

BEMS 1996:

Neue Erkenntnisse zur Wirkung elektromagnetischer Felder auf Mensch und Tier

Auf der Tagung wurden elektromagnetische Felder in ihrer ganzen Breite berücksichtigt, also von den Gleichfeldern bis hin zu den hohen Frequenzen der Radio- und Mikrowellen. Einen Überblick über die recht heterogenen Beiträge zu geben, ist sehr schwierig. Ihre Fülle erlaubt nur eine exemplarische Darstellung. So findet in diesem Artikel nur eine kleine Auswahl der mehr biologisch-medizinisch orientierten Beiträge der Konferenz Beachtung. Dabei ist eine wichtige Frage, ob schwache elektromagnetische Felder gesundheitsrelevante Einflüsse auf Menschen haben. Für deren Beantwortung ist es erforderlich, zu wissen, über welchen Mechanismus solche Felder überhaupt Einfluß nehmen können. Bei starken Feldern ist dies bekannt: Niedrigfrequente Magnetfelder können elektrische Ströme im Gewebe induzieren, und hochfrequente elektromagnetische Felder können das Gewebe erwärmen. Diese Wirkungsmechanismen werden bei der Festlegung von Grenzwerten berücksichtigt, und damit soll gewährleistet werden, daß schädigende Wirkungen vom Menschen ferngehalten werden. Wenn allerdings andere Wirkungsmechanismen entdeckt werden sollten, über die auch schon schwache elektromagnetische Felder Einfluß nehmen könnten, dann wären die Grundlagen

unserer heutigen Risikoabschätzungen möglicherweise korrekturbedürftig. Es sind bisher keine derartigen Mechanismen schlüssig bewiesen worden, allerdings sind einige seit längerem in der Diskussion und werden intensiv untersucht.

Melatonin und freie Radikale

Bei der Suche nach möglichen Interaktionen zwischen den schwachen Feldern und dem Organismus spielt das Hormon Melatonin eine herausragende Rolle. Melatonin wird im Gehirn in der Zirbeldrüse, auch Epiphyse oder Pinealorgan genannt, gebildet. Melatonin wird nachts ausgeschüttet und entsprechend steigt sein Spiegel im Blut nachts an. Die Blutkonzentration von Melatonin schwankt also im Tag/Nacht-Rhythmus, und diesem Hormon wird eine Funktion bei der Aufrechterhaltung des Tag/Nacht-Rhythmus zugeschrieben. Neben dieser Wirkung verlangsamt Melatonin das Wachstum von Östrogen-abhängigen Tumoren, wie Brusttumoren. Außerdem wirkt Melatonin als Fänger sogenannter freier Radikaler im Körper. Freie Radikale sind aggressive chemische Verbindungen, die wichtige Moleküle in den Körperzellen schädigen kön-

nen. Dies kann zur Entstehung von Krebs führen bzw. die Entstehung begünstigen. Es ist wichtig, diese freien Radikalen unschädlich zu machen, bevor sie Schaden anrichten können. Dazu dienen Antioxidantien, die auch als Fänger freier Radikaler bezeichnet werden. Melatonin gilt als besonders potenter Fänger freier Radikaler. Melatonin steht also in dem Ruf, eine wichtige Rolle im Organismus zu spielen. Wenn die einzelnen Wirkungen von Melatonin auch eindeutig nachgewiesen sind, so ist die Rolle, die es im Organismus als Ganzes spielt, noch nicht wirklich zu beurteilen. Die nächtliche Melatonin-freisetzung läßt sich im Tierversuch durch schwache niedrigfrequente (50/60 Hz) Magnetfelder erniedrigen oder verschieben. Diese und andere Melatonin betreffende Beobachtungen haben sich in einer Reihe von Beiträgen widerspiegelt.

Schon der erste Hauptvortrag, gehalten von Professor Reiter, dem renomiertesten Melatoninspezialisten, hatte die Interaktion von Magnetfeldern und Melatonin mit freien Radikalen zum Thema. Er hat eine Reihe von Experimenten vorgestellt, die die Rolle von Melatonin als Fänger von freien Radikalen untermauern. Dabei ist er u.a. darauf eingegangen, wie Melatonin in den extrem niedrigen natür-

lichen Konzentrationen überhaupt eine wichtige Funktion als Fänger freier Radikaler haben kann, obwohl andere konkurrierende Substanzen wie z.B. Glutation oder Vitamin C und E in viel höheren Konzentrationen vorliegen. Nach den Versuchen von Reiter und Mitarbeitern scheint der Einsatz von Melatonin zusammen mit anderen Radikalfängern nicht nur zu einer Addition der antioxidativen Potenz der eingesetzten Substanzen zu führen, sondern es ergibt sich eine noch darüber hinausgehende Verstärkung. Es wurde von einer synergistischen Wirkung des Melatonins gesprochen, wenn es in Kombination mit anderen Antioxidantien eingesetzt wird. Durch diesen Mechanismus soll Melatonin auch in niedrigen Konzentrationen wirksam sein. Die oxidative Wirkung einer das Erbgut schädigenden Substanz, wie Safrol, ließ sich durch Melatonin in niedrigen Konzentrationen im Tierversuch verhindern. Der Einsatz von Safrol in der Nacht hatte eine im Vergleich zum Tag verringerte Wirkung, vielleicht bedingt durch den nachts erhöhten Melatoninspiegel. Ein durch Magnetfelder gesenkter nächtlicher Melatoninspiegel würde also die vielfältigen Schutzfunktionen, die dem Melatonin zugeschrieben werden, gleichzeitig verringern.

Zusätzlich zur Beeinflussung der Melatoninfreisetzung soll, nach Professor Reiter, auch die Lebensdauer von freien Radikalen durch die Anwesenheit magnetischer Felder verlängert werden können. Dies geschieht durch die Behinderung eines Mechanismus (radical pair mechanism), durch den freie Radikale spontan in eine unschädliche Konfiguration übergehen. In seinem Vortrag hat er ein System entwickelt, das zwei sich unterstüt-

zende Mechanismen enthält, über die die schwachen Magnetfelder möglicherweise wirken könnten:

1. Die Lebensdauer der freien Radikalen wird erhöht.
2. Die Melatoninkonzentration wird erniedrigt.

Folgt man diesem Denkmodell, dann kann man feststellen, daß Magnetfelder die schädigende Wirkung der freien Radikalen erhöhen würden und daß sie die Abwehrmechanismen herabsetzen.



Priv.-Doz. Dr. Rainer Meyer vom Physiologischen Institut der Universität Bonn (Foto: René Füllmann)

Allerdings hat Professor Reiter in der Diskussion eingeräumt, daß die experimentellen Befunde, die diese Thesen stützen, zur Zeit noch eher schwach sind.

In einer Studie von Reszka und Mitarbeitern wurde nochmals die Eigenschaft des Melatonins als Fänger freier Radikaler bestätigt. Dabei wurde auch darauf hingewiesen, daß Melatonin als sehr gut fettlösliche Substanz sich möglicherweise in Zellmembranen anreichern und hier wesentlich höhere Konzentrationen erreichen könnte als die im Blut gemessenen.

