Glaswafer“), auf die mit Lasertechnik die meanderförmige, sehr dünne Schlitzleitung aufgebracht ist (Abb. 6).

In dem dünnen, nach oben offenen Kanal der Schlitzleitung können Zellen kultiviert und mit dem Mikroskop beobachtet werden. Bei Anlegen eines hochfrequenten elektrischen Signals, z.B. 900 MHz, entstehen im Bereich der Schlitzleitung in der Ebene der Zellen sehr gut definierbare Hochfrequenzfelder, die bei Bedarf im Experiment sehr hohe Feldstärken haben können. Dabei können sehr eng begrenzte

Abb. 6: Ansicht eines Schlitzleitungssystems zur Kultivierung und Exposition von Zellen im GHz-Bereich, montiert auf den Objekthalter (schwarze Platte) für ein Mikroskop. Rechts unten die Hochfrequenzleitung, in der Mitte die Kultivierungskammer (aufgesetzter Glasring). Zu erkennen ist die meanderförmige Schlitzleitung. Maßskala in cm.

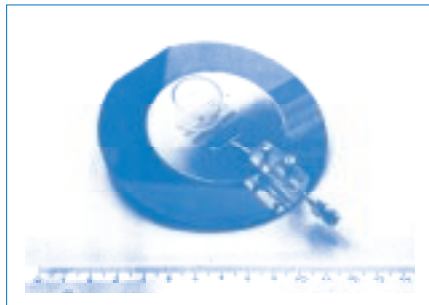


Abb. 7: Blick in den Kanal (gelber Bereich) eines Schlitzleitungssystems mit darin kultivierten, am transparenten Boden anhaftenden weißen Blutkörperchen (hell) und runden Testpartikeln aus Latex (dunkel). Linkes Bild: vor Einschalten des Feldes. Rechtes Bild: 10 Sekunden nach Einschalten des Feldes. Erklärung: siehe Text. Breite des Kanals: 1/5 mm.

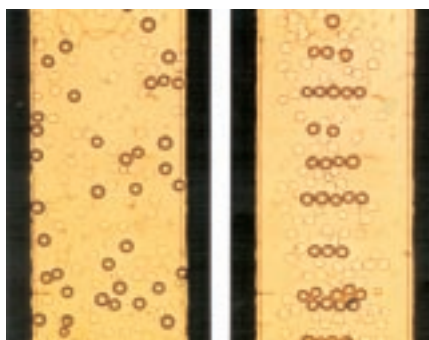
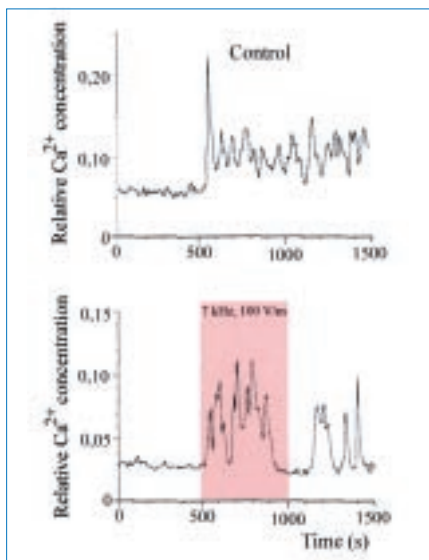


Abb. 8: Messung des inneren Calciumgehaltes in zwei einzelnen Zellen (Lymphozyten) über einen Zeitraum von 1500 Sekunden. Calciumfreisetzungen aus den inneren Calciumspeichern sind als spitze Ausschläge der Messkurven nach oben zu erkennen. Die ruhige Grundlinie in den ersten 500 Sekunden zeigt den Basisgehalt an Calcium von gewöhnlich etwa 100 nmol/l an. Obere Grafik: Kontrollversuch ohne elektrisches Feld. Untere Grafik: Exposition der Zelle im farblich markierten Zeitraum in einem 7 kHz elektrischen Feld von 100 V/m Stärke. Linke Skala für den Calciumgehalt in relativen Einheiten.



Bereiche in der Schlitzleitung unterschieden werden, die entweder ein reines magnetisches Feld oder ein reines elektrisches Feld aufweisen. Ähnlich wie oben für die Elektrodenchips mit Quadrupolanordnung beschrieben, sind auch in der Schlitzleitung Feld- und Temperaturbestimmungen mit Testpartikeln und Zellen möglich.

