

# Gesundheitliche Auswirkungen der Mikrowellen von Mobilfunkanlagen im D-Netz

J. Silny

Aachen, Juli 2000

## Inhaltsverzeichnis:

1.	Resümee	S. 3
2.	Zusammenfassung	S. 6
2.1	Dosimetrie	S. 6
2.2	Aktueller Wissensstand über gesundheitsschädigende Effekte	S. 8
3.	Problematik bei der Ermittlung des aktuellen Wissenstandes	S. 12
4.	Dosimetrie der Mobilfunksysteme	S. 14
4.1	Vergleich der Feldbedingungen im Alltag und in Experimenten	S. 14
4.2	Basisstationen	S. 15
4.3	Exposition durch Handys	S. 19
4.4	Auto-Funktelefonanlagen	S. 22
5.	Vorgehensweise bei der Darstellung und Bewertung der medizinisch/biologischen Literatur	S. 24
6.	Epidemiologische Studien	S. 27
7.	Einfluss der Mobilfunkfelder auf das Krebsgeschehen	S. 32
7.1	Aspekte des Krebsgeschehens	S. 32
7.2	Einfluss von Mikrowellen auf die Karzinogenese in Tierexperimenten	S. 33
7.3	Chromosomen-Mutationen und -Aberrationen	S. 38
7.4	Zellproliferation unter der Einwirkung von Mikrowellen	S. 42
7.5	DNA-Brüche unter der Einwirkung von Mikrowellen	S. 44
7.6	Genmutation und -expression unter der Einwirkung von Mikrowellen	S. 46
8.	Das Zentralnervensystem (ZNS) in den Feldern der Mobilfunkanlagen	S. 50
8.1	Relevanz und Verfahren	S. 50
8.2	Beeinflussung kognitiver Funktionen	S. 52
8.3	Einfluss der Mikrowellen auf den menschlichen Schlaf	S. 55
8.4	EEG unter der Einwirkung von Mikrowellen	S. 59
8.5	Tierverhalten	S. 62
8.6	Kalziumhaushalt des Hirngewebes	S. 66
8.7	Blut-Hirn-Schranke	S. 68
8.8	Neuroendokrines System und Hormone	S. 74
9.	Sinnesrezeptoren im Feld der Mobilfunkanlagen	S. 81
10.	Einfluss der Mobilfunkfelder auf elektronische Implantate	S. 85
11.	Literaturverzeichnis	S. 89
11.1	Literaturverzeichnis zu Kap. 3	S. 89
11.2	Literaturverzeichnis zu Kap. 4 bis Kap. 9	S. 90

## 1. Resümee

Aus dem aktuellen Anlass einer intensiven öffentlichen Diskussion über gesundheitsschädigende Wirkungen elektromagnetischer Felder der Mobilfunkanlagen wird eine Neubewertung von etwa 100 ausgewählten wissenschaftlichen Publikationen vorgenommen.

Bei der Fokussierung auf die Mobilfunkanlagen im D-Netz wird eine Auseinandersetzung mit den folgenden Gebieten als essentiell erachtet: Dosimetrie, Epidemiologie, Einflüsse der Mikrowellen auf das Krebsgeschehen, auf die Funktion des Zentralnervensystems, auf die Sinnesrezeptoren sowie auf die elektronischen Implantate. Die Literatur zur Bewertung des aktuellen Wissenstandes auf diesen Gebieten wird primär nach herkömmlichen wissenschaftlichen Qualitätskriterien ausgesucht.

Darüber hinaus werden auch einige Abhandlungen herangezogen, auf die die Verfechter des so genannten "Elektosmogs" häufig Bezug nehmen.

Messungen wie auch moderne Berechnungen zeigen, dass die beim Telefonieren mit Handys mit einer maximalen Leistung von 2 W im Kopfbereich direkt neben der Antenne lokal auf 1 g bzw. 10 g Körpermasse bezogene Spezifische Absorptionsrate (SAR) maximal 2 W/kg betragen kann. Die daraus resultierende Erwärmung kleiner Gehirnareale liegt im Bereich von wenigen 0.1 °C und sie ist, gemessen an physiologischen Veränderungen der Körpertemperatur, sehr klein und für den Wärmehaushalt des Körpers gänzlich vernachlässigbar.

Die maximale Stärke der von Basisstationen ausgehenden Mikrowellen ist in Deutschland gesetzlich durch die 26. Bundesimmissionsschutzverordnung (26.BimSchV) geregelt und ihre Einhaltung wird durch die Telekommunikations- und Post-Regulierungsbehörde überwacht. Messungen in unterschiedlichen Aufenthalts- und Lebensbereichen des Menschen zeigen übereinstimmend, dass hier die von Basisstationen gesendeten Mikrowellen mindestens um einen Faktor 1000 bis 10 000 schwächer sind als die Felder der Handys. Deshalb ist im Alltag eine nennenswerte Erwärmung des Körpers oder seiner Teile durch die Felder der Mobilfunkbasisstationen auch bei einer dauerhaften Exposition völlig ausgeschlossen.

Aus den umfangreichen Erkenntnissen über die thermischen Einflüsse der Mikrowellen, die als einzige Effekte hochfrequenter Felder experimentell belegt und theoretisch nachvollziehbar sind, lassen sich also keine Hinweise auf eine mutmaßliche gesundheitliche Beeinträchtigung des Menschen durch die Mobilfunkfelder ableiten. Es muss deshalb der Frage nachgegangen werden, inwieweit die in der Vergangenheit vereinzelt geäußerten Behauptungen von der Existenz athermischer Effekte unter der Langzeitwirkung schwacher Mikrowellen insbesondere durch die Krankheitsregister und die neue weltweite Literatur bestätigt wird.

Die Krankheitsregister zeigen keine konkreten Hinweise auf eine besondere Häufung von Erkrankungen, die mit der Mobilfunktechnik, die etwa vor 10 Jahren eingeführt wurde, in Zusammenhang gebracht werden könnten.

Die bisher durchgeführten epidemiologischen Untersuchungen haben sich mit der Beziehung zwischen den Mobilfunkfeldern und Gehirntumoren sowie subjektiven Beschwerden auseinandergesetzt. Sie konnten keinen statistisch signifikanten Zusammenhang belegen, obwohl im Vergleich zu den Basisstationen die stärkeren Felder der Handys herangezogen wurden. In diesen wie auch in den meisten experimentellen Studien wird davon ausgegangen, dass, wenn derartig starke Felder ohne Befund sind, eine Wirkung der 1000- bis 10 000-fach schwächeren Felder der Basisstationen unwahrscheinlich ist.

Zahlreiche Untersuchungen setzen sich mit den potentiellen Effekten der Mobilfunkfelder auf die Karzinogenese auseinander. Obwohl vereinzelt in in-vitro-Untersuchungen über Chromosom-Mutationen/Aberrationen und Zellproliferationen in Mikrowellen berichtet wird, lassen sich diese Effekte in der Mehrheit der Untersuchungen nicht bestätigen. Die gleiche Feststellung gilt für die Resultate der Experimente. Nur eine Studie mit transgenen Tieren deutet auf eine promovierende Wirkung starker Mikrowellen hin. Allerdings sind diese Ergebnisse in Wiederholung nicht bestätigt und darüber hinaus grundsätzlich nicht auf den Menschen übertragbar.

Aus initialen Untersuchungen des Zentralnervensystems wurde z.B. über EEG-Veränderungen, Einfluss auf die höheren kognitiven Funktionen oder auf den Schlaf durch die Mikrowellen berichtet. Replikationen dieser Untersuchungen mit größeren Versuchsgruppen und einer verfeinerten Versuchsmethodik konnten diese Wirksamkeiten nicht belegen.

Sinnesrezeptoren können nachweislich nur durch wesentlich stärkere Mikrowellen, als sie beim Mobilfunk Anwendung finden, beeinflusst werden.

Ungelöst ist nach wie vor die Problematik der möglichen Störungen von elektronischen Implantaten wie Herzschrittmacher oder Insulinpumpen durch die in einem geringen Abstand vom Körper betriebenen Handys. Die wesentlich schwächeren Felder der Basisstationen können dagegen keine derartigen Wirkungen ausüben.

Insgesamt betrachtet liefert die Gesamtheit der experimentellen Untersuchungen nur wenige vage Andeutungen auf mögliche athermische Wirkungen der Mobilfunkfelder, die auch durch Unzulänglichkeiten bei der Durchführung der Experimente erklärt werden könnten. Die absolute Mehrheit der Publikationen stützt die Existenz athermischer Effekte in Felder des Mobilfunks nicht, darüber hinaus fehlen auch nachvollziehbare Wirkungsmechanismen.

Auch die Behauptung, dass Kinder, ältere Menschen oder Kranke einer besonderen Gefährdung durch die Mobilfunkfelder ausgesetzt sind, wird in der Literatur nicht bestätigt. Die laufende wissenschaftliche Auseinandersetzung, die vorrangig auf athermische Effekte von Feldern, wie sie etwa bei Handys vorkommen, zielt, hat bisher keine konkrete

Bestätigung gebracht. Die wesentlich schwächeren Felder der Basisstationen müssen in Anbetracht der bisherigen Resultate als völlig harmlos angesehen werden.

Aus diesem Grund besteht kein Handlungsbedarf, die geltenden Sicherheitsgrenzwerte der 26. Verordnung zum Bundesimmissionsschutz (26. BimSchV) bezüglich des Mobilfunks zu ändern.

## Zusammenfassung

### 2.1 Dosimetrie

Messungen und theoretische Betrachtungen vermitteln uns ein klares Bild der Stärke der von Mobilfunkanlagen im D-Netz aufgebauten Felder in verschiedenen Alltagssituationen oder während der Benutzung von Handys.

Die Exposition des Menschen durch die Fern- und Nahfelder dieser Anlagen und die aufgenommene Energie sind Gegenstand einer Reihe von Publikationen der letzten 10 Jahre. Die älteren Arbeiten setzen sich, aus heutiger Sicht betrachtet, mit Hilfe rudimentärer Modelle, vorwiegend mit dem einfacheren Fall, dem Fernfeld, auseinander. Die jüngeren Publikationen hingegen beschäftigen sich fast ausschließlich mit dem Nahfeld der in Körpernähe, vor allem in der Nähe des Kopfes, betriebenen Handys. Diese Ausrichtung erscheint auch zweckmäßig, da die Exposition des Körpers durch die Felder der Handys zu wesentlich höheren SAR-Werten führt. Übereinstimmend zeigen experimentelle wie auch theoretische Untersuchungen, dass, je nach Handy-Typ, die SAR pro g Gewebe bzw. einzelner Organe, wie des Auges, im Bereich von bis zu maximal 2 W/kg liegt. Dagegen werden für die Fernfelder der Basisstationen theoretisch maximal wenige 100 mW/kg (Körperoberfläche 300 mW/kg, Auge 150 mW/kg, Gehirn 35mW/kg) ermittelt. In der Praxis werden diese auf die Grenzwerte bezogenen SAR-Werte sogar um einen Faktor 1000 unterschritten.

Die älteren Arbeiten zur Ermittlung der SAR-Werte bauen überwiegend auf Messungen in physikalischen Trogmodellen auf, wohingegen die jüngsten Arbeiten immer mehr auf numerische Berechnungsmethoden zurückgreifen. Diese Entwicklung lässt sich mit der Möglichkeit erklären, mit Hilfe numerischer Modelle die tatsächliche Anatomie des Körpers besser zu beschreiben und eine höhere Flexibilität bei der Wahl der elektrischen und dielektrischen Charakteristika der Gewebe zu erzielen. In den numerischen Modellen wird der menschliche Körper in einige Mio. finiter Volumina aufgeteilt, wodurch eine hohe räumliche Auflösung von bis zu 1 mm<sup>3</sup> (z. B. bei der Modellierung des Kopfes) erreicht werden kann. Trotz dieser hohen Auflösung sind viele anatomische und morphologische Feinheiten des Körpers, wie z. B. die stark verästelte Blutversorgung, nicht nachzubilden. Der hohen räumlichen Auflösung des Körpers steht allerdings eine sehr schlechte Auflösung bezüglich der elektrischen und dielektrischen Eigenschaften einzelner Gewebe und Organe gegenüber. Auch in den am weitesten entwickelten Modellen werden maximal 20 organbezogene Gewebearten mit festgelegten elektrischen und dielektrischen Eigenschaften berücksichtigt. Darüber hinaus werden von Publikation zu Publikation recht unterschiedliche frequenzbezogene Dielektrizitätszahlen und Leitfähigkeiten herangezogen, die z. T. durch Extrapolation oder Mittelung anderer Angaben gewonnen wurden. Die Verifizierung der Allgemeingültigkeit der einzelnen elektrischen und dielektrischen Kennwerte von Gewebe bei einer Frequenz von 900 MHz wurde bisher nicht vorgenommen.

Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass die Ergebnisse verschiedener Literaturstellen bis zu einem Faktor 5 variieren.

Obwohl in den Publikationen mehrfach behauptet wird, dass die elektrische und dielektrische Inhomogenität im Körper keinen großen Einfluss auf die Verteilung der Mikrowellen und die zu ermittelnden SAR-Werte ausüben, ist ein überzeugender Beleg dieser Annahme bisher ausgeblieben. Das Fehlen einer experimentellen Überprüfung der Ergebnisse am lebenden menschlichen Körper scheint ein allgemeines Defizit aller bisherigen Modellierungsansätze zu sein.