Freie Radikale unter elektromagnetischen Feldern

In Zusammenhang mit den Thesen von Reiter sind auch Arbeiten zu sehen, die sich mit der Entstehung und Lebensdauer von freien Radikalen beschäftigen. Die Vorstellung, daß in Anwesenheit von magnetischen Feldern die Lebensdauer freier Radikalen verlängert wird, wurde von einer kanadischen Arbeitsgruppe, Scaiano und Mitarbeiter, bestätigt. Sie zeigten in einem „in vitro“-System, also einem synthetischen System, daß sich die Lebensdauer von freien Radikalen aufgrund einer Beeinflussung des „radical pair mechanisms“ durch Anwesenheit eines 137 mT-Feldes verlängern läßt – näheres über die Feldparameter wird nicht erwähnt, wahrscheinlich handelte es sich um ein Gleichfeld. Die verwendete Flußdichte liegt allerdings über den in der Umgebung üblichen. Ein anderer Beitrag der gleichen Arbeitsgruppe beschäftigte sich mit der Wirkung von Magnetit auf diesen Mechanismus. Magnetit ist ein ferromagnetischer Kristall (Fe_3O_4), der von Menschen und Tieren aufgenommen und in Zellen eingebaut wird. Die Lebensdauer freier Radikaler verringerte sich „in vitro“ durch die Zugabe Magnetit sowohl in Abwesenheit als auch in Anwesenheit eines 500 mT-Feldes – ein eher unerwartetes Ergebnis nach Aussage der Autoren.

Freie Radikale werden von Zellen des Immunsystems auch gezielt zur Abtötung von Bakterien und Zellen synthetisiert, etwa durch eine Gruppe von weißen Blutzellen, die neutrophilen Granulozyten. Diese sind hauptsächlich als Freßzellen bekannt, die schädliche Bestand-

teile im Körper aufnehmen und verdauen. Daneben können sie aber auch Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und das Superoxidanionenradikal synthetisieren. Diese Synthese freier Radikaler ist empfindlich für ionisierende Strahlung. Das Auftreten der freien Radikalen läßt sich in vivo in der Zelle mit einem Fluoreszenzfarbstoff nachweisen. An neutrophilen Granulozyten der Ratte zeigte eine amerikanische Arbeitsgruppe, Noda und Mitarbeiter, daß sich die Synthese der freien Radikalen durch Gabe von bestimmten Stimulanzien induzieren läßt und daß der Anstieg dieser freien Radikalen in den lebenden Zellen direkt gemessen werden kann. Führt man die Stimulation und die Messung in Anwesenheit eines magnetischen Wechselfeldes von $100 \mu T$, 60 Hz durch, dann läßt sich eine um 12,5 % erhöhte Fluoreszenz messen, wodurch ein erhöhtes Auftreten der freien Radikalen im Magnetfeld nachgewiesen wird. Ob hier allerdings eine Beeinflussung der Stoffwechselmechanismen vorliegt, die die freien Radikalen synthetisieren, oder der „radical pair mechanism“ verändert wird, bleibt noch offen. Den gleichen Mechanismus mit vergleichbarer Methodik haben auch Brix und Mitarbeiter untersucht, jedoch an menschlichen neutrophilen Granulozyten. Die Stimulation der menschlichen Granulozyten bewirkt in Kombination mit einem hohen elektrischen Feld (200 V/m, 50 Hz) eine um 40 % erhöhte Produktion von freien Radikalen im Vergleich zu Zellen, die nicht im Feld waren. Möglicherweise etabliert sich hier ein neuer Aspekt der Untersuchung der Wirkungen elektromagnetischer Felder.

Inwieweit die Beeinflussung des „radical pair mechanisms“ als Er-

klärungsmöglichkeit der beobachteten Wirkungen elektromagnetischer Felder tauglich ist, wurde in zwei Beiträgen von Walleczek und Eichwald untersucht. Hier stand einmal die Frage im Vordergrund, ob die vielen Effekte, die sich auf schmale Bereiche aus dem Frequenz- oder Intensitätsspektrum des Feldes, sogenannte Fenster, beschränken, mit der Veränderung des „radical pair mechanisms“ in Einklang zu bringen sind. Dies ist möglich, wenn man ein nichtlineares Verhalten der biologischen Systeme annimmt, für die Walleczek in seinem Hauptvortrag Beispiele gezeigt hat. Der zweite Beitrag der beiden Autoren betrachtete die Frage, ob mögliche kleine Verschiebungen in der Lebensdauer freier Radikaler, die durch verhältnismäßig geringe magnetische Felder hervorgerufen werden, ausreichen, um meßbare Effekte zu erzielen. Sehr kleine Effekte magnetischer Felder auf die freien Radikalen können durch Enzymsysteme verstärkt werden, wie die Autoren am Beispiel der 1994 von Harkins und Grissom in „Science 263“ publizierten Ergebnisse belegten. Eine Reihe von bekannten biologischen Reaktionen in Zellen produziert als Zwischenstufe freie Radikale. Derartige Reaktionen müßten sich also theoretisch durch magnetische Felder beeinflussen lassen. Eine solche Reaktion wählten Harkins und Grissom für ihre Untersuchungen aus. Sie konnten zeigen, daß eine Reaktion, die von Ethanolamin Amonium Lyase katalysiert wird, auf Gleichfelder von 50 und 200 mT empfindlich reagiert. Die Beeinflussung dieser Reaktion erfolgt über den „radical pair mechanism“. Theoretische Modelle, wie das von Eichwald und Walleczek vorgestellte, sind zwar für die Planung neuerer Experimente hilf-

reich, jedoch können sie die Befunde selbst höchstens plausibler, aber nicht „sicherer“ machen. Zur Zeit liegt das Hauptproblem der Befunde zur Beeinflussung biologischer Systeme durch elektromagnetische Felder darin, daß sie noch nicht ausreichend erhärtet sind.

Nächtliche Melatonin-freisetzung

In einer etwas größeren Gruppe von Arbeiten wurde dem zweiten von Reiter postulierten Mechanismus, der Verringerung der nächtlichen Melatoninfreisetzung unter Einwirkung magnetischer Felder, nachgegangen. Dieser im Tiermodell schon mehrfach bei Hamstern und Ratten gezeigte Feldeinfluß wurde in einer umfangreichen Studie mit $100 \mu T$ 60 Hz-Feldern nochmals an Ratten von der Arbeitsgruppe von Reiter bestätigt. Diese Befunde stehen auch in Übereinstimmung mit neueren Ergebnissen aus der Literatur. Eine ungarische Forschergruppe, die versuchte, das Melatonin im Urin von Ratten zu bestimmen, konnte zwar keinen Einfluß eines $100 \mu T$ 50 Hz-Feldes feststellen. Diese Studie muß jedoch wegen der sehr kleinen Tierzahlen und des fehlenden Nachweises der Empfindlichkeit des eingesetzten Meßverfahrens als zweifelhaft eingestuft werden.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus den Tierversuchen, wo sich die Unterdrückung der nächtlichen Melatoninfreisetzung in den Untersuchungen zu stabilisieren scheint, sind die Ergebnisse beim Menschen noch recht uneinheitlich. Eine Arbeitsgruppe, Grahem und Mitarbeiter, hat ihre eigenen Ergebnisse nicht reproduzieren