Abbildung 7 zeigt menschliche Lymphozyten (weiße Blutkörperchen, ca. 1/100 mm groß), die im Kanal eines Schlitzleitungssystems am Boden anhaftend in Nährlösung kultiviert werden. Daneben erkennt man in etwa gleicher Größe, aber etwas dunkler, Testpartikel aus Latex, die ohne angelegtes Feld frei in der Lösung schwimmen. Beim Anlegen eines 900 MHz Feldes (Abb. 7, rechtes Bild) ordnen sich die Partikel aufgrund abstoßender Kräfte des elektrischen Feldes – das im gleichen Maße auch auf die darunter liegenden Lymphozyten einwirkt – perlschnurartig an. An der Geschwindigkeit der Anordnung zu solchen Perlketten lassen sich die in der Ebene der Zellen tatsächlich in wirkende Kräfte umgesetzten Feldstärken im GHz-Bereich mit einer bisher nicht gekannten Genauigkeit messen und damit exakt abschätzen, und nicht nur, wie bisher, berechnen.

Diese Neuentwicklung eröffnet vollkommen neue Möglichkeiten bei der Untersuchung von einzelnen Zellen unter dem Einfluss hochfrequenter Felder im unteren GHz-Bereich.

Dem Calcium auf der Spur

Bei dem von Prof. Roland Glaser am Institut für Biologie der Humboldt-Universität Berlin geleiteten Projekt wurde der wichtigste Botenstoff in den Zellen, das Calcium, unter dem Einfluss der elektrischen Feldkomponente von EMF untersucht. Als Untersuchungsobjekt dienten Zellkulturen von menschlichen Lymphozyten (s.o.). Die einzelnen Zellen wurden lebend mit einem Farbstoff beladen, der unter dem Mikroskop anzeigt, wie viel Calcium gerade in den Zellen aus den darin

befindlichen Calciumspeichern freigesetzt wird. Solche Calciumfreisetzungen (oder auch ein Einstrom in die Zellen von außen) dienen im Prinzip allen Zellen als Signal für eine Vielzahl von Lebensprozessen, wie z.B. als Startsignal für eine Zellteilung. Da Lymphozyten auch scheinbar spontan, also ohne äußerlich ersichtlichen Grund, häufig kurze Calciumfreisetzungen zeigen, war in diesem Projekt ein hoher statistischer Aufwand nötig, um die gemessenen „spontanen“ von womöglich durch das angelegte elektrische Feld hervorgerufenen, „unfreiwilligen“ Freisetzungen abzutrennen. Sollte ein elektrisches Feld solche „unfreiwilligen“ Calciumentladungen bewirken können, dann könnte dies natürlich das gesamte, sehr fein abgestimmte Signalgeschehen in den Zellen durcheinander bringen. Im Zusammenhang hiermit steht u.a. das viel diskutierte, möglicherweise erhöhte Leukämierisiko durch den Einfluss elektromagnetischer Felder. Leukämie (Blutkrebs) bedeutet eine außer Kontrolle geratene Vermehrung von Lymphozyten, die im Normalfall im Körper strikt unter Mitwirkung von Calcium geregelt ist.

UV-Licht stört die Calciummessung

Leider ist es aus methodischen Gründen notwendig, die Lymphozyten während der Messung ihres Calciumgehaltes im lebenden Zustand mit UV-Licht zu bestrahlen. Es gibt jedoch keine bessere Möglichkeit. Die heute gebräuchlichen fluoreszierenden Farbstoffe, die den Calciumgehalt anzeigen, sind nur dann empfindlich genug, wenn sie mit diesem Licht zum Leuchten angeregt werden.

Im Rahmen des FGF-Projektes wurde festgestellt, dass die Zellen umso mehr „spontane“ (d.h. in dem Fall: „vom angelegten EMF unabhängige“) Calciumfreisetzungen produzieren, umso höher die Dosis der UV-Lichtbestrahlung ist. Diese Erkenntnis gibt einen wertvollen Hinweis zur Bewertung anderer Studien, wenn man

veröffentlichte positive Befunde solcher Forscher betrachtet, die mit der gleichen Nachweismethode am gleichen Zelltyp gearbeitet haben, dem UV-Lichtproblem dabei aber keine Beachtung schenkten.

Prof. Glaser bestrahlte die Lymphozyten in seinen Versuchen mit UV A-Licht bei einer Halbwertsdosis von 10 ± 3 kJ/m². Dabei erwiesen sich diese Zellen gegenüber anderen getesteten Zelltypen (Knochenzellen, Nervenkrebszellen) als besonders stark beeinflussbar.

Gründliche Auswertung der Daten

Die Beispiele von zwei Experimenten an jeweils einer einzelnen Zelle in Abb. 8 zeigen, wie schwer die „spontanen“ Calciumfreisetzungen von möglicherweise durch das Feld hervorgerufenen zu unterscheiden sind.