Trotz dieser Unsicherheiten bestätigt die Literatur eindeutig einige wichtige Zusammenhänge. Die im Fernfeld der Basisstationen exponierten Personen werden nur sehr schwachen Feldern ausgesetzt, die keine nennenswerte Erwärmung im Körper verursachen können.

Die in speziellen Situationen, z. B. bei bordeigener Telefonanlage im Auto, im Körper der Pkw-Insassen oder Passanten aufgebaute SAR ist der bisherigen Literatur nicht eindeutig zu entnehmen. Wegen eines größeren Abstandes zur Antenne der bordeigenen Anlage, als dies beim benutzten Handy der Fall ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Exposition auch hier deutlich schwächer als bei Handys ausfällt.

Die stärkste Exposition durch die Mobilfunkanlagen im D-Netz erfahren Nutzer von Handys. Je nach Konstruktion des Gerätes und der Antenne liegt die SAR bis zu knapp unterhalb der spezifischen Absorptionsrate von 2 W/kg. Unabhängig von der absoluten Ungenauigkeit der Messung bzw. Berechnung der SAR-Werte zeigt die Literatur eindeutig, dass durch konstruktive Maßnahmen die Exposition des Handy-Nutzers wesentlich verringert werden kann.

Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass auch die denkbar stärksten Felder von Handys mit ungünstigster Anordnung und denkbar schlechtesten Konstruktionsmerkmalen allenfalls eine Erwärmung des Körpers um 0.1°C in der unmittelbaren Nähe der Antenne verursachen könnten.

## 2.2 Aktueller Wissenstand über gesundheitsschädigende Effekte

Die primäre Zielsetzung dieser Abhandlung ist es, den aktuellen Wissenstand über eventuelle gesundheitsschädigende Wirkungen der Felder von Mobilfunkanlagen im D-Netz aufzuzeigen. Die dosimetrische Betrachtung der Stärke der Felder, wie sie im Alltag heute und wahrscheinlich auch in naher Zukunft von den D-Netz-Anlagen aufgebaut werden, bildet eine Grundlage, die es erlaubt, Bedingungen in Experimenten mit der Praxis zu vergleichen. Dieser Vergleich bildet eine wesentliche Komponente bei der Abwägung der Übertragbarkeit der vorwiegend in in-vitro-Untersuchungen oder in Tierexperimenten beobachteten Effekte auf den Menschen unter Berücksichtigung der jeweiligen Situation. Um die Möglichkeiten einer hypothetischen Wirkung der Mikrowellen auf den Organismus zumindest grob abzudecken, werden aus dem Spektrum der vorkommenden Stärken und der Einwirkdauer der Mobilfunkfelder zwei Extreme verfolgt, und zwar:

- a) eine Langzeitwirkung sehr schwacher Fernfelder der Basisstationen und
- b) eine Kurzzeitwirkung der mindestens 1000-fach stärkeren Nahfelder von Handys.

Eventuelle Langzeitwirkungen der Felder von Basisstationen können durch Auswertung von Krankheitsregistern und vor allem unter Zuhilfenahme epidemiologischer Studien eingeschätzt werden. Leider werden Krankheitsregister in Deutschland nur in wenigen Bundesländern, und dort auch noch nicht flächendeckend und auf nur wenige Erkrankungen konzentriert, geführt. Auch in Bezug auf die Krebsinzidenz und Krebsmortalität in Deutschland ist man auf Schätzungen angewiesen. Eine derartige Einschätzung wird vom Robert-Koch-Institut vorgenommen, wo auch Daten der letzten Schätzung aus dem Jahre 1999 vorliegen. Danach erkrankten in Deutschland etwa 340.000 Menschen jährlich an Krebs. Die meisten Krebsfälle treten im Alter von über 60 Jahren auf. Die geschätzte Zahl der Neuerkrankungen an Krebs hat sich gegenüber dem Jahr 1995 geringfügig um etwa 5000 Fälle erhöht. Ein Teil dieser Zunahme wird auf die Verlängerung des Lebensalters zurückgeführt, der größte Teil ist jedoch eindeutig in einer Erhöhung der Krebserkrankungen des Darmes und der Prostata bei Männern begründet. Bei Frauen ist eine erhöhte Zahl der Neuerkrankungen bei Brust- und Lungenkrebs zu beobachten. Die Inzidenz der Krebserkrankungen im Bereich des Gehirns bleibt nach wie vor, mit unter 3-4 Fälle pro 100.000, sehr niedrig. Aus der Abschätzung der Entwicklung der Krebshäufigkeit in Deutschland lässt sich also kein direkter Verdacht auf eine intensive gesundheitsschädigende Wirkung der Felder von Mobilfunkanlagen ableiten.

Aufgrund statistischer Erhebungen ist ersichtlich, welches Unterfangen epidemiologische Studien eingehen, die versuchen, mit Mobilfunkfeldern einen Kofaktor für das Krebsgeschehen zu belegen. Die Problematik wird anhand der vorgestellten epidemiologischen Studien deutlich. Gemessen an der niedrigen Inzidenz von Gehirntumoren, die in der Arbeitshypothese mit den Handy-Feldern als Kofaktor in Verbindung gebracht werden, ist



die Ausbeute der beiden vorgestellten epidemiologischen Studien zur Krebsinzidenz erwartungsgemäß sehr gering. Nur große prospektive Studien, die möglichst viele Lebensfaktoren und -umstände berücksichtigen und über mehrere Jahre hinweg durchgeführt werden, haben, falls überhaupt, die Chance, ein vertrauenswürdiges Ergebnis zu liefern. Noch problematischer erscheint die Situation der epidemiologischen Studien bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Mobilfunkfeldern und subjektiven Beschwerden wie Kopfschmerz, Müdigkeit, usw. Solange aber andere Ursachen und möglichen Einflussfaktoren nicht definiert werden können, sind derartige Untersuchungen zum Scheitern verurteilt.

Die Problematik der epidemiologischen Studie liegt also primär in den schwachen, bzw. nicht vorhandenen Effekten, verursacht durch die Felder der Mobilfunkanlagen. Die bisherigen Ansätze haben Ergebnisse erbracht, die einen Zusammenhang zwischen Erkrankungen und Mobilfunkfeldern weder verifizieren noch falsifizieren. Allerdings muss beachtet werden, dass die bisherige Betriebsdauer der Mobilfunkanlagen im D-Netz von ca. 10 Jahren und eine flächendeckende Versorgung von ca. 5 Jahren keine ausreichend lange Periode für eine Bewertung darstellt. Die Latenzzeit einiger Krebserkrankungen wird auf mehr als 10 Jahre geschätzt, die Latenzzeit für eine Reihe von anderen Erkrankungen, falls sie überhaupt existiert, ist nicht bekannt.

Da die Epidemiologie keine verlässlichen Hinweise auf irgendwelche typischen, durch die Mobilfunkfelder verursachten Erkrankungen oder ihre Beschleunigung liefert, müssen alle Hinweise aus in-vitro- und in-vivo-Untersuchungen zur Einwirkung von Mikrowellen in voller Breite überprüft werden. Bei der Betrachtung der Literatur dominieren hier zwei gesundheitsrelevante Bereiche, und zwar

1. die mögliche Einwirkung der Mikrowellen auf das Krebsgeschehen und
2. die Beeinflussung des Zentralnervensystems.

Die extensive Behandlung dieser beiden Komplexe in der Literatur ist rational nur mit dem Stellenwert der Krebserkrankung einerseits, und der herausragenden Funktionalität des Zentralnervensystems im menschlichen Organismus andererseits zu begründen.

Untersuchungen zur Karzinogenität von Mikrowellen werden aus ethischen Gründen nur in in-vitro-Untersuchungen bzw. in Tierexperimenten vorgenommen. In den Tierexperimenten werden zum Nachweis einer eventuellen Wirkung der Mikrowellen auf das Tumorstadium verschiedene Modelle mit spontaner Tumorbildung bei gesunden bzw. transgenen Tieren, Tiermodelle mit chemisch bzw. strahleninduzierten Tumoren und schließlich Tiermodelle mit implantierten Tumoren eingesetzt. In der überwiegenden Anzahl der Untersuchungen konnte keine promovierende Wirkung von Mikrowellen festgestellt werden. Eine Ausnahme bildet eine Untersuchung an transgenen Tieren, die allerdings noch in der Replikation überprüft werden muss. Falls diese Replikation positiv verlaufen sollte, wird sich die generelle Frage der Übertragbarkeit derartiger Ergebnisse auf

den Menschen stellen, da die genetischen Anlagen dieser Tiere beim Menschen nicht vorhanden sind.

Mit der Verfeinerung der Untersuchungstechnik, die mehr karzinogene Effekte auf der DNA-Ebene sucht, verlagert sich auch die inhaltliche Ausrichtung der Experimente. Bei den in-vitro-Untersuchungen geht es immer mehr darum, ob grundsätzlich Effekte gefunden werden, die mit der Karzinogenität in Verbindung gebracht werden können. Obwohl einzelne Untersuchungen durchaus Chromosomen-Mutationen und -Aberrationen sowie Änderungen der Zell-Proliferation unter der Einwirkung von Mikrowellen aufzeigen, sind die Ergebnisse insgesamt betrachtet nicht konsistent. Vieles spricht dafür, dass die beobachteten Effekte primär auf thermische Wirkungen der in den Experimenten verwendeten starken Mikrowellen zurückzuführen sind.

Unter Betrachtung der gesamten Ergebnisse zur Karzinogenese in Mikrowellen lässt sich heute für die in der Praxis vorkommenden Mobilfunkfelder kein Verdachtsmoment ableiten.

In den Untersuchungen der Wirkungen von Mikrowellen auf das Zentralnervensystem werden Effekte bei der Überprüfung der höheren kognitiven Funktionen gemeldet. Dabei handelt es sich vorwiegend um eine Verkürzung der Reaktionszeit, die bei weitem nicht als eine gesundheitsschädigende Wirkung ausgelegt werden kann. Andererseits sind diese Effekte auch nicht als positive Effekte einzustufen, solange die Wirkungsmechanismen nicht gefunden und belegt sind.

Untersuchungen zur Einwirkung der Mikrowellen auf den Schlaf haben ebenfalls subtile Effekte gefunden. Leider ist auch hier keine Konsistenz zu erkennen, da scheinbar viele Faktoren den Ausgang einzelner Untersuchungen beeinflussen können. Qualitativ ähnlich unsichere Ergebnisse liefern die EEG-Untersuchungen bei wachen Probanden. Wegen der niedrigen Spezifität und Sensitivität des EEG in diesem Zustand und vieler Einflussfaktoren, besonders in Bezug auf die Vigilanz, warnen Experten vor der Verwendung solcher Ergebnisse für die Beurteilung von Feldwirkungen. Eine höhere Aussagekraft liefern dagegen Aufnahmen der Evozierten Potentiale, deren Anwendung in den Felduntersuchungen zwar unterschiedliche geringe Effekte gezeigt haben, deren Konsistenz und Bedeutung zum jetzigen Zeitpunkt jedoch schwer nachvollziehbar sind.

Auf subtile Effekte deuten übereinstimmend auch Untersuchungen über das Tierverhalten bei Mikrowelleneinwirkung hin. Bei Betrachtung der applizierten Leistungsdichten und der erhöhten SAR-Werte bei kleinen Tieren in diesem Frequenzbereich ist jedoch eine thermische Wirkung als Ursache nicht ausgeschlossen.

Die früheren Hypothesen und Ergebnisse über die Einwirkung der Mikrowellen auf den Kalziumhaushalt des Hirngewebes bzw. auf die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke werden in jüngeren Untersuchungen nicht weiter untermauert. Eine Überprüfung dieser Sachverhalte unter Anwendung von Mobilfunkfeldern und neuer Untersuchungsmethoden

ist dringend erforderlich.

Das gleiche gilt für die Beeinflussung des neuroendokrinen Systems und der Hormone, wo spezifische Effekte nur von einzelnen Forschergruppen gemeldet werden. Allerdings können diese Effekte von anderen Gruppen nicht bestätigt werden.

Ebenfalls ist es erforderlich, die scheinbar existenten schwachen Effekte der Mikrowellen auf die höheren kognitiven Funktionen des Menschen bzw. auf das Schlafverhalten genau aufzuklären.

Eine Reihe von Untersuchungen der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit zeigt auf, dass elektromagnetische Felder nachweislich die Seh-, Hör- und Sinnesorgane beeinflussen können. Gemessen an diesen belegten Effekten liegen aber die Frequenzen der Felder von Mobilfunkanlagen entweder zu hoch, oder ihre Stärke ist zu niedrig, um derartige Effekte hervorzurufen.

Als sicher gilt, dass die Felder der Mobilfunkanlagen einige elektronische Implantate, wie z. B. Herzschrittmacher, beeinflussen können. Wegen der häufig vitalen Funktion des Herzschrittmachers muss bei einer Störung mit der Lebensgefährdung der Patienten gerechnet werden. Alle Untersuchungen zeigen übereinstimmend, dass etwa 10 % der bisher implantierten Herzschrittmacher unter praktischen Bedingungen durch die Felder der Handys gestört werden können. Eine stichprobenartige Überprüfung neuer Herzschrittmacher hat ergeben, dass auch jüngst implantierte Aggregate z. T. eine sehr hohe Störanfälligkeit zeigen. Diese unbefriedigende Situation erfordert Maßnahmen auf unterschiedlichen Ebenen, wobei der politischen Entscheidung die größte Rolle zukommt.