können. Die kürzlich publizierte Beobachtung, daß während der Nacht angewendete 20 μT 60 Hz-Felder bei Männern mit niedriger Melatoninkonzentration im Blut den nächtlichen Melatoninanstieg hemmen, konnte von der gleichen Arbeitsgruppe in einer sorgfältig angelegten Studie nicht bestätigt werden. Befunde einer deutschen Arbeitsgruppe, Reißerweber und David, konnten auch keine Beeinflussung des nächtlichen Melatoninanstiegs von Schichtarbeitern eines Kraftwerks feststellen, die an ihrem Arbeitsplatz relativ großen 50 Hz-Feldern ausgesetzt waren (bis 30 μT). Allerdings fehlten in dieser Studie gute Kontrollmessungen, so daß ein möglicher Einfluß eventuell auch übersehen wurde. Im Gegensatz zu dieser Studie steht eine Untersuchung von Burch und Mitarbeitern an Arbeitern in Kraftwerken aus den USA. Eine vorläufige Auswertung der Daten von 35 Personen aus einem Kollektiv von 200 Arbeitern läßt eine Reduktion der nächtlichen Melatoninfreisetzung durch die erhöhte Exposition im Feld während der Arbeit möglich erscheinen. Allerdings handelt es sich hier noch um eine vorläufige Auswertung. Einen ähnlichen Befund erzielte eine japanische Forschergruppe, Kurokawa und Mitarbeiter, die vier Probanden für 11 Wochen auf einer elektrischen Heizdecke schlafen ließ. Dabei wurde der Strom so niedrig gehalten, daß es nicht zu einer Erwärmung kam, jedoch ein Feld von 3,4 μT entstand. Zwischen der 6. und 11. Woche der Exposition ergab sich bei drei Probanden eine Unterdrückung des nächtlichen Melatoninanstiegs um ca. 50 %, bei der vierten Person nahm das Maximum zwar nicht ab, aber es verschob sich in den Tag. Diese Befunde sind von Interesse, aber auf-

grund der kleinen Stichprobe nicht von wirklicher Aussagekraft.

Neben den Untersuchungen zur Melatoninfreisetzung im intakten Organismus, wurden auch eine Reihe von Experimenten zur Erforschung der Wirkungsmechanismen von Melatonin an Zellmodellen durchgeführt. Der Aspekt der Unterdrückung der nächtlichen Melatoninfreisetzung wurde von Rosen und Mitarbeitern an isolierten Zellen nachvollzogen. Sie untersuchten den Einfluß von 50 μT 60 Hz-Feldern auf die Melatoninfreisetzung von isolierten Pinealozysten aus Ratten. Es zeigte sich, daß dieses Feld ausreichte, um die durch Noradrenalin induzierte Melatoninproduktion um 55 % zu verringern – ein Befund, der andeutet, daß die Felder direkt auf das Pinealorgan wirken und nicht indirekt.

Melatonin und Brustkrebs

Ein erheblicher Teil der Untersuchungen an Zellmodellen beschäftigte sich mit der Einwirkung von Melatonin auf Brustkrebszellen. Dies ist im Zusammenhang mit Tierversuchen zu sehen, bei denen ein schnelleres Wachstum von Brustkrebs, eine verstärkte Krebspromotion, unter einem Magnetfeld bei Ratten gezeigt wurde, denn Melatonin wirkt auf Mammakarzinome wachstumshemmend. Eine Verringerung der nächtlichen Melatoninfreisetzung könnte also das beobachtete schnellere Wachstum erklären. In den in Victoria vorgestellten Untersuchungen wurde die Wirkung von Melatonin auf die Brustkrebszelllinie MCF-7 untersucht. Melatonin und Tamoxi-

fen, ein in der Therapie des Mammakarzinoms eingesetztes Antiestrogen, verringern die Teilungsrate der MCF-7-Zellen. Dieser das Wachstum von Brusttumoren verlangsamende Einfluß läßt sich durch Magnetfelder von 60 Hz vermindern, wie Harland und Liburdy in Boston 1995 zeigten. Die Autoren haben auf diesem Gebiet weitergearbeitet und die Befunde bestätigt und erweitert. Der Effekt ließ sich durch Magnetfelder von 60 Hz ab einer Flußdichte von 1,2 μT erzielen, wenn das Feld wenigstens drei Tage angewendet wurde. Dieser Befund wurde von Blackman und Mitarbeitern zwischenzeitlich reproduziert und auch von Luben und Mitarbeitern. Zusätzlich wurde von Liburdy und seiner Arbeitsgruppe gezeigt, daß auch 60 Hz-Sägezahn-Felder, die im Feldspektrum von Video-Monitoren enthalten sind, die Wirkung von Melatonin auf MCF-7-Zellen verringern können. Anscheinend liegt hier ein Befund vor, den man in der nächsten Zeit noch beobachten muß. Die mehrfache Reproduktion durch unterschiedliche Arbeitsgruppen sichert die Ergebnisse ab. Wenn diese Ergebnisse sich weiterhin bestätigen sollten, würde dies einen zweiten Erklärungsansatz für das im Tierversuch gezeigte schnellere Wachstum von Brusttumoren im niederfrequenten Magnetfeld eröffnen. Das Feld würde nicht nur die Melatoninfreisetzung selbst verringern, sondern auch die Wirkung von Melatonin auf den Tumor beeinträchtigen.

Melatonin und Nervenzellen

Wie weit das Spektrum der durch Melatonin beeinflussten Untersu-

chungen inzwischen reicht, zeigt sich an einer Studie von Leman und Mitarbeitern, die sich mit der Entwicklung von Nervenzellen beschäftigt. Nervenzellen besitzen lange Ausläufer, entlang derer die elektrischen Informationen sowohl zur Zelle hin (Dendriten) als auch von der Zelle weg (Axone) geleitet werden. Während der Entwicklung, Differenzierung, von der embryonalen Nervenzelle zur erwachsenen Zelle werden diese Ausläufer angelegt. Schon seit längerem gibt es Untersuchungen, die zeigen, daß elektromagnetische Felder unterschiedlichster Frequenzen die Differenzierungsvorgänge von Nervenzellen beschleunigen können. Dies könnte eventuell zur Verbesserung der Regeneration von Nerven nach Verletzungen in der klinischen Behandlung genutzt werden. Die Kombination von Melatonin mit gepulsten hochfrequenten Feldern von 27 MHz, Pulsdauer 65 µs 80 Pulse/s, erwies sich hier als noch günstiger als der Einsatz der Felder allein oder der Einsatz von einem für Nerven spezifischen Wachstumsfaktor.

Verglichen mit den Beiträgen aus früheren Jahren hat sich das Schwergewicht der am Melatonin orientierten Beiträge offensichtlich weg von der Wirkung des Melatonins als Antiöstrogen hin zu seiner Wirkung als Fänger freier Radikaler verschoben. Ganz sicher wird dieser Forschungsbereich auch in den kommenden Jahren noch eine wichtige Rolle spielen. Bemerkenswert ist auch, daß im Bereich der Untersuchungen zu Melatonin und freien Radikalen die hochfrequenten elektromagnetischen Felder, mit Ausnahme der zuletzt genannten Studie, keine Rolle spielten.