In solchen Fällen muss in der Forschung allgemein die Menge an Untersuchungsobjekten besonders groß gewählt werden, damit statistische Methoden helfen kön-

nen, solche Schwierigkeiten zu überwinden. Da in Prof. Glasers Studie ein weites Spektrum an Frequenzen (1 - 200 kHz, 50 und 150 MHz) recht engmaschig in seiner Wirkung auf die Zellen überprüft wurde, musste dementsprechend eine sehr hohe Zahl von Einzelregistrierungen (ca. 100 bis 200 je Frequenz) statistisch ausgewertet werden. In der Regel wurden im mittleren Drittel eines Experiments elektrische Feldstärken von 100 V/m in der Ebene der Zellen erzeugt. Die Gesamtauswertung der Calciumreaktionen (erhöhte Werte in den Zellen um mindestens das Doppelte) unter Feldexposition im niederfrequenten Bereich von 1 - 200 kHz (Abb. 9) ergab gegenüber den Kontrollen (ohne Feldexposition; hellblaue Marke bei 49%) keine statistisch eindeutigen („signifikanten“) Abweichungen der Mittelwerte (t-Test, Irrtumswahrscheinlichkeit $p=0,05$).

Wegen der starken Streuung der Einzelwerte, die in jeder Säule in Abbildung 9 zusammengefasst sind, waren auch solche Abweichungen von der Kontrolllinie

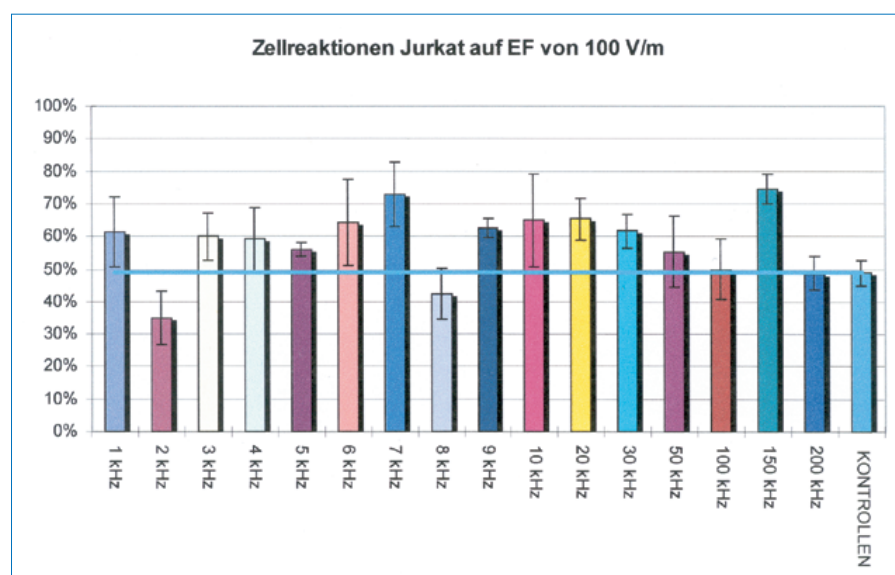


Abb. 9: Auswertung der Zellreaktionen (erhöhte Calciumwerte um mindestens das Doppelte während der Phase der Feldexposition) von Lymphozyten auf elektrische Felder von 100 V/m Stärke bei 16 verschiedenen Frequenzen. In den Kontroll-experimenten ohne Feldexposition (äußerst rechte Säule und waagerechte blaue Linie als Markierung) zeigten 49% der Zellen erhöhte Werte im fraglichen Zeitraum des Experimentes (vergleiche Abb. 8). In jeder Säule sind Auswertungen von 100 - 200 einzelnen Zellen zusammengefasst (Mittelwerte mit nach Zell- und Versuchsanzahl gewichteter Standardabweichung).

statistisch nicht eindeutig, die rein optisch so erscheinen (z.B. bei 2 kHz, 7 kHz und 150 kHz).

Mit dem sogen. „Kolmogoroff-Smirnoff-Test“ wurden die Daten noch einem weiteren statistischen Test mit größerer Trennschärfe unterzogen. Der Test teilt die Zellen in Klassen für einen bestimmten Wert der gemessenen Calciumfreisetzung unter Feldeinwirkung ein. Hierbei ergaben sich als Ergebnis hochsignifikante Abweichungen bei den Frequenzen 20 kHz, 50 kHz und 100 kHz (Irrtumswahrscheinlichkeit $p=0,001$). Aufgrund der Art des Tests ließ sich jedoch schlussfolgern, dass zu diesem Ergebnis möglicherweise nur eine kleine Anzahl von Zellen innerhalb der jeweils getesteten Gruppe beigetragen hatte. Wenn sich demnach nur bei einem kleinen Teil der Zellen eine Reaktion auf die Feldeinwirkung zeigt, kann dies nach Aussage von Prof. Glaser nicht als gesicherter Feldefekt sondern nur als Hinweis auf mögliche Feldeffekte verstanden werden. Eine noch weitergehende Unterscheidung der reagierenden und nicht reagierenden Zellen war in der durchgeführten Studie nicht mehr möglich.