Als weitere Risikogruppen bezüglich der Einwirkung elektromagnetischer Felder werden in verschiedenen Abhandlungen Kranke und Kinder bezeichnet. Die durchgeführte Literaturstudie liefert nur wenige Hinweise, die diese Hypothese belegen könnten. So z. B. wurde eine 10-fache Absenkung der Schätzungswerte des Auges beobachtet, wenn bestimmte Augentropfen verabreicht wurden. Inwieweit diese Behandlung zutrifft und für die praktische Situation der Exposition mit den Feldern der Mobilfunkanlagen relevant ist, muss noch überprüft werden.

Besondere Kriterien für Kinder können von keinem Befund abgeleitet werden. Bei Kindern muss zwar wegen der geringeren Kopfgröße im Vergleich zu Erwachsenen mit einer unwesentlich höheren Energieaufnahme im Nah- wie im Fernfeld der Mobilfunkanlagen gerechnet werden, begründete Verdachtsmomente können der Literatur jedoch nicht entnommen werden.

### 3. Problematik bei der Ermittlung des aktuellen Wissensstandes

Die Fragestellung, inwieweit die allgegenwärtigen Felder der Mobilfunksysteme im D-Netz eine gesundheitliche Beeinträchtigung hervorrufen können, wird nach wie vor, nicht nur in der Öffentlichkeit, sondern auch zwischen Experten, kontrovers diskutiert. Der Grund dafür ist, dass die bisherigen Ergebnisse einer durchaus breiten Forschung auf diesem Gebiet keine klare und eindeutige Antwort auf diese Frage geben können. Dies spricht dafür, dass die Mobilfunkfelder, wenn überhaupt, nur schwache Effekte im Organismus verursachen können, die ausschließlich in umfangreichen und langwierigen Untersuchungen nachzuweisen sind.

Obwohl bisher keine eindeutigen gesundheitsrelevanten Effekte der Mobilfunkfelder im D-Netz beobachtet wurden und vor allem ein Nulleffekt nicht nachweisbar ist, können unterschiedlichste in der Öffentlichkeit vorgetragene Mutmaßungen über eine Langzeitwirkung dieser Felder, oder deren besondere Wirksamkeit auf Kinder, alte und kranke Menschen, pauschal nicht restlos ausgeräumt werden. Weiterhin ist auch der Aspekt einer weiteren, noch größeren Ausbreitung dieser Systeme der Informationsgesellschaft von morgen zu berücksichtigen. Es ist damit zu rechnen, dass die Frage der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch die Mobilfunksysteme auch in Zukunft seitens der Bevölkerung noch eindringlicher gestellt wird. Deshalb erscheint es als sehr ratsam, unterschiedliche Gremien, Politiker und eben die Bevölkerung möglichst informativ und häufig über den aktuellen Wissensstand zu unterrichten.

Beim laufenden Fluss der Forschung und neu erscheinender wissenschaftlicher Abhandlungen zum Thema der elektromagnetischen Wechselwirkungen im Organismus kann nur eine periodisch wiederholende Bewertung der Gesamtliteratur den aktuellen Wissensstand liefern. Mit der Vorgabe, anhand von 100 der wichtigsten bisher erschienenen Publikationen eine Übersicht des aktuellen Wissensstandes zu erarbeiten, wird ein derartiger Schritt eingeleitet.

Die interdisziplinäre und inzwischen als sehr komplex angesehene Problematik der elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen dem Organismus und hochfrequenten Feldern kann heute nur aufgrund von Indizien aus medizinisch/biologisch-technischen Untersuchungen bearbeitet werden. Im Folgenden werden nach dieser Maßgabe verschiedene, für die Problematik der Mobilfunksysteme im D-Netz relevante Literaturprofile bewertet. Bei der Bewertung der Ergebnisse aus Literaturquellen relevanter Profile müssen die unterschiedlichen Expositionsbedingungen beachtet und mit den tatsächlichen Feldstärken der Mobilfunkbasisstationen und der Handys verglichen werden. Dazu werden im nächsten Abschnitt die der Literatur entnommenen wichtigsten Charakteristika der Felder von Handys und Basisstationen sowie die dosimetrischen Daten für Menschen getrennt aufgestellt.

Die Bewertung gründet sich primär auf eine Recherche der Wirksamkeiten der Mobilfunksysteme auf den menschlichen Organismus. Aus Mangel an zugeschnittenen Untersuchungen müssen aber auch Berichte über Effekte ähnlicher Felder (bezüglich der Frequenz, Modulation, etc.) in Rechnung gezogen werden. Die Ergebnisse sind primär für Fachleute auf dem Gebiet der Elektromagnetischen Umweltverträglichkeit (EMUV) aufbereitet, für die Öffentlichkeit muss daraus in einem zweiten Schritt ein adäquater Extrakt ausgearbeitet werden. Nur so kann den Fragen oder sogar Ängsten der Bevölkerung, die die schnelle Entwicklung der Mobilfunktechnik hervorruft, begegnet werden.

## 4. Dosimetrie der Mobilfunksysteme

### 4.1 Vergleich der Feldbedingungen im Alltag und in Experimenten

In der Literatur werden zahlreiche in-vivo- und in-vitro-Untersuchungen mit verschiedenartigen biologischen Materialien unter der Einwirkung von Mikrowellen beschrieben, die z. T. auch klare Effekte dieser Felder aufzeigen. Allerdings sind dabei häufig sehr unterschiedliche Expositionsbedingungen gewählt, die auf die Problematik der Exposition des Menschen in Alltagssituationen durch die Mobilfunksysteme nicht direkt übertragbar sind. Den meisten Experimenten liegt die allgemeine Hypothese zugrunde, dass eventuell auftretende Effekte mit stärker werdenden Feldstärken deutlicher ausgeprägt sind. Deshalb werden in Experimenten meist stärkere Felder eingesetzt, als sie in der Praxis vorkommen. Darüber hinaus kommen, insbesondere in älteren Studien, für die Erzeugung von Mikrowellen in der Versuchsanordnung damals zur Verfügung stehende Leistungsgeneratoren, die Felder unterschiedlicher Frequenz und Modulation erzeugen, zum Einsatz.

Da das Vorhandensein der hauptsächlich in den 70-er und 80-er Jahren gemeldeten "Windows-Effekte" bezüglich der Stärke der Felder für den Frequenzbereich der Mobilfunksysteme nicht auch nur ansatzweise gezeigt oder belegt werden kann, besteht zwischen den Experten ein Konsens über die Kontinuität eventueller Effekte bezüglich der Feldcharakteristika wie Frequenz, Feldstärken, etc. Um die notwendige Datenbasis zu erweitern, werden deshalb in dieser Studie auch Felder mit verwandten Feldcharakteristika einbezogen.

Bei der Abwägung der Übertragbarkeit der im Labor beobachteten Effekte der Mikrowellen auf den Menschen müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- c) Wie ist die praktische Feldexposition durch Mobilfunksysteme mit den experimentellen Bedingungen vergleichbar, wobei hier einerseits die Besonderheiten bei der Exposition und Wirkung auf Kinder, Erwachsene bzw. kranke Personen, und andererseits unterschiedliche Feldsituationen bei der Exposition durch Handys, Autotelefone oder Basisstationen unterschieden werden müssen?
- b) In welchem Maße ist eine direkte Übertragbarkeit der z. T. nicht humanen Experimente auf den menschlichen Organismus möglich?

Bei beiden Fragestellungen sind medizinische wie auch technisch/physikalische Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Die rein technischen Charakteristika der unterschiedlichen Mobilfunkeinrichtungen können den Datenblättern und Berichten über Messungen der Felder in der Praxis entnommen werden. Sie werden im nächsten Abschnitt zusammengetragen.

Eine größere Unsicherheit besteht bei der Einschätzung der Feldcharakteristika der durch

die Mobilfunksysteme im Körper aufgebauten Felder. Da eine direkte Messung im menschlichen Körper ethisch nicht vertretbar ist, werden unterschiedliche numerische und physikalische Modelle zur Abschätzung dieser Charakteristika angesetzt. Dabei muß zwischen den Feldcharakteristika unterschieden werden, denen primär eine thermische Wirkung der Mikrowellen zugrunde liegt, und denjenigen, denen eventuelle athermische Effekte zugrunde liegen. Bei den thermischen Effekten kommt es auf die Leistung an, die von einer Masse-Einheit (g, 10 g, kg) des Gewebes pro Zeiteinheit (Sek., Min.) aufgenommen wird. Für die athermischen Wirkungen könnten punktuelle und maximale Werte der Feldstärke oder Stromdichte eine Rolle spielen.

## 4.2 Basisstationen

Die Basisstationen arbeiten mit dem Downlink-Frequenzband zwischen 935 und 960 MHz, mit einer Sendeleistung bis zu maximal 13.5 W. Die Antennen der Basisstationen werden wegen der angestrebten weiträumigen Ausbreitung der Felder an höher gelegenen Gebäuden oder Masten montiert. Bei Mobilfunkantennen werden die gesendeten Felder stark gebündelt. In der horizontalen Ebene werden omnidirektionale wie auch richtungseingeschränkte Systeme verwendet. Die Hauptsendekeule ist in vertikaler Richtung schräg auf 5° bis 10° mit einer Neigung bis zu -5° eingeschränkt. Demnach sind insbesondere Bereiche unterhalb oder in unmittelbarer Nähe der Antenne und der Erdoberfläche sehr schwach exponiert.

Die elektrischen und magnetischen Feldstärken sowie die Leistungsdichte der gesendeten Felder nehmen grundsätzlich mit dem Abstand von der Antenne ab. In einem sogenannten Fernfeld, das ab einem Abstand von ca.  $\lambda/2$ , also 17 cm von einer D-Netz-Antenne näherungsweise angenommen werden kann, nehmen beide Feldstärken im freien Raum gesetzmäßig linear direkt und die Leistungsdichte mit dem Quadrat des Abstandes ab. Durch die 26. Bundesimmissionsschutzverordnung (**26. BImSchV, 1997**) dürfen die Felder der Basisstation in keinem für Personen frei zugänglichen Bereich in der Umgebung der Antenne eine elektrische Feldstärke von 42 V/m und eine maximale Leistungsdichte von 469  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  überschreiten. So ergibt sich um die Antenne der Basisstation herum ein Sicherheitsbereich, der je nach der gesendeten Leistung wenige Meter betragen kann und von nicht autorisierten Personen nicht betreten werden darf.

Die Festlegung des minimalen Sicherheitsabstandes zwischen der Antenne und den frei zugänglichen Bereichen erfolgt meist aufgrund eines theoretischen "worst-case"-Zustandes mit maximalen Feldstärken und Leistungsdichten, die sich bei einer ungestörten Ausbreitung des Feldes in der Hauptstrahlrichtung der Antenne ergeben.

In der Praxis werden die Felder der Mobilfunksysteme auf vielfältige Weise absorbiert und reflektiert. Insbesondere in und zwischen den Häusern entstehen deshalb komplexe Feld-

verläufe, die nur messtechnisch erfasst werden können. Eine Reihe von durchgeführten Messungen in Gebäuden und Wohnungen sowie in Arealen in der Nähe einer Mobilfunkstation, die für den Menschen frei zugänglich sind, vermittelt den besten Einblick in die praktische Feldsituation.

Je nach Lage und Abstand des Messortes von der Antenne ergeben sich dabei sehr unterschiedliche Feldstärken und Leistungsdichten. Erwartungsgemäß sind in Wohnungen die Feldstärken direkt am Fenster in Richtung der Antenne deutlich höher als in den Räumen selbst. Dächer, Wände und Fenster verursachen eine 10- bis 100-fache Dämpfung der Mikrowellen. Alle Messungen zeigen übereinstimmend, dass die in Gebäuden, Wohnungen, Kindergärten, aber auch in freien Arealen um die Basisstation aufgetretenen Feldstärken deutlich unter 0.4 V/m elektrische Feldstärke (unter 1 % des Grenzwertes) und unter 40 nW/cm<sup>2</sup> und damit unter 0.01 Promille der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte liegen (**Wuschek, 1999**), (**Ergebnisse "Bundesweite EMVU-Meßaktion 1996/97, 1997**).

Die Gründe für diese niedrigen Werte in den betrachteten Arealen im Vergleich zu den Grenzwerten sind die starke Bündelung der gesendeten Felder in der Nähe der Mobilfunkanlagen und die Dämpfung und Reflexion der Mikrowellen durch verschiedene Gebäudeteile, Faktoren, die bei der "worst-case"-Abschätzung nicht berücksichtigt werden.

Unabhängig von diesem zusätzlichen Sicherheitsfaktor von 100 bei Feldstärken und sogar 10.000 bei Leistungsdichten ist in der weiteren Abhandlung vom denkbar ungünstigsten Fall der Exposition durch die Felder der Basisstation mit einer elektrischen Feldstärke von 42 V/m und einer maximalen Leistungsdichte von 469 µW/cm<sup>2</sup> auszugehen. Diese Felder könnten theoretisch 24 Std. auf den Menschen einwirken.