Zelluläre Signalübertragung

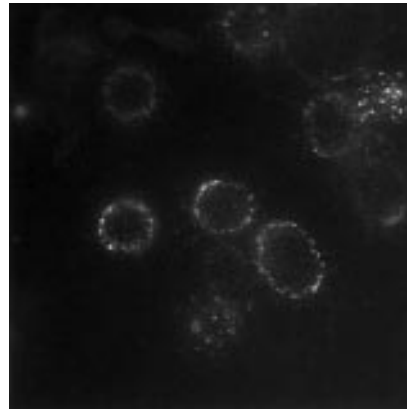
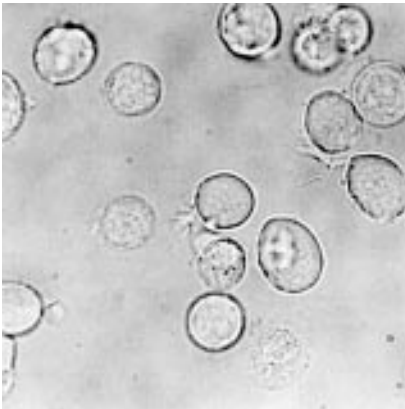
Neben den bisher behandelten Beiträgen, hat in den vergangenen Jahren auch die Beeinflussung der zellulären Signalübertragung durch elektromagnetische Felder großen Raum eingenommen. Die zelluläre Signalübertragung besteht aus hintereinander geschalteten Stoffwechselreaktionen, die meistens an der Zellmembran beginnen und über verschiedene Schritte schließlich zur Anschaltung eines sogenannten Zielgenes führen. Ein erster Schritt kann in der Beeinflussung der intrazellulären Kalziumkonzentration und/oder der des Botenstoffes cAMP bestehen. In einem zweiten Schritt werden bestimmte Enzyme aktiviert. Das kann zum Anschalten von Proto-Onkogenen führen, die selbst die Synthese von neuen Botenstoffen einleiten, deren Wirkung dann die Anschaltung der eigentlichen Zielgene hervorruft. Proto-Onkogene sind Gene, deren Anschaltung die Entstehung oder das Wachstum von Krebs begünstigen können.

In der Sitzung, die sich speziell mit der Interaktion zwischen elektromagnetischen Feldern und Kalzium beschäftigte, tauchte die Expositionseinrichtung mit gepulsten 27 MHz-Feldern wieder auf. Es wurden zwei Auswirkungen dieser Felder vorgestellt, eine direkt auf eine enzymatische Reaktion und eine auf dem Niveau von Zellen, nämlich die schon erwähnte Differenzierung von Nervenzellen. Bei dem Einfluß auf das zellfreie Enzymsystem handelt es sich um die Myosin-Phosphorylierung. Diese Reaktion wird durch Kalzium moduliert: Je höher die Kalziumkon-

zentration ist, desto mehr Kalzium verbindet sich mit dem Aktivator der Reaktion, dem Kalmodulin. Je mehr Kalzium-Kalmodulin-Komplexe anwesend sind, desto mehr Myosin wird umgebaut; es wird eine Phosphatgruppe angehängt. Wenn die Reaktion durch eine hohe Kalziumkonzentration gesättigt ist, dann zeigen die genannten Felder keinen Effekt. Bei niedrigeren Kalziumkonzentrationen, wenn die Reaktion unterhalb der Sättigungsgrenze ist, dann bewirkt die Einwirkung des Feldes von 350 µT eine Steigerung um 100 %. Es wurde nochmals auf die Untersuchungen zum Auswachsen von Nervenzellen eingegangen, diesmal auf die Versuche mit dem Wachstumsfaktor für Nerven. Auch hier zeigte das Feld – wenn die Konzentration des Wachstumsfaktors unterhalb der Sättigungsgrenze war –, wie auch schon beim Melatonin, einen steigenden Einfluß.

Signalübertragung an weißen Blutzellen

Ein anderer Aspekt Kalziumgesteuerter Signalübertragung ist die Immunstimulation einer bestimmten Gruppe von weißen Blutzellen, der T-Lymphozyten, über den T-Zell-Rezeptor. Bindet ein Molekül am T-Zell-Rezeptor, dann kommt es zu einer Erhöhung der intrazellulären Kalziumkonzentration, die zum Teil zu oszillierenden Kalziumwellen führt. Dies leitet dann die Immunantwort dieser Zellen ein, die u.a. in ihrer Teilung, aber auch in der Freisetzung von bestimmten Botensubstanzen wie Interleukin besteht. Die Stimulation der T-Lymphozyten steht schon lange im Verdacht, empfindlich für niederfrequente Magnet-



Darstellung der Bindung eines Anti-CD3-Antikörpers an isolierte Lymphozyten. Im Hellfeldbild (links) sind die runden Zellen gut erkennbar. Die Markierung mit dem Antikörper tritt im Bild rechts als punktierte Fluoreszenz in Erscheinung. (Bilder: Uni Bonn)

felder zu sein. Dabei veröffentlichte die schwedische Arbeitsgruppe um Lindström schon mehrfach, daß der T-Zell-Rezeptor in der Zellmembran allein durch die Anwesenheit eines 50 Hz 50-300 μ T-Magnetfeldes stimuliert werden kann und so Oszillationen der intrazellulären Kalziumkonzentration eingeleitet werden. Diese Untersuchungen wurden an einer T-Zelllinie, den Jurkat-Zellen, vorgenommen. Eine amerikanische Gruppe, Wey und Mitarbeiter, versucht zur Zeit, diese Untersuchungen zu reproduzieren. Sie konnte in Victoria aber nur sehr vorläufige Daten zeigen, die noch keine klare Aussage zulassen. Meine Arbeitsgruppe hat über mehr als drei Jahre ohne Erfolg versucht, die Ergebnisse von Lindström und Mitarbeitern zu reproduzieren. Unsere Ergebnisse wurden allerdings schon in Boston 1995 und nicht mehr in Victoria gezeigt. Da die Ergebnisse von Lindström und Mitarbeitern recht sensationell sind, bedürfen sie dringend einer Bestätigung, die bisher niemanden gelungen ist. Ein bemerkenswerter Beitrag zu diesem Thema wurde von einer schwedischen Arbeitsgruppe vorgestellt, an der auch ein Mitarbeiter aus

der ehemaligen Arbeitsgruppe von Lindström beteiligt war. Mattsson und Mitarbeiter untersuchten das Anschalten der Proto-Onkogene v-fos, c-jun und v-myc in Jurkatzellen nach einer Magnetfeldbehandlung, die genau der Situation entsprach, in der Lindström und Mitarbeiter Kalziumoszillationen ausgelöst hatten. Sie stellten keine Wirkung der Magnetfelder auf die Anschaltung der Proto-Onkogene fest. In Positivkontrollen konnten sie aber chemisch eine entsprechende Stimulation erzielen. In ihrem Schlußsatz stellen sie die Frage, ob die von Lindström und Mitarbeitern beobachteten Einflüsse überhaupt zu einer biologischen Wirkung führen.

Ein etwas anderer Versuchsansatz auf dem Gebiet der T-Zellstimulation wurde auch schon in Boston von Liburdy und Eckert vorgestellt. Sie haben untersucht, ob die Bindung von stimulierenden Molekülen am T-Zell-Rezeptor durch die Anwesenheit eines niederfrequenten Feldes beeinflusst werden kann. Auch diese Experimente wurden wieder an T-Jurkat-Zellen durchgeführt. Die Autoren haben schon letztes Jahr vorgetragen, daß die

Bindung eines bestimmten Moleküls, eines Anti-CD3-Antikörpers, an den T-Zell-Rezeptor erleichtert wird, wenn ein Magnetfeld von 100 μ T, 50 Hz anwesend ist. Diese Beobachtung haben sie in diesem Jahr erhärtet und durch den Einsatz eines zweiten Antikörpers bestätigt. Zusätzlich wurde die Untersuchung von einer anderen Arbeitsgruppe, Balcavage und Mitarbeiter, reproduziert, allerdings in Zusammenarbeit mit Liburdy und Eckert. Auch wenn hier keine wirklich unabhängige Reproduktion vorliegt, so wurden die Ergebnisse zumindest an einem anderen Ort und von anderen Wissenschaftlern bestätigt.