Bei entsprechenden Versuchen mit den gleichen Zellen – aber einer anderen Expositionsanlage – im hochfrequenten Feld (50 MHz und 150 MHz) wurden mit dem t-Test ebenfalls keine signifikanten Abweichungen der Mittelwerte zwischen den getesteten Gruppen mit verschiedenen Behandlungen (30 Sek. Feld oder Scheinexposition, 7 Sek. Feld oder Scheinexposition) festgestellt. Der „Kolmogoroff-

Smirnov-Test“ ergab wiederum – zumindest in einem Fall – eine hochsignifikante Abweichung bei der 50 MHz Exposition (7 Sek. Feldexposition gegenüber 30 Sek. Scheinexposition). Die vorher gemachten Einschränkungen aufgrund der Art dieses statistischen Tests gelten auch hier.

Keine alarmierenden Ergebnisse

In den beiden geschilderten Studien wurden keine Ergebnisse erzielt, die Anlass zur Sorge bei der Wirkung von nieder- und hochfrequenten EMF auf Zellen geben. Vielmehr ergaben sich auch bei hohen Feldstärken erst relativ spät eindeutig messbare Wirkungen, die in Richtung einer Schädigung weisen könnten. Die mögliche Art einer Schädigung konnte in Abstufungen gezeigt werden. Natürlich konnten dabei auch hier nur kleine Ausschnitte aus dem hochkomplexen Geschehen in lebenden Zellen sowie aus dem Frequenzspektrum der Felder betrachtet werden. Bei den betrachteten Lymphozyten wäre es sicher von Nutzen, die Phänomene noch genauer in bezug auf die Nachweismethode und den Zustand der Zellen (z.B. Lage im Teilungszyklus) zu untersuchen. Hier könnten sich möglicherweise Hinweise auf Angriffspunkte für eine Feldwirkung sowie auf Wirkungsmechanismen ergeben.

Es wurde aufgezeigt, dass es sich lohnt, sehr genau bei den Details einer Untersuchung an Zellen hinzusehen, bevor Schlüsse mit eventuellen Konsequenzen daraus gezogen werden können. Die methodischen

Entwicklungen nähern sich erst jetzt allmählich einem Reifegrad, wo Eckdaten zuverlässig erhoben und Unzulänglichkeiten bei der Messung erkannt und eingegrenzt werden können. Dabei hinterlassen die beiden beschriebenen FGF-Projekte wertvolle Neuentwicklungen und Erkenntnisse, die der dringend notwendigen, verlässlichen Erforschung von möglichen Feldwirkungen auf der Ebene der Zellen und Gewebe einen neuen, sichereren Weg bahnen können.

Dr. Frank Gollnick ist Biologe und war lange Zeit Mitarbeiter im Physiologischen Institut II der Universität Bonn. Er ist nun als wissenschaftlicher Berater für die FGF tätig.

Literatur

- [1] Ihrig, I. et al.: The UVA light used during the fluorescence microscopy assay affects the level of intracellular calcium being measured in experiments with electric-field exposure. *Radiation Res.* 152, 303-311 (1999)
- [2] Glaser, R. et al.: Synergistic effects of UVA and EMF on neuroblastoma cells. In: Bersani et al. (Editors): *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, Plenum Press, 1999
- [3] Haberland, L.: *Hypothesen zu zellulären, nicht-thermischen Wirkungsmechanismen elektromagnetischer Felder*. Literaturstudie, Verlag für Wissenschaft und Forschung, Berlin, 1999
- [4] Fuhr, G. et al.: High-frequency electric field trapping of individual human spermatozoa. *Hum. Reprod.* 13(1): 136-141 (1998)
- [5] Glasser, H. and G. Fuhr: Cultivation of cells under strong ac-electric field - differentiation between heating and trans-membrane potential effects. *Bioelectrochem. Bioenerget.* 47, 301-310 (1998)
- [6] Glasser, H. et al.: Electric field calibration in micro-electrode chambers by temperature measurements. *Thermochim. Acta* 333, 183-190 (1999)
- [7] Reichle, C. et al.: Microstructures in the GHz range for dielectric particle spectroscopy and cell cultivation. (in Vorbereitung)