Die folgerichtige Frage zielt auf das Eindringen der von den Basisstationen ausgesendeten Felder in den menschlichen Körper und deren Ausbreitung. Im Gegensatz zu den bereits behandelten Feldcharakteristika, die zumindest im Einzelfall messtechnisch eindeutig bestimmt werden können, ist die Ermittlung der Feldkennwerte des in den Körper eingedrungenen Feldes problematisch, da eine Messung direkt im menschlichen Körper ethisch nicht vertretbar ist. In der Literatur werden deshalb drei andere, unterschiedliche Ansätze zur Abschätzung der Feldkennwerte im Körper präsentiert, und zwar über

- b) die Messung in einem physikalischen Trogmodell des Körpers,
- c) die numerische Berechnung, die auf einer Aufteilung des Körpers in eine hohe Anzahl (bis 10<sup>7</sup>) von Volumeneinheiten (Voxels) beruht und eine angepasste Form der Maxwell'schen Gleichungen anwendet und
- d) die indirekte Ermittlung über die Erwärmung des Körpers durch Mikrowellen.

Die Gesamtcharakteristika der von Mobilfunkbasisstationen gesendeten Felder sind in Tab. 1 zusammengetragen.



PRAXIS			GRENZWERTE
	Feldart	Fernfeld	
Feld der Basisstation D-Netz	Frequenzbereich Modulation Übertragungsrate Bitdauer Tastverhältnis gesendete Leistung	935 - 960 TDMA 270.833 kbit/s 3.69 µs 1 : 8 13 W	
frei zugängliche Bereiche	elektrische Feldstärke Leistungsdichte	< 0.5 V/m < 0.0005 W/m <sup>2</sup>	42.2 V/m 4.69 W/m <sup>2</sup>
Mensch	Ganzkörper-SAR* SAR-Körperoberfläche* SAR <sub>MAX</sub> (Nacken, Beine)* SAR-Auge* SAR-Gehirn* * bezogen auf die aufgeführte Leistungsdichte	< 4 µW/kg < 30 µW/kg < 15 µW/kg < 15 µW/kg < 3,5 µW/kg	< 15 <sup>1</sup> mW/kg - 40 <sup>2</sup> < 210 <sup>1</sup> mW/kg - 300 <sup>2</sup> < 35 <sup>1</sup> mW/kg - 150 <sup>2</sup> <sup>1</sup> Stuchly (1987) <sup>2</sup> Gandhi (1999)

Tab. 1 Charakteristika der Felder von Mobilfunkbasisstationen im D-Netz in frei zugänglichen Bereichen sowie der in den menschlichen Körper eingedrungenen Felder, ermittelt aus Datenblättern, bzw. theoretisch oder experimentell ermittelt.

**Stuchly et al. (1986, 1987)** präsentieren zwei Ansätze mit einem physikalischen Trogmodell für die Ermittlung der Energiedeposition im Fernfeld, u. a. bei einer Frequenz von 915 MHz.

In der ersten Arbeit (**Stuchly et al., 1986**) wird ein homogenes Schalenmodell des Menschen (Höhe: 175 cm, Gewicht: 70 kg) erstellt und für die Messungen herangezogen. Die PVC-Schale hat eine Dicke von 1.5 mm, das Innere des Modells wird mit einer semiflüssigen Masse, die die mittleren dielektrischen Eigenschaften des Körpers nachbilden soll, gefüllt. Für die Frequenz von 915 MHz weist die semiflüssige Masse eine Dielektrizitätskonstante  $\epsilon = 37$  und eine Leitfähigkeit  $\sigma = 1.17$  S/m auf. Innerhalb des Modells wird mit Hilfe einer Messprobe vektoriell die elektrische Feldstärke gemessen, woraus unter Einbeziehung der dielektrischen Leitfähigkeit und der Materialdichte der Simulationsflüssigkeit die spezifische Absorptionsrate (SAR) in 650 Punkten des Modells berechnet wird. Die angegebenen SAR-Werte sind grundsätzlich auf 1 mW/cm<sup>2</sup> Leistungsdichte des ungestörten Feldes bezogen. Die alternative E- und H-Polarisation des Feldes in Bezug auf die Körperachse des Modells gilt als eine Variable. Maximale SAR-Werte ergeben sich erwartungsgemäß an der Oberfläche des Körpermodells. Die Welle mit einer E-Polarisation lässt einen maximalen SAR-Wert von 0.3 W/kg und die H-Polarisation von 0.45 W/kg an der Körperoberfläche entstehen.

Entlang der longitudinalen Körperachse betrachtet ergeben sich innerhalb des Modells

$SAR_{Max}$  im Bereich des Nackens und der Beine, die max. 70 mW/kg gegenüber etwa 20 mW/kg im Thoraxbereich erreichen. Der mittlere SAR-Wert des gesamten Körpers liegt bei 30 mW/kg für die E-Polarisation und etwa bei 50 mW/kg für die H-Polarisation.

In den Folgeuntersuchungen (**Stuchly et al., 1987**) wird für die Ermittlung der SAR-Werte ein heterogenes physikalisches Modell herangezogen. Dieses Modell des Körpers ist 162 cm hoch, das Körperinnere wird mit dielektrisch unterschiedlichen Materialien für Knochen

( $\epsilon=7.4$ ,  $\sigma=0.16$  S/m), Gehirn ( $\epsilon=42$ ,  $\sigma=1.1$  S/m), Lunge ( $\epsilon=29$ ,  $\sigma=0.66$  S/m) und Muskel ( $\epsilon=55$ ,  $\sigma=1.44$  S/m) für 915 MHz simuliert. Die elektrische Feldstärke im Modell wird mittels einer Mikroprobe an 38 Stellen gemessen. Die höchsten Werte innerhalb des Körpers werden auch hier mit SAR-Werten bis zu 200 mW/kg im Bereich des Nackens für die E-Polarisation, und nur ca. 30 mW für die H-polarisierte Welle gemessen. Insgesamt zeigen die SAR-Werte im homogenen wie auch im heterogenen Modell eine gute Ähnlichkeit in den Tendenzen in Abhängigkeit von verschiedenen Koordinaten. An den meisten Messstellen des heterogenen Modells werden allerdings höhere SAR-Werte festgestellt.

Als Alternative zur messtechnischen Bestimmung der SAR-Werte im menschlichen Körper wurden in der Vergangenheit immer bessere numerische Berechnungsmethoden entwickelt. Für die Lösung der Fernfeld-Probleme der Mikrowellen wurden erfolgreich z. B. die Finite-Integrationstechnik- (FIT) oder die Finite-Differenzen-Time-Domaine-Methode (FDTD) angewandt (**Gandhi, 1992, 1999**). Insbesondere die zuletzt genannte Methode erlaubt mit einer hohen Auflösung des Körpers von einigen Mio. Volumenelementen eine anatomisch gute Nachbildung des Körpers, und sie besticht mit ihrer hohen Flexibilität und einem akzeptablen Rechenaufwand bezüglich der Computerzeit und der benötigten Hardware. Bei einem menschlichen Körpervolumen von ca. 70 dm<sup>3</sup> lassen sich mit einer derartigen Auflösung für den gesamten Körper kleine Volumenelemente von ungefähr 70 mm<sup>3</sup> (ca. 4 x 4 x 4 mm) Größe realisieren, die für die thermische Betrachtung eine realistische Modellierung der Körperanatomie erlauben.

**Gandhi et al. (1992, 1999)** modellieren einen menschlichen Körper in der Größe von 175 cm und mit einem Gewicht von 70 kg. Für die numerische Berechnung des Fernfeldes bei 915 MHz mit der FDTD-Methode wird eine räumliche Auflösung des Körpers mit Elementen von 13.1 bzw. 26.2 mm Kantenlänge erarbeitet. Insgesamt werden 14 unterschiedliche Gewebearten mit ihren dielektrischen Eigenschaften berücksichtigt. Für eine vertikal polarisierte E-Welle werden aus der ermittelten Stromdichte die SAR-Werte in Körperschichten pro Organ und summarisch für den ganzen Körper errechnet.

Der Ganzkörper-Mittelwert beträgt 80 mW/kg pro 1 mW/cm<sup>2</sup> initialer Leistungsdichte. Bei der schichtweisen Betrachtung treten die maximalen SAR-Werte in den unteren Extremitäten (bis zu 300 mW/kg pro 1mW/cm<sup>2</sup>) und im Bereich des Nackens (160 mW/kg pro 1

mW/cm<sup>2</sup>) auf. In Augen (SAR=600 mW/kg pro 1mW/cm<sup>2</sup>) und Gehirn (SAR=70 mW/kg pro 1 mW/cm<sup>2</sup>) werden wesentlich höhere SAR-Werte als in Leber und Herz (SAR=30 mW/kg pro 1mW/cm<sup>2</sup>) oder sogar Lunge (SAR=18 mW/kg pro 1mW/cm<sup>2</sup>) bestimmt.

### **Diskussion:**

Die Ermittlung der SAR-Werte erfolgte bisher nur im physikalischen Trogmodell und mittels numerischer Berechnung. Beide Ansätze zeigen offensichtliche Unzulänglichkeiten bei der Beschreibung der

- tatsächlichen dielektrischen Eigenschaften einzelner Gewebe
- komplexen und darüber hinaus stark individuellen Anatomie sowie
- der metabolischen Wärmeproduktion, ihre Verteilung im Körper und ihre Abgabe nach außen.

Bei den vorgelegten Daten muss mit Feldern im Bereich von einigen 100 % gerechnet werden. Modelle, die zumindest ansatzweise diese Probleme zu lösen im Stande sind, sind zur Zeit nicht in Sicht. Um zu ermitteln, wo die heutigen Daten im Vergleich mit der Realität tatsächlich liegen, sind exemplarische Untersuchungen an Probanden angezeigt.

### **4.3 Exposition durch Handys**

Die Handys im D-Netz arbeiten im Up-Link-Frequenzbereich zwischen 890 und 915 MHz, ihre maximale Leistung beträgt 2 W. Diese Leistung wird automatisch in der Nähe der Basisstationen bis auf 0.125 W heruntergefahren, wenn die Verbindungsqualität einen Mindestpegel überschreitet. Wegen der Benutzung der Handys in unmittelbarer Körpernähe haben die elektromagnetischen Felder einen Nahfeldcharakter, bei dem die elektrische und magnetische Komponente ihre im Fernfeld vorhandene Orthogonalität verlieren und deshalb getrennt bestimmt werden müssen. Bei der Untersuchung der Exposition durch die Nahfelder ist die Aufmerksamkeit begreiflicherweise vor allem auf den Bereich des Kopfes gerichtet, wo die Handys am meisten zum vollen Einsatz kommen.

Die Ermittlung der in den Körper eindringenden Feldkomponenten des Nahfeldes wird im physikalischen oder numerischen Modell vorgenommen, da eine direkte Messung im menschlichen Körper aus ethischen Gründen problematisch ist.

Ein betriebenes Handy baut im Körper elektromagnetische Felder auf, deren Stärke und Verteilung nicht nur von den primären Feldkennwerten wie z. B. Frequenz, Feldstärke und Polarisierung der Welle abhängen, sondern die auch in komplexer Weise von der geometrischen Anordnung zwischen Körper und Handy sowie den Konstruktionsmerkmalen des jeweiligen Handys abhängig sind.

Viele dieser Gesichtspunkte können vorteilhaft in Untersuchungen mit physikalischen Modellen berücksichtigt werden, in denen auf dem Markt befindliche Handys als Expositionsquelle Anwendung finden. Der Kopf wird dabei mit einem Schalenmodell und das Gehirn

mit einer Flüssigkeit nachgebildet, die äquivalente elektrische und dielektrische Eigenschaften, gemittelt über alle Gewebe im Gehirn, bei der jeweiligen Frequenz aufweisen. Wegen der niedrigen Eindringtiefe bei 900 MHz (ca. 3 cm) wird es für ausreichend gehalten, nur eine Hälfte des Kopfes nachzubilden, um in der Nachbildung der Gehirnhälfte im Modell elektrische Feldstärken einfacher messen zu können. Geeignete Sonden sowie eine präzise Lokalisation der Mess-Sonde, z. B. mit Hilfe eines Roboters, sind die Voraussetzungen für eine reproduzierbare Messung (**Kuster et al. 1993**). Auf diese Weise werden eine Reihe von marktüblichen GSM-Handys für den Betrieb im D-Netz untersucht. Die Messwerte zeigen, dass die SAR-Werte, bezogen auf 1 g der simulierten Gehirnmasse, bei einer vorgesehenen Anwendung mit ausgezogener Handy-Antenne, zwischen 0.1 und 1.59 W/kg variieren (**Tegenfeld, 1999**).

In direkter Konkurrenz zu den physikalischen Modellen stehen numerische Simulationen mit einer Auflösung unter  $1 \text{ mm}^3$ . Im Bereich des Kopfes ist es dadurch möglich, die Anatomie des Gehirns und seine dielektrischen Eigenschaften sehr detailliert und weitestgehend anatomisch gerecht nachzubilden. Die numerischen Modelle sind sehr flexibel bei einer eventuell notwendigen Korrektur der dielektrischen Eigenschaften einzelner Gewebearten und deren Geometrie sowie bei der Berechnung der SAR-Werte für verschiedene Volumina. Darüber hinaus erlauben sie eine Fortführung der Problematik über die Feldberechnung zur Betrachtung des Wärmehaushaltes, in dem aus den örtlichen Feldstärken bzw. Stromdichten die Erwärmung des Gewebes errechnet wird.