Eine Reihe von anderen Untersuchungen hat sich auch mit Reaktionen von Lymphozyten auf magnetische Felder beschäftigt. So wurde z.B. von Scarfi und Mitarbeitern untersucht, ob frisch isolierte menschliche Lymphozyten, die zur Vermehrung stimuliert waren, nach einer Kultivierung in einem Magnetfeld von 0.5 bzw. 1 mT bei 50 Hz ein vermehrtes Auftreten von Mikrozellkernen zeigten. Dies hätte auf eine Schädigung des Genoms durch die Exposition im Feld hingedeutet. Eine solche Schädigung konnte nicht nachgewiesen werden. Vergleichbare Untersuchungen wurden auch schon vor einigen Jahren von Eberle und Mitarbeitern in Deutschland durchgeführt; sie hatten ähnliche Ergebnisse. Die Befunde decken sich mit der allgemeinen Ansicht, daß schwache niederfrequente magnetische Felder allein keine Veränderungen an dem Genom bewirken. Dieser Befund wurde auch durch Untersuchungen an Zelllinien aus der Luftröhre der Ratte bestätigt, hierbei handelte es sich allerdings nicht um Lymphozyten. In dieser

Untersuchung von Lagroye und Poncy aus Frankreich wurde zusätzlich der Einfluß von ionisierender Strahlung untersucht. Wie zu erwarten, ergab sich zwischen dem Auftreten der Mikrokerne und der Dosis der ionisierenden Strahlung ein linearer Zusammenhang. Wurden nun die Kulturen, die vorher einer ionisierenden Strahlung ausgesetzt waren, zusätzlich einem 100 μ T 50 Hz-Magnetfeld ausgesetzt, dann hatte dies eine zusätzliche Erhöhung der Zahl der Mikrokerne zur Folge. Ein synergistischer Einfluß von ionisierender Strahlung und niedrigfrequenten Feldern wurde hier nach Ansicht der Autoren beobachtet. Derartige Vorstellungen wurden schon mehrfach in der Literatur diskutiert.

Kindliche Leukämie betrifft meistens die Vorläuferzellen der B-Lymphozyten, den T-Lymphozyten nahestehende weiße Blutzellen. Nach den epidemiologischen Studien könnte man vermuten, daß B-Lymphozyten-Vorläufer empfindlich für magnetische Felder sind. Dieser Hypothese wurde von Ukun und Mitarbeitern nachgegangen. Sie haben gezeigt, daß ein von Kalzium abhängiges Enzymsystem, die Proteinkinase C durch 60 Hz-Felder ungenannter Flußdichte angeregt wird. Dieses Enzymsystem ist in die Steuerung von Wachstumsvorgängen in Zellen eingebunden. Auch wenn diese Studie noch sehr vorläufig erscheint, könnte sich hier noch ein interessantes Untersuchungsgebiet ergeben.

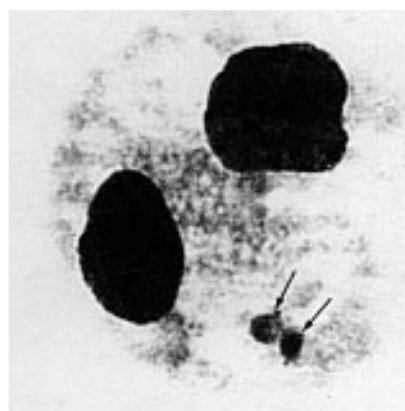
Zu den Untersuchungen an Lymphozyten gehört auch die von Mevissen und Mitarbeitern. Sie haben Ratten zwischen 2 und 13 Wochen in einem 100 μ T 50 Hz-Feld gehalten. Anschließend wurden

aus der Milz Lymphozyten isoliert und stimuliert. Ihre Antwort auf die Stimulation wurde an Hand der Vermehrung der Zellen beobachtet. Lymphozyten aus Tieren, die kurze Zeit (2 Wochen) im Feld waren, zeigten eine verbesserte Stimulierbarkeit, gemessen wurde eine bis zu 250 % schnellere Vermehrung. Je länger die Tiere im Feld gehalten wurden, umso stärker ging die Stimulierbarkeit der Lymphozyten zurück. Zellen von Tieren, die sich 13 Wochen im Feld aufgehalten hatten, zeigten schließlich eine gegenüber den Kontrollen signifikant reduzierte Stimulierbarkeit. Das Immunsystem des intakten Organismus reagiert demnach möglicherweise auf die Exposition im Feld.

Proto-Onkogene in weißen Blutzellen

Seit letztem Jahr gibt es eine interessante Diskussion auf dem Gebiet der Beeinflussung von Blutzellen durch elektromagnetische Felder. Frau Goodman und Mitarbeiter hatten in einer Serie von Untersuchungen zwischen 1991 und 1994 publiziert, daß sich durch die Einwirkung von Feldern mit 5,7; 57 und 570 μ T und 60 Hz das Proto-Onkogen c-myc in HL60-Zellen anschalten ließ. Bei den HL60-Zellen handelt es sich um eine Leukämie-Zelllinie, also Blutzellen. Wenn die Befunde von Goodman und Mitarbeitern stimmen, läge hier eine mögliche Erklärung für das in epidemiologischen Studien zum Teil gezeigte vermehrte Auftreten von kindlicher Leukämie. Bereits im letzten Jahr gerieten die Befunde von Frau Goodman unter heftige Kritik. Im Mai 1995 wurden in der hoch angesehenen wissenschaftli-

chen Zeitschrift „Nature“ (375, S. 22-23) zwei Artikel veröffentlicht, die sich ausschließlich mit der Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse von Frau Goodman und Mitarbeitern beschäftigten. Beide Arbeitsgruppen zeigten, daß sie die Versuche nicht reproduzieren konnten. Sie bemängelten fehlende Kontrollexperimente in den Arbeiten aus der Gruppe von Frau Goodman und vermuten systematische



Zweikerniger humaner peripherer Lymphozyt mit zwei Mikrokernen und intaktem Cytoplasma (Bild: TU Braunschweig)

Fehler in ihren Arbeiten. Dieser Trend hat sich seitdem fortgesetzt; z.B. auf dem EBFA-Meeting diesen Winter in Nancy und auch auf der BEMS-Tagung. Drei amerikanische Arbeitsgruppen, 1. Buthod und Mitarbeiter, 2. Balcer-Kubiczek und Mitarbeiter sowie 3. Thurston und Saffer zeigten nochmals, daß die Daten von Frau Goodman und Mitarbeitern nicht reproduzierbar waren. Frau Goodman selbst, die auch anwesend war, stellte einige andere Befunde vor, hat aber keine eigenen Reproduktionen ihrer umstrittenen Ergebnisse gezeigt.

An Hand der genannten Beispiele zeigt sich, daß Untersuchungen an Lymphozyten und anderen Blutzellen auf vielfältige Weise durchge-

führt werden, daß sie zum Teil kontroverse Ergebnisse liefern und daß es noch zu früh ist, um wirklich klare Trends aus den vielen Experimenten herauszufiltern.