**Dimbylow et al. (1994)** führen die numerische hochauflösende dosimetrische Ermittlung bei 900 MHz mit einer Voxel-Auflösung von 2 mm und ca. 500 000 Volumina-Elementen durch. Die Anatomie einzelner Gewebearten wird aus Kernspintomogrammen von Probanden oder Patienten übernommen, wobei bei der Berechnung 10 unterschiedliche Gewebearten mit ihren spezifischen dielektrischen und elektrischen Eigenschaften Berücksichtigung finden. Alternativ werden der Kopf eines einjährigen Kindes und der einer erwachsenen Person simuliert. Als Ergebnisse werden die spezifische Absorptionsrate in Auge und Gehirn pro 1 g und 10 g Masse in Abhängigkeit von der Geometrie und Antennenlokalisation präsentiert. Die aufgeführten Daten sind jeweils pro Watt-Leistung berechnet. Die maximalen SAR-Werte, ermittelt über 10 g Gewebe, liegen bei 900 MHz bei 3 W/kg und bei Mittelung über 1 g Gewebe bei 4.8 W/kg.

**Hombach et al. (1996)** kombinieren eine numerische Berechnung unterschiedlicher Komplexität mit einer Messung im homogenen und inhomogenen physikalischen Modell des Kopfes. Im numerischen Modell werden bis zu 13 unterschiedliche Gewebearten und ihre elektrische Eigenschaften berücksichtigt, wohingegen das experimentelle Phantom nur 5 unterschiedliche Gewebearten beinhaltet. Ein Vergleich für die homogene vereinfachte

und die heterogene komplexe Modellierung beider Arten wird vorgenommen. Die höchsten SAR-Werte ergeben sich für homogene Anordnungen, und zwar bis zu  $4.5 \text{ mW/cm}^3 / 100 \text{ mA}$  bei der Integration über 1 g Gewebe und etwa  $3 \text{ mW/cm}^3 / 100 \text{ mA}$  bei der Mittelung über 10 g Gewebe. Die SAR-Werte der vereinfachten oder heterogenen Modelle liegen bis zu 10 % niedriger. In dieser Arbeit wird weiterhin der starke Einfluss der Größe und Geometrie des Kopfes auf die SAR-Werte hervorgehoben.

Numerische und experimentelle Modellierungsmethoden im physikalischen Modell werden bei **Gandhi et al. (1999)** verglichen. Die Autoren verwenden eine hochauflösende FDTD-Technik mit einer Auflösung von  $2 \times 2 \times 3 \text{ mm}$ . 15 unterschiedliche Gewebearten des Kopfes und des Gehirns, und zwar Muskel/Fett/Knochen, Knorpel/Haut/Nerven/Blut, Ohr/Speicheldrüse/Auge mit Linse, Sklera und Auge, Körper, Gehirn sowie Pinealdrüse werden berücksichtigt. Als Quelle dienen 10 unterschiedliche 835 MHz-Handys. Die numerischen Ergebnisse werden mit einer experimentellen Messung im homogenen Trogmodell verglichen. Die Ergebnisse aus dem physikalischen Modell und der numerischen Berechnung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, wobei die Messungen im physikalischen homogenen Modell nur in wenigen Vergleichspunkten bis zu 20 % höhere Werte als die numerische Methode zeigen. Bei der numerischen wie auch bei der physikalischen Methode ergeben sich maximale SAR-Werte von  $1.55 \text{ W/kg}$ , gemittelt über 1 g Gewebe und bezogen auf 600 mW gesendete Leistung.

Wegweisend sind numerische Simulationen von **Van Leeuwen et al. (1999)**, bei denen neben der hochauflösenden Feldberechnung des Nahfeldes im Kopfbereich auch die Änderung der Gehirntemperatur berechnet wird. Unter Zuhilfenahme der FDTD-Methode wird der Kopf in Volumina-Einheiten mit 2 mm Auflösung aufgeteilt, wobei folgende 10 unterschiedliche Gewebearten (Haut, Fett, Knochen, Liquor, graue Masse, weiße Masse, Muskel, Sinus, Augenlinse, Augenkörper) berücksichtigt werden.

Bei der Berechnung des thermischen Modells kommt ein Programmpaket "DIVA" zur Anwendung, bei dem die Wärmeversorgung des Kopfes über das Blut, die Wärmeverluste an die Umgebung, nicht aber die metabolische Wärmeproduktion berücksichtigt werden. Als Quelle der Mikrowellen dient ein herkömmliches GSM-Handy mit 2 W Maximalleistung und 0.25 W mittlerer Leistung. Die Ergebnisse zeigen den größten SAR-Wert von  $4 \text{ W/kg}$  in einem Element des Muskels. Die berechnete SAR im Kopf über 1 g Masse beträgt maximal  $1.53 \text{ W/kg}$  und, gemittelt über 10 g,  $0.91 \text{ W/kg}$ . Diese Werte liegen bis zu 20 % niedriger bei der Annahme einer dickeren Hautschicht. Die Handy-Exposition resultiert aus einer Erwärmung des Gehirns um  $0.11^\circ \text{ C}$ . Diese minimale Erwärmung wird durch eine oberflächliche Temperaturveränderung an Probanden überprüft und bestätigt.

In Tab. 2 sind alle für die Beurteilung der Exposition des Menschen durch die Handys erforderlichen Charakteristika zusammengetragen.

Primäre		min	max
	Feldart	Nahfeld	
<b>Feldkennwerte der Handys im D-Netz</b>	Frequenzbereich Modulation Tastverhältnis Bit-Dauer Rahmen-Dauer Multirahmen (Verkehr) TC4-Rahmen max. Sendeleistung mittlere Sendeleistung	890 MHz 915 MHz TDMA 1 : 8 3.69 µs 4.61 ms 120 ms 480 ms 0.125 W 2 W 0.016 W 0.25 W	
<b>Exposition des Nutzens*</b>	SAR pro g in W/kg SAR pro 10 g in W/kg Spitzenwert SAR in W/kg SAR Auge Erwärmung im Gehirn	0.1 <sup>4</sup> 0.58 <sup>1</sup> ; 1.53 <sup>1</sup> ; 1.59 <sup>4</sup> ; 1.9 <sup>2</sup> 0.53 <sup>3</sup> ; 0.91 <sup>1</sup> ; 1.5 <sup>5</sup> 4 <sup>1</sup> 1.18 <sup>3</sup> 0.11 °C <sup>1</sup>	<sup>1</sup> Gandhi et al. (1999) <sup>2</sup> Gandhi et al. (1999) <sup>3</sup> Dimbylow et al. (1994) <sup>4</sup> Tegenfeld (1999) <sup>5</sup> Kuster et al. (1993)

Tab. 2 Feldcharakteristika der Handys im D-Netz und Expositions-kennwerte ihrer Nutzer

#### Diskussion:

Für die Simulation der SAR-Werte im Kopf, aufgebaut vom Nahfeld der Handys, gelten verstärkt die in Abschnitt 3.3 vorgebrachten Einwände. Die jüngste Publikation von Van Leeuwen et al. zeigt wegweisend, in welche Richtung zukünftige Untersuchungen gehen müssen. Eine Übereinstimmung zwischen zwei Modellen, die die wahre Komplexität stark vereinfachen, liefert noch keine Sicherheit für die korrekte Einschätzung der Verhältnisse im Körper ohne eine experimentelle Überprüfung.

Ein weiteres Defizit der bisherigen Studien ist, dass nur die ermittelten SAR-Werte, nicht aber die elektrischen Feldstärke/Stromdichte-Verteilungen angegeben. Diese Kennwerte können jedoch bei der Einschätzung möglicher athermischer Effekte eine große Rolle spielen.

#### 4.4 Auto-Funktelefonanlagen

Pkws und Lkws werden immer häufiger mit einer Außenantenne für die Nutzung von Mobilfunk ausgestattet. Wegen der möglichen Nähe zum Wagenführer, zu Wageninsassen und

auch zu Passanten bei einem Halt des Wagens stellt sich die Frage nach der Exposition dieser Personen durch die Mobilfunkfelder der Pkw-Anlagen im D-Netz. Die bordeigenen Mobilfunkeinrichtungen unterscheiden sich in den meisten Feldcharakteristika nicht von den Handys. Nur die Einpassung der Außenantenne wird zugeschnitten gestaltet. Darüber hinaus können Automobilfunkanlagen im D-Netz mit einer Leistung von bis zu maximal 8 W betrieben werden.

Für die Ermittlung der Expositionsbedingungen für Personen, die sich in der Nähe eines stehenden Wagens mit einer Außenantenne befinden, sind die Regeln der Fernfelder anzuwenden. Bei einem Abstand von ca. 1 m von der Antenne kann die elektrische Feldstärke einen Wert von 10 V/m erreichen, mit weiterer Entfernung nimmt die Feldstärke linear proportional ab.

Die Feldverhältnisse innerhalb des Pkws werden durch die unterschiedlichen Konstruktionsmerkmale des Wagens bestimmt, sie lassen sich nicht pauschal angeben und müssen individuell pro Pkw und Situation ermittelt werden.

Eine exemplarische Messung mit einer bordeigenen D-Netz-Anlage in einem Pkw des Typs BMW 520 wurde von **Brose et al. (1994)** durchgeführt. Die Anlage speist eine Heck-Antenne mit 2 W. Die im Wagen gemessene Verteilung elektrischer Feldstärke bleibt im gesamten Fahrzeug ohne Passanten etwa gleich um 10 V/m.

Standard Feldcharakteristika	siehe Tabelle 2
Leistung	2 W
Feldstärke im Wagen	ca. 10 V/m
Feldstärken außerhalb des Wagens	

Tab. 3            Feldstärken einer Autofunkanlage im D-Netz, betrieben mit einer Heckantenne innerhalb und außerhalb des Wagens /2.13/

### Diskussion:

Die wenigen zur Verfügung stehenden Daten deuten darauf hin, dass die Exposition der Pkw-Passanten im Pkw mit externer Antenne schwächer ausfällt als bei der direkten Verwendung von Handys.

Bezüglich der im Körper induzierten Felder gelten die gleichen Einwände wie in Abschnitt 3.4 aufgeführt.

## 5. Vorgehensweise bei der Darstellung und Bewertung der medizinisch/biologischen Literatur

Über die Einflussnahme der hochfrequenten Felder der Mobilfunkanlagen im D-Netz auf den Organismus liegen weder klare und nachvollziehbare Erkenntnisse über Art und Ort der Beeinflussung noch über mögliche physikalisch/physiologische Wirkungsmechanismen vor. Darüber hinaus kommen einige bekannte und belegte Wirkungsweisen der nichtionisierenden niederfrequenten Felder und der ionisierenden hochfrequenten elektromagnetischen Strahlen für die betrachteten Mikrowellen nicht zum Tragen. Im Vergleich zu niederfrequenten Feldern sind sie nicht im Stande, die Zellmembran erregbarer Zellen zu depolarisieren und damit eine fortgeleitete Erregung einzuleiten. Im Vergleich zu ionisierenden Strahlen ist ihre elementare Energie um mehrere Zehnerpotenzen niedriger als die Bindungsenergie zwischen Atomen und Molekülen im biologischen Material. Die von derartigen Wechselwirkungen ableitbaren kumulativen Effekte auf dem Niveau von Zelle und Gewebe sind also auf die Felder der Mobilfunkanlagen nicht übertragbar.

Aus der bekannten Palette der Wirkungen elektromagnetischer Felder im Organismus gelten für die hochfrequenten Felder oberhalb von 10 MHz nur die thermischen Effekte als gesichert. Die durch die Felder der Basisstationen im Körper aufgebaute spezifische Absorptionsrate (SAR) ist im Vergleich zu dem physiologischen Energieumsatz im Körper von ca. 4 W/kg vernachlässigbar klein (siehe Kap. 3, Tab. 1). Auch die ermittelte Erwärmung kleiner Gewebavolumina, insbesondere in der Nähe der Handyantenne im Bereich des Kopfes (siehe Kap. 3, Tab. 2), liegt deutlich unterhalb des physiologischen Energieumsatzes des Körpers. Wenn überhaupt, können von dieser schwachen Erwärmung nur subtile Effekte erwartet werden. Allerdings kann nicht völlig ausgeschlossen werden, dass die in Bezug auf die Alltagsexposition des Menschen durch die neuartigen niederfrequent gepulsten Mikrowellen eine besondere, bisher unbekannte Wirkung auf den lebenden Organismus ausgeübt wird. Hinzu kommt die Tatsache, dass diese Felder, gemessen an der Latenzzeit verschiedener Erkrankungen, innerhalb von kurzen Zeiträumen eine enorme Verbreitung erfahren haben, die sich in den nächsten Jahren noch intensiver fortsetzen wird. Dies wird dazu führen, dass die breite Bevölkerung zukünftig bei Tag und Nacht immer stärkeren Felder dieser Art ausgesetzt sein wird.

Bei den Mobilfunkanlagen geht heute die stärkste Exposition von den Handys aus, die in der unmittelbaren Nähe des Körpers betrieben werden. Die Recherche kann aber nicht nur auf diese Feldstärken fokussiert werden, da auch andere Faktoren, wie z. B. die Dauer der Exposition, nicht von vornherein ausgeschlossen werden können. Es ist deshalb eine breit angelegte Überprüfung der bisherigen Literatur erforderlich, die von vornherein nur plausible und gut nachvollziehbare Ausschlüsse erlaubt.



Eine Auswahl der zu bewertenden Felder nach dem Kriterium ihrer Modulation ist ebenfalls nicht möglich, da bisher nicht gesichert ist, dass die niederfrequent gepulsten Mikrowellen eine spezifische Wirkung im Organismus ausüben.

Für die notwendige Einschränkung der Studie bietet sich dagegen die Frequenz der applizierten Mikrowellen an. Im Vergleich zu den Feldern der Mobilfunkanlagen dringen die niederfrequenten Felder unterschiedlich in den Körper ein und können hier nachweislich andere Effekte verursachen.

Mikrowellen am oberen Frequenzbereich werden dagegen bereits in der Hautschicht absorbiert und reflektiert und können nur hier eine Wirkung entfalten.

Aus diesen Gründen wird der zu betrachtende Frequenzbereich mit einem Faktor von 2.0 nach oben und unten um 1 GHz, das heißt zwischen 400 MHz und 2.5 GHz eingeschränkt.

Beim gegebenen Wissensstand werden zuerst globale Zusammenhänge gesucht. Insbesondere bei deutlich ausgeprägten gesundheitlichen Beeinträchtigungen sind in der initialen Phase der Forschung Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen von besonderer Bedeutung und Aussagekraft. In diesen wie auch in anderen medizinisch/biologischen Profilen werden jeweils die wichtigsten Publikationen, wenn möglich mit einer Kontraindikation, gesucht.

In der weiteren Priorität stehen nach den epidemiologischen Studien Untersuchungen zum mutmaßlichem Krebsgeschehen, wobei die Felder der Mobilfunkanlagen als Faktor oder Kofaktor betrachtet werden. Da keine Experimente dieser Art am Menschen vorgenommen werden dürfen, kommt die größte Wertigkeit bei der Behandlung dieses Themas unterschiedlichen Tiermodell-Untersuchungen zu. Die ergänzend dazu durchgeführten in-vitro-Untersuchungen liefern eine wertvolle Ergänzung, indem sie aufgestellte Hypothesen überprüfen oder Hinweise für das weitere Vorgehen und die Ausrichtung neuer in-vivo-Untersuchungen liefern. Dabei kommen einzelnen Aspekten des Krebsgeschehens, wie z. B. Genexpression, Proliferation, DNA-Schädigung, DNA-Mutation und DNA-Aberration, Chromatidaustausch, Mikronukleiformation, spontane Tumorinzidenz sowie Krebsinitiation und-promotion eine zentrale Bedeutung zu.

Neben dem Krebsgeschehen ist die Überprüfung eines möglichen Zusammenhangs zwischen den Feldern von Mobilfunkanlagen und verschiedenen organischen und psychischen Erkrankungen von großer Bedeutung. Bereits Belege über eine wie auch immer geartete Beeinflussung der normalen physiologischen Funktionen des Organismus, wie z. B. des Verhaltens, der Aufmerksamkeit, des Schlafes oder der kognitiven Funktionen würden Hinweise über eventuelle Wirkungsmechanismen dieser Felder liefern, die in zugeschnittenen Untersuchungen weiter verfolgt werden könnten.

Wegen der relativ starken Exposition des Gehirns durch die Handys haben weitere vertiefte Untersuchungen z. B. der postulierten Einflussnahme auf Neurotransmitter, Blut-Hirnschranke, Kalziumhaushalt der Neuronen sowie Untersuchungen des Elektroenzephalo-

gramms (EEG) eine aufklärende Funktion. Dabei muss jedoch auch auf die unterschiedliche Aussagekraft einer Änderung in verschiedenen Kenngrößen des Organismus hingewiesen werden. So z. B. unterliegt das EEG, auch unter normalen Bedingungen bei gesunden Probanden, einer starken Variation, wohingegen die physiologische Variation der Blutwerte wesentlich enger ausfällt. Deshalb muss bei jeder Größe deren biologische Variabilität berücksichtigt werden, damit die Relevanz der in Experimenten unter Feldeinwirkung ermittelten Veränderung beurteilt werden kann.

Einige Indizien sprechen für die Notwendigkeit einer genauen Betrachtung der mutmaßlichen Beeinträchtigung der Sinnesrezeptoren, insbesondere des Seh- und Hörkanals, durch die Mobilfunkanlagen.

Eine eigenständige, jedoch nicht minder bedeutende Problematik ist die Beeinflussung der elektronischen Implantate durch die Felder der Mobilfunkanlagen. Hierbei kommt den Herzschrittmachern eine besondere Rolle zu, da sie in einigen Fällen die vitale Funktion des Herzens gewährleisten.

Bei der Auswahl der wichtigsten Publikationen zu einzelnen Profilen wird darauf geachtet, dass, wenn Publikationen gleicher Qualität vorhanden sind, pro- und contra-Arbeiten herangezogen werden.

## 6. Epidemiologische Studien

Eine allgemeine epidemiologische Studie, die einen eventuellen Zusammenhang zwischen den Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder der Mobilfunkanlagen und den unterschiedlichen Erkrankungen der exponierten Bevölkerung überprüft, liegt nicht vor. Die wenigen bisher durchgeführten epidemiologischen Untersuchungen setzen sich mit der Überprüfung einer Beziehung zwischen der Exposition durch die Mikrowellen und der Mortalität, Krebsinzidenz und Häufigkeit von unspezifischen Symptomen bei Handy-Nutzern auseinander, wovon nur einige Arbeiten zumindest ansatzweise die grundlegenden Anforderungen, die an eine epidemiologische Untersuchung gestellt werden, erfüllen.

**Rothman et al. (1996)** führen eine Kohortenstudie an 256.000 Besitzern von tragbaren und mobilen Telefonen im Osten der USA durch. Davon entfallen 65 % auf Männer im Durchschnittsalter von 42 Jahren und 35 % auf Frauen mit einem Durchschnittsalter von 41 Jahren. Obwohl in der Studie nicht expliziert aufgeführt, lässt sich aus anderen Quellen ableiten, dass es sich bei den Handys vorwiegend um analoge Systeme im Frequenzbereich zwischen 804 und 894 MHz mit einer Leistung von 0.6 W bei tragbaren Geräten und 3 W bei Auto-Anlagen handelt. Als Maß für die Expositionsdauer einzelner Benutzer durch die Handy-Felder werden die Telefonkostenrechnungen herangezogen; Häufigkeit und Gewohnheiten der Nutzung versucht man mit Hilfe von Fragebogen und Interviews von den Handy-Besitzern zu ermitteln.

Für die Überprüfung eines eventuellen Zusammenhangs zwischen der Feldexposition und der Sterblichkeitsrate wird die Mortalität in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht der betreffenden Personen zusammengetragen und aufgestellt. Bewertet wird die Differenz zwischen der Mortalität der Benutzer von mobilen und Handtelefonen, wobei im Falle der mobilen Anlagen von einer wesentlich schwächeren Exposition ausgegangen wird. Die Nutzer der mobilen Funkanlagen werden als Kontrollgruppe herangezogen. Für die Handtelefone wird eine maximale SAR im Gehirn von bis zu 1.9 W/kg pro g Körpermasse geschätzt, wohingegen für die mobilen Telefone keine genauen Angaben gemacht werden. Obwohl mehr als 1000 Tote in der betrachteten Kohortengruppe ermittelt werden, gehen nur 604 Tote, die im Jahr 1994 verstorben sind, in die statistische Auswertung ein. Die Mortalität steigt in beiden Gruppen erwartungsgemäß mit dem Alter der Personen stark an, wobei die gesamte Mortalität mit der Zeit der Nutzung von mobilen Fernsprechanlagen paradoxerweise abnimmt. Das relative Risiko der Handy-Besitzer liegt bei 0.93 nach zweijähriger und bei 0.86 nach dreijähriger Benutzung von Handys. Ein Vergleich zwischen den Nutzern von mobilen und tragbaren Geräten (Handys) zeigt keine statistisch signifikante Differenz zwischen beiden Gruppen.

Der Wert dieser Studie wird durch folgende Kriterien gemindert:

- Es fehlen Angaben über die Todesursachen, inwieweit es sich dabei z. B. um Gehirntumore handelt.
- Die tatsächliche Expositionsdosis (Stärke x Dauer) ist nur grob geschätzt, große Fehler sind nicht auszuschließen.
- Die einjährige Erfassungsphase muss als zu kurz angesehen werden.
- Es fehlen jegliche soziodemographische Angaben über die Kohorte.
- Die Expositionsdauer der Handy-Besitzer könnte im Vergleich zur Latenzzeit einiger Krebsarten zu niedrig sein.

**Hardell et al. (1999)** führen eine Fallkontrollstudie an Patienten mit unterschiedlichen Gehirntumoren in der schwedischen Bevölkerung durch. Insgesamt werden 270 Tumorpatienten aus den Jahren 1994 bis 1996 anhand des Krebsregisters und 420 Kontrollen bei Patienten im Alter zwischen 20 und 89 Jahren bewertet. Davon wird eine Reihe von Tumorpatienten, basierend auf einer nicht begründeten medizinischen Indikation, von einer weiteren statistischen Betrachtung ausgenommen. Von den verbleibenden 209 Patienten mit Gehirntumoren haben 78, und von 425 Kontrollen haben 161 digitale GSM- oder analoge NMT-Handys verwendet. Die Dauer der Exposition wird an Hand von Interviews geschätzt. Die histopathologische Zuordnung der Tumore sowie die Angaben über ihre anatomische Lokalisation wird den Krankenakten entnommen. Der statistische Vergleich der Daten ergibt für alle Nutzer von Handys ein relatives Risiko von 0.98, wobei sich für die digitalen GSM-Systeme ein Wert von 0.97 und für die analogen NMT-Anlagen ein Wert von 0.94 ergibt. Der Vergleich der Tumorfrequenz im temporären und okzipitalen Bereich des Gehirns sowie zwischen der Handy-exponierten und -nichtexponierten Seite des Gehirns ergibt keine signifikanten Unterschiede. Die Aussagekraft dieser Studie wird gemindert durch die niedrige Anzahl von Patienten in einzelnen Gruppen, die nach der Art der Tumorerkrankung, Lokalisation des Tumors und dem Geschlecht der Patienten unterteilt werden. Der nicht erläuterte Ausschluss von mehr als 10 % der Patienten von der Auswertung der Daten wirft ebenfalls einen Schatten auf diese Studie. Schließlich ist die Expositionszeit sehr grob geschätzt, und sie ist bei einer Reihe von Krebserkrankungen mit einer langen Latenzzeit zu kurz, um eine abschließende Beurteilung abgeben zu können.

**Hansson Mild et al. (1998)** präsentieren eine Studie mit über 11.000 Nutzern von analogen und digitalen Handys bezüglich einer subjektiven gesundheitlichen Beeinträchtigung durch deren Felder. Die berichteten Symptome treten hauptsächlich im Bereich des Kopfes auf und beinhalten subjektive Beschwerden wie Kopfschmerzen, Müdigkeit, Wärme- und Schmerzwahrnehmung, etc. Etwa 13 % der befragten Nutzer von Handys in Schweden und 30 % in Norwegen geben mindestens ein Symptom im Zusammenhang mit der Benutzung von Handys zu Protokoll. Bei analogen wie auch digitalen Handys erhöht sich die Prävalenz

der Symptome mit der Dauer des Gespräches, wobei die Häufigkeit der Beschwerden bei den digitalen GSM-Handys niedriger ausfllt.

Die berichteten, relativ hohen Zahlen an Beschwerden müssen in Relation zu der intensiven und oft emotional geführten öffentlichen Diskussion in skandinavischen Ländern über eine eventuelle gesundheitliche Beeinträchtigung durch die elektromagnetischen Felder allgemein gesehen werden. Ähnliche Erhebungen über subjektive Symptome im Zusammenhang mit anderen, auch niederfrequenten Quellen elektromagnetischer Felder haben in Schweden und Norwegen grundsätzlich sehr hohe Prävalenzen im Vergleich zu anderen europäischen Ländern und den USA ergeben. Eine objektive Überprüfung dieser Ergebnisse wäre nur in komplizierten Testsequenzen mit einer hohen Anzahl von betroffenen Personen möglich.

### **Diskussion:**

Epidemiologische Untersuchungen versprechen einen Hinweis auf eine potentielle gesundheitsschädigende Wirkung eines im Verdacht stehenden Einflussfaktors zu geben. Das statistische Ergebnis einer epidemiologischen Untersuchung kann einen als Arbeitshypothese aufgestellten Verdacht eines Risikos zwar erhärten, eine Kausalität der ermittelten Korrelation ist damit jedoch in keiner Weise gesichert. Ein eventuell ursächlicher Zusammenhang zwischen einer Erkrankung und einem Einflussfaktor muss schließlich in in -vitro- und in-vivo-Untersuchungen nachgewiesen werden.

Damit von einer epidemiologischen Studie das Risiko einer gesundheitsschdigen Wirkung eines Umweltfaktors statistisch abgeleitet werden kann, müssen viele Grundbedingungen erfüllt werden. Da in jeder epidemiologischen Untersuchung die Häufigkeit einer oder mehrerer Erkrankungen von mindestens zwei Gruppen miteinander verglichen werden, sollen bis auf einen betrachteten Einflussfaktor alle anderen Umweltfaktoren und Lebensbedingungen in den Fall- und Kontrollgruppen bekannt sein und möglichst übereinstimmen. Diese Forderung ist insbesondere in Bezug auf die soziodemographischen Daten und die die Lebenshaltung charakterisierenden Einflüsse schwer erfüllbar. Die zwangsläufigen Unstimmigkeiten bringen eine schwer kalkulierbare Verfälschung der Ergebnisse mit sich.