Proto-Onkogene in verschiedenen Zelltypen

Ein Beitrag von Löschinger und Mitarbeitern aus Deutschland beschäftigte sich mit dem Einfluß von 6 - 8 mT 20 Hz-Magnetfeldern auf die Signalverarbeitung in menschlichen Bindegewebszellen auf verschiedenen Ebenen. Es wurde der Einfluß des Feldes auf das Wachstum und die Differenzierung der Zellen, auf die intrazelluläre Kalziumkonzentration, auf das Anschalten des Proto-Onkogens c-myc und auf das Enzym Proteinkinase A, das wichtige regulatorische Funktionen im Zellstoffwechsel hat, verfolgt. Es ließen sich mit dem Feld Kalziumoszillationen in den Zellen induzieren, oder vorhandene stiegen in ihrer Frequenz, die Aktivität der Proteinkinase A wurde verdoppelt, das Proto-Onkogen c-myc wurde etwas seltener abgelesen. Der Befund bezüglich des Proto-Onkogens ist allerdings sehr unsicher und steht etwas im Widerspruch zu den Kalziumbefunden. Zu diesen Einflüssen auf den Stoffwechsel der Zellen paßte gut, daß das Feld die Teilung der Zellen verlangsamte und die Differenzierung, also die Entwicklung zu nicht mehr teilungsfähigen spezialisierten Zellen, beschleunigte. Bei dieser Untersuchung, die über mehrere Jahre durchgeführt wurde, zeigt sich der Einfluß des Feldes auf den verschiedenen Ebenen des Zellstoffwechsels. Wieso die Feldparameter so gewählt wurden und welche Hypothese zu einer Auswahl

des Zelltyps führte, bleibt allerdings unklar.

Von Phillips und Mitarbeitern aus der Arbeitsgruppe von Adey wird schon seit einigen Jahren der Einfluß von Feldern auf die Proto-Onkogene c-fos und c-myc untersucht. Dieses Jahr wurden Untersuchungen an PC12-Zellen gezeigt. PC12-Zellen sind eine Zelllinie neuronalen Ursprungs aus einem Tumor der Ratte. In diesen Zellen setzt der Wachstumsfaktor für Nervenzellen eine Kette von Stoffwechselreaktionen in Gang, die schließlich zur Anschaltung des Gens für c-fos führt. Dieses Gen läßt sich auch über eine Reihe von anderen Stoffwechselwegen, die von Kalzium und cAMP abhängen, anschalten. In der umfangreichen Untersuchung wurde eine große Menge von unterschiedlichen Flußdichten (0,125 - 100 μ T) bei 60 Hz magnetischen Feldern getestet. Das Feld entfaltete eine Wirkung, wenn das Gen für c-fos durch chemische Stimulation der verschiedenen Stoffwechselwege leicht angeschaltet war. Dann kam es unter dem Feld zu einer deutlichen Steigerung, um den Faktor 2 - 3. Bei maximaler Anschaltung des Gens für c-fos durch chemische Stimulation hat das Feld keine Wirkung mehr. Daraus leiten die Autoren die Hypothese ab, daß das niederfrequente Feld offenbar auch die entsprechenden Stoffwechselwege stimuliert. Eine ähnliche Untersuchung wurde auch mit hochfrequenten Feldern von der gleichen Arbeitsgruppe durchgeführt. Hier trat kein Effekt des Feldes auf (siehe unten).

In einer Arbeit von Siskin und Mitarbeitern wurde versucht, eine Induktion von Kalziumoszillationen in Zellen hervorzurufen, die Knochenzellen ähneln (Zelllinie ROS

17/2.8), Die Studie sollte ältere Ergebnisse von McLeod et al. 1991 reproduzieren. Die Reproduktion war schon in einer Studie, die die gleichen Autoren in Boston vorlegten, gescheitert. Die Autoren haben inzwischen die Studie noch erheblich ausgeweitet und ein sehr breites Spektrum von Feldparametern untersucht – die Flußdichte wurde zwischen 0,3 und 70 mT und die Frequenz zwischen 16 und 180 Hz variiert. Auch mit diesem Spektrum ist es nicht gelungen, die Ergebnisse zu reproduzieren.

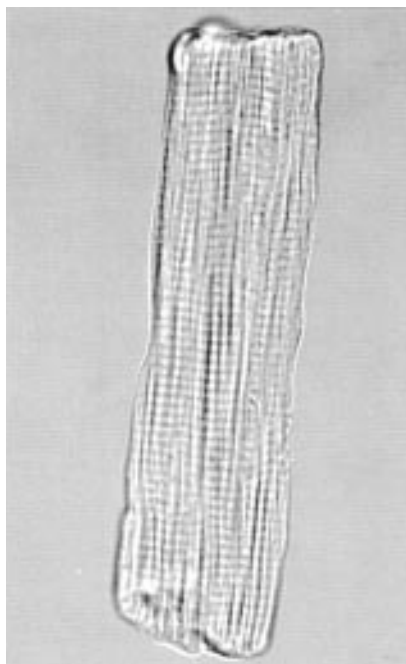
Wirkungen hochfrequenter Felder auf erregbare Zellen

Die bisher vorgestellten Beiträge betrafen im wesentlichen die Einflüsse von magnetischen Feldern niedriger Frequenzen. Die Beiträge über die Wirkungen hoher Frequenzen sollen nun im folgenden behandelt werden. Obwohl eine eigene Sitzung sich mit diesem Thema beschäftigte und auch in einigen anderen Sitzungen entsprechende Beiträge integriert waren, muß man feststellen, daß sich deutlich weniger Beiträge mit der biologischen Wirkung hoher Frequenzen beschäftigt haben als mit der niedrigeren Frequenzen.

Die sehr frühen Schritte in der Signalübertragung liegen in der Zellmembran, daher wurde in einer Studie meiner Arbeitsgruppe der elektrische Ionenstrom durch die Zellmembran unter dem Einfluß hochfrequenter Felder von 900 und 1800 MHz, gepulst nach dem GSM-Standard, untersucht. Es wurden Herzmuskelzellen des Meerschweinchens als Modell der erregbaren Zelle ausgewählt. Die elek-

trischen Potentiale, der Kalziumstrom und auch der Kaliumstrom jeweils einzelner Zellen wurden während der akuten Exposition im hochfrequenten Feld abgeleitet. Die Zellen wurden in Hohlleitern exponiert. Darin ergaben sich SAR-Werte von 250 mW/kg für 900 MHz sowie 490 mW/kg für 1800 MHz. In keinem Fall konnte ein Einfluß des Feldes nachgewiesen werden. In diesem Zellsystem zeigte sich also kein Einfluß eines gepulsten hochfrequenten Feldes auf den schon häufig als empfindlich verdächtigten Kalziumstrom, genausowenig wie auf die anderen gemessenen Parameter.