Eine weitere Unsicherheit, insbesondere in den retrospektiven Fall-Kontroll-Studien, ist die Schwierigkeit, die Stärke und Einwirkdauer eines Einflussfaktors nachträglich korrekt zu ermitteln.

Die zahlreichen Unzulänglichkeiten einer jeden epidemiologischen Untersuchung machen deutlich, dass die Ergebnisse verlässlicher sind, wenn

- ein starker Zusammenhang zwischen einer Erkrankung und einem Einwirkfaktor vorliegt
- die an einem Krankheitsgeschehen beteiligten Kofaktoren bekannt sind

- der Einfluss der Kofaktoren in Fall- und Kontrollgruppe etwa gleich ist
- die Expositionsbedingungen bezüglich der Stärke und Einwirkdauer der betrachteten Einflussfaktoren bekannt sind
- gemessen an der Prävalenz einer Erkrankung adäquat große Fall- und Kontrollgruppen bzw. Kohorten zur Untersuchung herangezogen werden.

Diese Grundforderungen werden in keiner bisher durchgeführten epidemiologischen Studie erfüllt, und es stellt sich grundsätzlich die Frage, ob gegebener Situation und Entwicklungsstand diesen Anforderungen überhaupt Rechnung getragen werden kann.

Die epidemiologische Untersuchung der mutmaßlichen gesundheitsschädigenden Wirkungen der schwachen Felder von Mobilfunkstationen im D-Netz erscheint daher aussichtslos. Wegen der großen Abdeckung der städtischen wie auch ländlichen Gebiete mit den Feldern der Mobilfunkbasisstationen wird es schwierig oder gar unmöglich, eine vergleichbare Kontrollgruppe ohne Exposition zu finden. Darüber hinaus muss mit sehr unterschiedlichen Expositionsbedingungen einer jeden einzelnen Person in Abhängigkeit von ihrem jeweiligen Aufenthaltsort gerechnet werden, da die Feldstärken dieser Felder nicht nur vom Abstand von der Antenne, sondern auch von vielen anderen Faktoren, wie z. B. Art und Umfang der Bebauung, abhängig ist. Schließlich wäre eine Fokussierung auf die Felder der Mobilfunkbasisstationen ohne Berücksichtigung der an Ort und Stelle häufig wesentlich stärker auftretenden elektromagnetischen Felder der Fernseh- und UKW-Sender wenig sinnvoll.

Unter der Prämisse, dass eine eventuelle gesundheitsschädigende Wirkung der Felder von Mobilfunkanlagen bei stärkeren Feldern deutlich zu erkennen ist, haben sich die bisher durchgeführten epidemiologischen Untersuchungen auf die Felder der Handys konzentriert. Alle bisherigen Untersuchungen, einschließlich der im vorigen Abschnitt diskutierten Arbeiten (Rothman et al., Hardell et al., Hansson Mild et al.) können nur als initiale Studien betrachtet werden.

Die Untersuchung von **Rothman et al. (1996)** ist sehr schmalspurig auf die Mortalität ausgerichtet, ohne dass eine vertiefende Analyse der Todesfälle durchgeführt wird.

Auch die Arbeit von **Hardell et al. (1999)** weist als eine retrospektive Fall-Kontroll-Studie eine relativ niedrige Anzahl von Patienten in den einzelnen Fallgruppen auf.

Die relativ niedrige Prävalenz der Gehirntumore mit 4 bis 8 Fällen pro 100.000 erfordert größere Gruppen mit unterschiedlichen Gehirntumoren, da eine statistisch sicherere Aussage, insbesondere über eine geringe Erhöhung der Häufigkeit einer Erkrankung gegenüber der Allgemeinbevölkerung, getroffen werden soll. Zusätzlich ist die Unsicherheit bei der retrospektiven Bestimmung der Expositionsbedingungen als ein verfälschender Faktor zu berücksichtigen.

In der Studie von **Hansson Mild et al. (1998)** stehen subjektive Beschwerden der betrachteten Personengruppe im Vordergrund, die ebenfalls auf eine Reihe von psychischen

Faktoren zurückgeführt werden können, die in der Studie nicht erfasst werden können. Aus dem aktuellen Wissensstand der Epidemiologie kann zwar nicht abgeleitet werden, dass die Felder der Mobilfunkanlagen keine gesundheitsschädigende Wirkung verursachen, jedoch deuten die Ergebnisse an, dass es zu keiner gravierenden Beeinträchtigung der Gesundheit durch diese Felder kommt.

Auf der Grundlage dieser Erfahrung, dass, falls überhaupt, nur mit schwachen Effekten zu rechnen ist, lassen sich für zukünftige epidemiologische Untersuchungen folgende Empfehlungen ableiten:

- Nur für die Felder der Handys lässt sich eine klare Unterscheidung zwischen einer exponierten und einer nichtexponierten Gruppe durchführen.
- Die Untersuchungen sollen prospektiv durchgeführt werden, damit möglichst viele Faktoren und Kofaktoren ermittelt und quantitativ bestimmt werden können.
- Die Kohorten müssen größere Patientengruppen umfassen, damit eine statistisch sicherere Aussage getroffen werden kann. Dies verlangt eine Erweiterung der epidemiologischen Untersuchungen auf eine breite Bevölkerungsbasis.
- Bei der Auswahl der zu bewertenden Gruppen muss die Latenzzeit einiger Erkrankungen berücksichtigt werden, die bei z. B. Gehirntumoren zwischen 2 und 16 Jahren liegt.
- Für die Dosimetrie muss ein Verfahren entwickelt werden, mit dem die Expositionsstärke pro Zeiteinheit ermittelt werden kann.

Vollständigkeitshalber muss darauf hingewiesen werden, dass unter Berücksichtigung bisheriger Arbeiten die epidemiologischen Untersuchungen bezüglich einer eventuellen Wirkung der von den Handys ausgehenden elektromagnetischen Felder auf den Menschen sehr umfangreich angelegt werden müssen. Ein großer zeitlicher und finanzieller Aufwand mit ungewissem Ausgang muss dabei ins Kalkül gezogen werden.

## 7. Einfluss der Mobilfunkfelder auf das Krebsgeschehen

### 7.1 Aspekte des Krebsgeschehens

In Deutschland erkranken jährlich insgesamt etwa 350.000 Menschen an Krebs, wobei mehr als 250.000 Erkrankte im Alter von über 60 Jahren vertreten sind. Damit wird klar, dass Krebs vor allem eine Alterskrankheit ist. Krebs ist nicht nur in Deutschland, sondern in den meisten westlichen Industrieländern nach den Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems die zweithäufigste Todesursache.

Die vorliegenden Kenntnisse über die Entstehung, den Verlauf und eine mögliche Therapie sind trotz aller wissenschaftlichen Fortschritte noch sehr lückenhaft. Deshalb ist es verständlich, dass viele Menschen die Frage stark bewegt, welche Ursachen für das Krebsgeschehen verantwortlich sind und welche Gegenmaßnahmen getroffen werden können. Ein grundlegendes Verständnis des Erkrankungsprozesses ist wegen der Komplexität des Krebsgeschehens nicht vorhanden, und dieses Ziel wird auch in den nächsten Jahren nicht erreicht werden. Als gesichert gilt, dass nicht nur eine Ursache, sondern mehrere Faktoren zur Entstehung und Entwicklung der Krebserkrankung führen. Eine Reihe von Untersuchungen hat übereinstimmend gezeigt, dass verschiedenartige Umwelteinflüsse, Lebensgewohnheiten sowie technische und zivilisatorische Belastungen als Risikofaktoren beim Krebsgeschehen aufgeführt werden können.

Wissenschaftlich steht fest, dass das Krebsgeschehen seinen Ursprung in der Veränderung oder Schädigung der genetischen Information in der Zelle hat. Eine wesentliche Rolle spielen dabei bestimmte Abschnitte des Erbgutes, die sogenannten Onkogene, die nicht nur in der Krebszelle, sondern auch im normalen Zellkern vorkommen. Die Mutation ist ein Vorgang zu Beginn eines Prozesses, der zur Entstehung von Krebs führt. Alle bisherigen Ergebnisse sprechen dafür, dass es sich bei der Karzinogenese um einen mehrstufigen Prozess handelt, bei dem Proto-Onkogene durch eine Veränderung der DNA aktiviert werden. Die Veränderung der DNA kann an zahlreichen Stellen und auf verschiedene Weise erfolgen. Demnach unterscheidet man zwischen Gen-Mutationen, Chromosomen-Mutationen und Geno-Mutationen. Jede Zelle verfügt über enzymatische DNA-Reparaturmechanismen, die die Schäden bis zu einem gewissen Grad richtig und vollständig reparieren können. Sind die Schäden nicht reparabel, stirbt die Zelle ab oder sie kann sich unkontrolliert vermehren. Die genauen molekularen und zellulären Vorgänge in der Zelle bei der Krebsentstehung und -entwicklung sind allerdings nicht ausreichend bekannt. Im Groben wird zwischen den Phasen der Initiation, der Promotion und der Progression unterschieden.

Elektromagnetische Wellen werden ebenfalls als Risikofaktor bei der Entstehung bzw. Promotion des Krebsgeschehens verdächtigt. Dies gilt insbesondere für die ionisierenden elektromagnetischen Strahlen, die durch ihre hohe elementare Energie die Bindung zwischen einzelnen Atomen und Molekülen der DNA auflösen und damit initiale Schäden ver-



ursachen können.

Die Forschung hat sich in den letzten 20 Jahren sehr intensiv mit den postulierten Wirksamkeiten der nichtionisierenden elektromagnetischen Felder auf das Krebsgeschehen auseinandergesetzt. Die ersten Anstöße kamen aus der Epidemiologie bezüglich einer mutmaßlichen Karzinogenese niederfrequenter elektromagnetischer Felder. Inzwischen werden sehr spezifische Untersuchungen zur diskutierten Beeinflussung des Krebsgeschehens in niederfrequenten wie auch in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern vorgenommen. Da bis heute keine allgemein akzeptierte Vorstellung über die eventuellen Wirkungsmechanismen dieser Felder auf die Karzinogenese vorliegt, müssen in-vitro- und in-vivo-Untersuchungen durchgeführt werden, die auch die einzelnen Schritte der Zellreplikation überprüfen.

## 7.2 Einfluss von Mikrowellen auf die Karzinogenese in Tierexperimenten

Der direkte Beweis einer karzinogenen Einflussnahme von toxischen Chemikalien, ionisierender elektromagnetischer Strahlung, des Rauchens oder von Asbest auf das Krebsgeschehen wird in Tierexperimenten erbracht. Dazu wurden verschiedene Modelle ausgearbeitet, die in Vergleichsuntersuchungen mit und ohne Einwirkung der verdächtigen Substanz oder der physikalisch/chemischen Größen auf

- die spontane Inzidenz tierspezifischer Tumoren
- die Promotion und Progression der in Tieren chemisch oder über Strahlung induzierten Tumoren
- die Promotion und Progression der in Tieren implantierten Tumore und schließlich
- die Tumorzinzidenz bei genetisch manipulierten Tieren

die Karzinogenität aufzeigen können. Bei jedem dieser Modelle werden bestimmte Vor- und Nachteile gesehen, so dass für die Anwendung bei der Untersuchung eventueller karzinogener Wirkungen der Mikrowellen keines dieser Modelle favorisiert werden kann.

Die spontane Tumorzinzidenz, die unter standardisierten Versuchsbedingungen mit und ohne Feldeinwirkung des Feldes ermittelt wird, liefert die beste Basis für die Beurteilung, da die wesentlichen Einflussfaktoren stark reduziert werden können. Auf der anderen Seite sind in diesem Modell wegen der relativ niedrigen Tumorzinzidenz gesunder Tiere und der langen Latenzzeit der meisten Tumore umfangreiche und zeitintensive Experimente erforderlich, damit eine ausreichende statistische Basis gewährleistet ist.

Der Umfang und die Dauer einer Studie zur Karzinogenität können wesentlich verringert werden, wenn die Versuchstiere zur Einleitung eines Tumorgeschehens mit karzinogenen

Stoffen oder Mitteln vorbehandelt werden. Der Nachteil dieser Methode ist, dass auf diese Weise eine schwer kalkulierbare Schädigung des Körpers induziert wird, die die Ergebnisse sehr unterschiedlich beeinflussen kann. Dadurch wird die Interpretation der Resultate und ihre Übertragbarkeit auf den Menschen erschwert.

Experimente mit implantierten Tumorzellen bringen ebenfalls eine große Unsicherheit mit sich, da das Entwicklungsstadium der implantierten Tumorzellen sowie die Implantationslage und die Karzinogenitätsanlage des Tieres schwer standardisierbar sind.