Ein anderes Modell der erregbaren Zelle stellen die schon erwähnten neuronalen PC12-Zellen dar. Wie bei den 60 Hz-Feldern hat die Gruppe von Adey die Anschaltung des Proto-Onkogens c-fos in PC12-Zellen auch unter dem Einfluß von hochfrequenten frequenzmodulierten 836 MHz-Feldern untersucht. Die Felder entsprachen dem amerikanischen analogen Mobiltelefonssystem. Die Expositionseinrichtung bestand aus Transversal-Elektromagnetischen-Zellen (TEM-Zellen). In dieser Expositionseinrichtung wurden die PC12-Zellen bei einem mittleren SAR-Wert von 2,3 mW/kg kultiviert, die Werte für die einzelnen Schalen schwankten dabei je nach Position in der TEM-Zelle zwischen 0,4 und 4 mW/kg. Die Expositionszeiten lagen bei 20 und 40 min. Es zeigte sich kein Einfluß des Feldes. Dieses Ergebnis stimmt mit einer Untersuchung überein, die auf der 16. BEMS-Tagung in Kopenhagen veröffentlicht wurde; hier wurden jedoch Felder nach dem amerikanischen Standard für „digitale“ Mobiltelefone – Time-Division-Multiple-Access (TDMA) – getestet.



Detailansicht einer isolierten Herzmuskelzelle. Die Querstreifung entsteht durch den regelmäßigen Aufbau der kontraktilen Elemente in diesen Zellen. (Bild: Uni Bonn)

Hochfrequente Felder und die Zellvermehrung

In zwei anderen Untersuchungen wurde der Einfluß hochfrequenter Felder auf ein anderes Stoffwechselsystem, das für die Zellvermehrung wichtig ist, untersucht: das Enzym Ornithin Decarboxylase (ODC). Die ODC ist für den sogenannten Polyaminstoffwechsel wichtig. Die ODC wird bei beschleunigter Zellvermehrung, wie in einem Tumor, aktiviert. Es gibt schon eine Reihe von Untersuchungen, die von einer Empfindlichkeit der ODC gegenüber elektromagnetischen Feldern berichten. In einer Untersuchung von Cain und Mitarbeitern – wieder aus der Arbeitsgruppe von Adey – zeigte sich, daß in einer Zelllinie von Bindegewebszellen die Aktivität der ODC erniedrigt wurde, wenn diese Zellen

für 2 Stunden einem TDMA-Feld in TEM-Zellen ausgesetzt wurden. Der Effekt trat nur bei einem SAR-Wert von 15 mW/kg auf und nicht bei 1,5 mW/kg. Die Autoren glauben, daß die 50 Hz-Pulsfrequenz, die in dem TDMA-Signal enthalten ist, für diese Reaktion verantwortlich ist. Diese Interpretation deckt sich gut mit der Ansicht der Autoren der zweiten Arbeit, die sich mit der ODC beschäftigt.

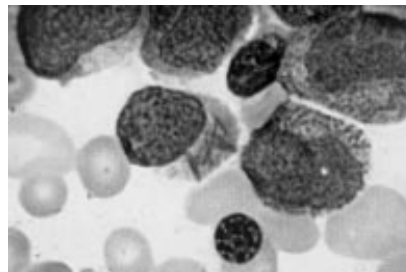
Litovitz und Mitarbeiter haben gezielt den Einfluß der Pulsung auf die ODC-Aktivität untersucht. Sie haben dabei ein anderes Zellsystem verwendet und erheblich stärkere Felder – die in ihren TEM-Zellen bei den eingesetzten 835 MHz zu einem SAR-Wert von 2,5 W/kg führten. Im Falle eines nicht modulierten kontinuierlichen Feldes oder im Falle einer Frequenzmodulation wurde kein Einfluß auf die ODC-Aktivität festgestellt. Bei einer Amplitudenmodulation mit 60 Hz oder einer Pulsung des Signals mit 50 Hz wurden hingegen signifikante Anstiege in der ODC-Aktivität gemessen. Auch wenn die Signale des „analogen“ – mit Frequenzmodulation arbeitenden – amerikanischen Mobiltelefonnetzes mit denen des „digitalen“ amerikanischen Mobiltelefonnetzes – TDMA – verglichen wurden, ergab sich wieder dieser Unterschied. Nur die TDMA-Signale steigerten die Aktivität der ODC, die frequenzmodulierten nicht. Die Autoren glauben, daß es im biologischen System zu einer Demodulation des niederfrequenten Signalanteils kommt und daß dieser sich genauso auswirkt wie ein niederfrequentes Signal allein. Diese These wird schon lange für die Interpretation von Wirkungen hochfrequenter Signale herangezogen. Die Autoren haben die These überprüft, in-

dem sie dem hochfrequenten Feld ein entsprechendes niederfrequentes magnetisches Rauschen überlagerten. Beide Komponenten hatten die Größe von $1 \mu\text{T}$. Das niederfrequente Rauschen verhinderte die Aktivierung der ODC, weil nach Ansicht der Autoren die Demodulation des 50 Hz-Anteils im TDMA-Signal jetzt unmöglich gemacht wurde. Vergleicht man diese beiden Untersuchungen, dann fällt auf, daß beide bei unterschiedlichen Zellsystemen mit dem TDMA-Signal eine Beeinflussung der ODC erzielten. Allerdings waren die SAR-Werte um einige Größenordnungen unterschiedlich, und die induzierten Effekte waren genau entgegengesetzt – einmal ein Abfall und einmal ein Anstieg in der Aktivität. Hier liegt also keineswegs ein so klarer Befund vor, wie es zuerst erscheint, jedoch ein Feld, das möglicherweise auch in Zukunft beachtet werden muß.

Im Gegensatz zu diesen Untersuchungen wurde in einer Untersuchung aus Berlin von Fitzner und Mitarbeitern kein Einfluß auf das Zellwachstum von HL60-Zellen festgestellt. Diese Zellen wurden für 24, 48 und 72 Stunden in 900 und 1800 MHz-Feldern gepulst mit 217 Hz nach dem GSM-Standard in Gigahertz-TEM-Zellen kultiviert. Die Flußdichte lag mit $0,6 \mu\text{T}$ bei 900 MHz bzw. mit $1 \mu\text{T}$ bei 1800 MHz in der gleichen Größenordnung wie bei den vorher beschriebenen Untersuchungen von Litovitz und Mitarbeitern.

In einer Untersuchung von Malypaga und Mitarbeitern, in der mehrere amerikanische Arbeitsgruppen zusammenarbeiteten, wurde untersucht, ob es unter dem Einfluß von 835 MHz-Feldern direkte Schädigungen des Genoms

von kultivierten Bindegewebszellen gibt. Die eingesetzte Applikationseinrichtung, „radial transmission lines“, erlaubt nach Aussage der Autoren homogene SAR-Werte von $0,8 \text{ W/kg}$. Es wurden unterschiedliche 835 MHz-Felder getestet: kontinuierliche und nach amerikanischem Standard für Mobiltelefone frequenzmodulierte sowie gepulste, hier nach „code domain multiple access“ (CDMA). Die Zellen



Promyelozytenleukämie (Knochenmark x 1500) (aus: Newsletter Edition Wissenschaft, Ausgabe 1/95)

wurden für 2, 4 und 24 Stunden den Feldern ausgesetzt. Ein direkter Einfluß auf das Genom wurde nicht nachgewiesen.

Hochfrequente Felder und das Gehirn

Der wohl interessanteste und auch aufwendigste Beitrag bezüglich hochfrequenter Felder wurde von Adey vorgetragen. Er entstand durch die Zusammenarbeit einer Reihe von Arbeitsgruppen aus den USA und der Gruppe von Kuster aus der Schweiz. Es wurde die Wirkung von hochfrequenten Feldern getestet, die von Mobiltelefonen nach dem amerikanischen TDMA-Standard abgegeben werden. In einem Tierexperiment mit 236 Ratten sollte die Beeinflussung von Hirntumoren untersucht werden.

Die Untersuchung wurde an Fischer-Ratten, einem besonders empfindlichen Inzuchtstamm, durchgeführt. Bei einer Hälfte der Tiere wurde ein Hirntumor durch Injektion von Ethylnitrosoureat induziert, den anderen Tieren wurde nur eine harmlose Lösung injiziert. Die Tiere wurden auf vier Untergruppen aufgeteilt. In zwei Gruppen waren Tiere mit induziertem Tumor, in den beiden anderen die ohne. Eine der Gruppen mit Tumorinduktion und eine ohne wurden dem Feld ausgesetzt, die beiden anderen Gruppen dienten als Kontrollen. Mit der Exposition der Tiere wurde bereits im Mutterleib fünf Tage vor ihrer Geburt begonnen. Hier wurde ein Fernfeld angewendet, welches einen errechneten SAR-Wert im Gehirn des Foetus von $0,29 \text{ W/kg}$ erzielte. Die Fernfeldexposition dauerte auch nach der Geburt bis zum 23. Tag an. Nach der Geburt lag der SAR-Wert im Gehirn bei $0,13 \text{ W/kg}$. Ab dem 35. Tag erfolgte 2 Stunden täglich vier Tage pro Woche eine Nahfeldexposition, um das Telefonieren nachzubilden. Während der 2 Stunden Exposition wurde das Feld abwechselnd 7,50 Minuten an und abgeschaltet. Nach 709-712 Tagen, fast ein normal langes Rattenleben, wurden die Tiere getötet und untersucht. Bis zum Ende des Versuches hatten 77 % der Tiere überlebt, die Überlebensrate war bei den Tieren, die im Feld exponiert waren jeweils höher als bei den Scheinexponierten, unabhängig davon, ob ein Tumor induziert war oder nicht. Bei der Untersuchung der Tiere zeigte sich, daß die Zahl der induzierten Tumoren etwas unter der statistischen Erwartung lag. Allerdings war sowohl das Auftreten von Tumoren, Tumorzinzidenz, als auch ihre Größe bei den Tieren, die dem Feld ausgesetzt

waren, verringert. Dies galt sowohl für die chemisch ausgelösten Hirntumore wie auch für solche, die spontan aufgetreten waren. Ein Einfluß des Feldes, der das Auftreten von Hirntumoren begünstigt oder ihr Wachstum beschleunigt, konnte nicht festgestellt werden. Allerdings sollten die relativ kleinen Tierzahlen pro Gruppe zu einer vorsichtigen Interpretation der Ergebnisse veranlassen. Dies gilt insbesondere für den die Gesundheit begünstigenden Einfluß des Feldes; denn die Verringerung der Tumorzahl und -größe war nicht statistisch signifikant. Der Versuch war so angelegt, daß er seine beste Trennschärfe bei einer Erhöhung der Tumorzahl und -größe erreicht und nicht bei einer Erniedrigung, so daß bei einer kleinen Erniedrigung auch keine Signifikanz zu erwarten war.

Eine französische Arbeitsgruppe, de Seze und Mitarbeiter, hat sich in zwei Beiträgen mit der Auswirkung des Mobiltelefonierens auf Hormone der Hypo- und Epiphyse beschäftigt. Die Hypophyse liegt als Hirnanhangsdrüse ebenso wie die Epiphyse im Kopf und befindet sich damit beim mobilen Telefonieren relativ dicht an der Antenne. Aus der Hypophyse wird eine große Zahl von Hormonen freigesetzt, die vielfältige Abläufe im Körper steuern. Der Versuchsansatz ist ebenso einfach wie wirksam. 20 Männer mußten täglich zwei Stunden mit einem GSM-Handy telefonieren – fünf Tage in der Woche vier Wochen lang. Um ihre Aufmerksamkeit für diese Zeit aufrecht zu erhalten, wurde einfach der Ton eines gleichzeitig im Fernsehen ablaufenden Films auf die Handys übertragen. Der SAR-Wert im Schläfenlappen des Gehirn wird mit 0,1 W/kg angegeben. Im

reich der Hypo- oder der Epiphyse müßte er niedriger sein. Von jedem Versuchsteilnehmer wurden täglich 17 Blutproben genommen, in denen dann eine große Zahl von unterschiedlichen Hormonen bestimmt werden soll. Die große Zahl von Proben ermöglicht auch die Darstellung des individuellen Tag/Nacht-Rhythmus für jedes Hormon und jede Person. Leider war die Untersuchung noch nicht abgeschlossen, aber das Hormon ACTH, adrenocorticotrophes Hormon, welches sehr empfindlich auf Verschiebungen im Tag/Nacht-Rhythmus reagiert, ist schon ausgewertet. Es zeigte sich kein Einfluß des Telefonierens auf das Hormon. Da auch Melatonin mit bestimmt werden soll, wird hier erstmals die Wirkung des Mobiltelefonierens auf dieses stark diskutierte Hormon untersucht werden.

In einem zweiten Beitrag hat die gleiche Arbeitsgruppe, offenbar aus einem etwas anderem Kollektiv von Testpersonen beim gleichen Versuchsansatz jeweils wöchentlich einen Wert für die Hormone ACTH, TSH (die Schilddrüse stimulierende Hormon), GH (Wachstumshormon), LH (luteinisierendes Hormon), FSH (Follikel stimulierende Hormon) und Prolactin bestimmt. Es zeigten sich keine Einflüsse des Feldes. Allerdings scheint dieser Versuch so grob, daß er wahrscheinlich nur als Testvorlauf für den großen Versuch anzusehen ist.

Fazit

Schaut man sich die Ergebnisse auf dem Gebiet der **hochfrequenten** Felder an, dann kann man keine beunruhigenden Befunde entdecken. Die einzi-

gen Arbeiten, die eine Wirkung zeigten, bezogen sich auf die ODC. Hier sind die Ergebnisse noch uneinheitlich und nicht reproduziert, so daß man abwarten muß, wie diese Ergebnisse weiter in der wissenschaftlichen Diskussion bestehen werden.

Bewertet man die **Konferenz allgemein**, dann stellt man fest, daß mehr Gewicht auf die Reproduktion von Studien gelegt wird als früher. Daraus ergibt sich natürlich die Hoffnung, daß irgendwann die Befunde hoher Qualität von den weniger guten unterschieden werden können. Auch wird sowohl von den Vortragenden wie von den Diskutanten zunehmend Wert auf gute Kontrollen gelegt. Zur Zeit stehen Melatonin und die Wirkung freier Radikaler im Mittelpunkt. Zwar sind die früher zentralen Fragen, wie Signalübertragung und Beeinflussung der weißen Blutzellen, immer noch Gegenstand vieler Untersuchungen, aber die Melatoninstudien haben zugenommen. Konkrete bedrohliche Gesundheitsgefährdungen sind zur Zeit weder bei den niedrigfrequenten noch bei den hochfrequenten Feldern zu erkennen. Wenn eine Gefährdung zu erwarten ist, dann scheint sie eher auf dem Gebiet der niedrigfrequenten Felder zu suchen sein. Insgesamt scheint das Niveau der Untersuchungen zugenommen zu haben.

Priv.-Doz. Dr. Rainer Meyer,
Physiologisches Institut der
Universität Bonn