Die besten Aussichten für die Zukunft zeigen Modelle mit genetisch manipulierten Tieren. Diese Methode verspricht eine hohe Homogenität der Versuchstiere bezüglich ihrer Antworten auf die DNA-Schädigung und erfüllt damit eine der fundamentalen Anforderungen bei der Suche von reproduzierbaren Ergebnissen. Die Nachteile dieser Methode liegen in der Problematik, nicht nur für die jeweilige Krebserkrankung, sondern auch für die karzinogene Größe zugeschnittene genetische DNA-Veränderungen zu finden und sie bei Versuchstieren einheitlich zu etablieren. Unter dieser Prämisse müssen die bisherigen Tier-Studien gesehen werden. Die wichtigsten sind im folgenden kurz zusammengefasst.

#### **Spontanes Tumorwachstum:**

**Chou et al. (1992)** führen Untersuchungen zur spontanen Tumorzinzidenz an je 100 männlichen Sprague-Dawley-Ratten in Feld- und Kontrollversuchen durch. Die Feldexposition erfolgt im 2.45 GHz-Feld mit Pulsmodulation (Pulsdauer 10  $\mu$ s, 800 Pulse/s) in einem zirkulär polarisierten Wellenleiter. Die Expositionsdauer beträgt bis zu 25 Monate und 21.5 Std. täglich. Die kalorimetrisch ermittelte Ganzkörper-SAR liegt zwischen 0.15 und 0.4 W/kg. Nach 25 Monaten oder nach dem Tod der Tiere wird die Häufigkeit der neoplastischen Läsionen (gutartig, bösartig) pro Tier und Organ histopathologisch bestimmt. Nach einem Alter von 18 Monaten steigt die Häufigkeit der Läsionen in beiden Gruppen stark an, wobei die höchste Inzidenz im endokrinen System zu beobachten ist. Obwohl einzelne Vergleiche zwischen den Inzidenzen in Kontroll- und exponierten Tieren keine statistische Signifikanz zeigen, ist die Summen-Inzidenz der primären bösartigen Tumore in exponierten Tieren wesentlich höher. Dieses irreführende Ergebnis wird von den Autoren auf die niedrige Anzahl der Tiere, gemessen an der Anzahl der bewerteten Läsionsarten, zurückgeführt.

**Toler et al. (1997)** führen Untersuchungen zur spontanen Tumorzinzidenz bei 400 C3H/HeJ-Mäusen durch, die eine Anlage zur Brustkrebsentwicklung aufweisen. Weitere 200 Tiere erfahren eine Scheinexposition. Zur Exposition von insgesamt 200 Tieren werden horizontal polarisierte 435 MHz-gepulste Mikrowellen (1  $\mu$ s Pulsdauer, 1000 Pulse/s) mit einer Leistungsdichte von 1 mW/cm<sup>2</sup> angewandt. In der 21-monatigen Exposition (22 Std./Tag, 7 Tage/Woche) beträgt die kalorimetrisch ermittelte Ganzkörper-SAR 0.32 W/kg. Nach 21 Monaten erfolgt bei allen Tieren eine histopathologische Untersuchung des Gewe-

bes. Zur statistischen Bewertung werden die Inzidenzen und die Anzahl der gefundenen nicht- und neoplastischen Läsionen pro Fundstelle und Tier herangezogen. Die Überlebenswahrscheinlichkeit wird mit Hilfe der Kaplan-Meier-Methode ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen keine Unterschiede im Hinblick auf die Latenz der Tumorentstehung, die Tumor-Wachstumsrate sowie die gesamten Tumorzinzidenz. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Überlebens ist in beiden Gruppen vergleichbar, die histopathologischen Überprüfungen ergeben keine auffälligen Unterschiede zwischen den Kontroll- und den Feldgruppen.

Zu den gleichen negativen Ergebnissen kommen **Frey et al. (1998)**, die ebenfalls eine spontane Tumorzinzidenz des Brusttumors bei 100 C3H/HeJ-Mäusen überprüfen. Dabei werden 2.45 GHz-Felder (CW) mit einer Ganzkörper-SAR von 0.3 W/kg in einer 18-monatigen Exposition (20 Std./Tag, 7 Tage/Woche) appliziert. Nach der Überprüfung erfolgt eine histopathologische Untersuchung. Der statistische Vergleich zeigt keinen signifikanten Unterschied in der Inzidenz (Scheinxposition: 52 %, Exposition: 44 %), der Latenz des Tumorbeginns (Scheinxposition: 62.3 Wochen, Exposition: 64 Wochen) und der Wachstumsrate des Brusttumors.

### Chemisch oder durch Strahlen initiierte Tumore:

Die meisten Untersuchungen zum Nachweis einer Krebspromotion durch die Mikrowellen werden an Tieren durchgeführt, bei denen das Tumorgeschehen chemisch oder über Strahlung eingeleitet wird.

**Wu et al. (1994)** lassen 2.45 GHz-CW-Mikrowellen mit einer Leistungsdichte von 10 mW/cm<sup>2</sup> und einer Ganzkörper-SAR zwischen 10 und 12 W/kg 5 Monate lang auf 4-5 Wochen alte BALB/c-Mäuse (je 50 % männlich und weiblich) einwirken. 115 Tiere werden in 4 etwa gleich große Gruppen aufgeteilt. Eine Gruppe dient als Kontrolle (A), die zweite Gruppe (B) wird mit Dimethylhydrazin (DMH) behandelt, das in Mäusen nachweislich große Darmtumore initiiert. Die dritte Gruppe (C) wird mit DMA und zusätzlich mit Mikrowellen exponiert. In der 4. Gruppe (D) erfahren die Tiere neben DMH auch eine Behandlung mit 12-O-Tetradecanoylphorbol-13-Azetat (TPA), das als starker Tumorpromotor gilt. Die Inzidenz der Darmtumore ist in den Gruppen B, C, und D nicht statistisch signifikant unterschiedlich. In Gruppe D ist die Anzahl und die Größe der Tumore wesentlich höher als in den Gruppen B und C. Keine statistisch signifikanten Differenzen sind zwischen den Gruppen B und C zu finden. Die Resultate lassen keine Wirkung der Mikrowellen auf die Tumorprogression erkennen.

**Imaida et al. (1998b)** applizieren 1.44 GHz-Mikrowellen als Nahfeld mit einer Pulsmodulation (Pulsbreite 6.7 µs, 50 Pulse/s) auf 6 Wochen alte männliche F 344-Ratten mit induziertem Lebertumor und lassen sie 6 Wochen lang einwirken. Die Ganzkörper-SAR beträgt dabei 0.4-0.7 W/kg. Die Tumorinitiation erfolgt chemisch mit Diethylmitrosamin (DEN) in 48 Tieren, je 24 dienen als Kontrolle oder werden zusätzlich mit Mikrowellen befeldet. Zur Beurteilung des Potentials der Karzinogenese wird die Anzahl der positiven Foci in der Leber der Tiere ausgezählt und verglichen. Ein statistischer Vergleich zwischen den exponierten und nichtexponierten Tieren zeigt keinen signifikanten Effekt der Mikrowellen.

Auch eine weitere Untersuchung von **Imaida et al. (1998a)** am gleichen Krebspromotionsmodell (männliche F 344-Ratten mit DEN-Vorbehandlung) verwendet ein 929.2 MHz-Nahfeld mit japanischer TDMA-Modulation (50 Pulse/Sek. Tastverhältnis 33 %). Die zeitlich gemittelte maximale SAR liegt bei 6.6-7.2 W/kg, wohingegen in der Leber nur Werte zwischen 1.7 und 2 W/kg erreicht werden. Die Ganzkörper-SAR wird im Mittelwert mit 0.58-0.8 W/kg angegeben. Nach der Untersuchung wird bei den Tieren eine histopathologische Analyse von Proben aus Leber, Milz, Thymusdrüse und Nebennieren vorgenommen. Nur in der Leber werden Veränderungen beobachtet. Der statistische Vergleich ergibt keine Differenz zwischen DEN-vorbehandelten und DEN-vorbehandelten und exponierten Tieren.

**Adey et al. (1999)** beobachten die Häufigkeit spontaner und chemisch induzierter ZNS-Tumore in Fischer 344-Ratten bei der Applikation von 836 MHz-Feldern mit NADC-Pulsmodulation (Pulsbreite 6.7 µs, 50 Pulse/s). In der Befeldung werden Fern- und Nahfeldbedingungen simuliert. Die Ganzkörper-SAR des Nahfeldes liegt je nach Gewicht der Tiere zwischen 0.27 und 0.72 W/kg, wobei im Gehirn eine SAR zwischen 0.74 und 1.6 W/kg geschätzt werden. Eine kalometrische Überprüfung am Kadaverin hat für das Gehirn eine SAR von 1.8-2.3 W/kg ergeben.

In einigen Tieren sind ZNS-Tumore zu Beginn der Experimente mit ENU (n-Ethyl-N-Nitrosourea) initiiert. 36 seit 15 Tagen trüchtige Tiere werden in 4 Gruppen eingeteilt, die in 2 Phasen nach dem Schema Kontrolle/Kontrolle, Kontrolle/Feld, ENU/Kontrolle, und ENU/Feld behandelt werden. Zwischen dem 19. und 23. Tag der Trächtigkeit beginnt die Exposition mit dem Fernfeld. Ab dem 35. Tag (2 Std./Tag, 4 Tage/Woche, 22 Monate) werden die trächtigen Ratten und ihre Würfe (insgesamt 236 Ratten) mit dem Nahfeld exponiert. 182 Tiere überleben die Experimente, die gestorbenen 54 Ratten werden als eine separate Gruppe bewertet. In der Autopsie und einer histologischen Untersuchung werden die ZNS-Tumore klassifiziert. Der statistische Vergleich der Ergebnisse beider Gruppen (früher gestorbene und überlebende Ratten) zeigt, dass die Befeldung keine krebspromovierende, sondern vielmehr eine tumorhemmende Wirkung aufweist. Diese "positive" Wirkung wird von den Autoren auf die statistische Unzulänglichkeit bei sehr kleinen homogenen Gruppen zurückgeführt.

**Chagnaud et al. (1999)** führen Untersuchungen unter der Einwirkung von GSM-900-MHz-Mikrowellen an weiblichen Sprague-Dawley-Ratten durch, bei denen chemisch Sarkoma-Tumore induziert wurden. Insgesamt werden 124 weibliche, 50-60 Tage alte Ratten mit einem Gewicht zwischen 180 g und 200 g herangezogen und in 14 Gruppen mit je 6-9 Tieren eingeteilt. Die Tumorentstehung wird chemisch mit Benzo(a)pyren (BP) eingeleitet. Zusätzlich werden alle Tiere, bis auf eine Kontrollgruppe, 20, 40 und 75 Tage nach der BP-Injektion 2 Std. täglich, 2 Wochen lang mit Mikrowellen exponiert. Eine Hornantenne baut in den 65 cm entfernten Käfigen eine Leistungsdichte von 55 oder 200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  auf, was bei den Tieren zu einer Ganzkörper-SAR zwischen 75 und 270  $\text{mW}/\text{kg}$  führt.

In der Reihe der Studien mit transplantierten Tumorzellen werden ähnliche Resultate berichtet.

**Santini et al. (1988)** berichten über Untersuchungen mit schwangeren C57BL/6J-Mäusen, bei denen B16-Melanom-Zellen vor einer Feldexposition initiiert werden. Bei der Exposition kommen 245 GHz-Felder mit kontinuierlicher Welle oder pulsmoduliert (10  $\mu\text{s}$  Pulsdauer, 5  $\mu\text{s}$  Pause in 10 ms-Paketen mit 30 ms Pause) zum Einsatz. Die Leistungsdichte liegt in beiden Fällen bei 1  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , die Ganzkörper-SAR erreicht 1.2  $\text{mW}/\text{g}$ . Die Tiere werden 2.5 Std./Tag, 6 mal pro Woche, bis maximal 690 Std. exponiert. Die Tumorgroße und die Anzahl der überlebenden Tiere in der schein- und exponierten Gruppe werden statistisch verglichen. Die Autoren können keinen Effekt der Mikrowellen auf die Anzahl der Tumore sowie auf das Überleben der Versuchstiere feststellen.

**Salford et al. (1993)** führen Untersuchungen über die Einflüsse von Mikrowellen auf Fischer 344-Ratten durch, bei denen RG2-Glioma-Tumorzellen initiiert werden. Gruppen mit 4-11 Tieren werden in einer TEM Zelle einem 915 MHz-Feld mit kontinuierlicher Welle oder gepulst (7 Std./Tag, 5 Tage/Woche) bis zu 3 Wochen lang ausgesetzt oder scheinexponiert. Die kontinuierliche Welle mit einer Spitzenleistung von 1 W produziert in den 150 g - 200 g schweren Ratten eine Ganzkörper-SAR von 1.67  $\text{W}/\text{kg}$ . Die Kennwerte der pulsmodulierten 2 W-Welle variieren in der Modulationsfrequenz (4, 8.33, 16, 50, 217 Hz), der Pulslänge (0.57 und 6 ms) und in der Ganzkörper-SAR (0.0077 bis 1  $\text{W}/\text{kg}$ ). Die Tumorentwicklung im Gehirn wird histopathologisch/mikroskopisch untersucht. Aus den Ergebnissen lässt sich kein statistisch begründeter Einfluss der Mikrowellen auf das Tumorstadium ableiten.

**Higashikubo et al. (1999)** präsentieren Untersuchungen über die Einwirkung von Mikrowellen auf das Tumorstadium von Fischer 344-Ratten, bei denen 9L-Gliosarkoma-Zellen im Gehirn initiiert wurden. Insgesamt werden 293 35 g-70 g schwere Tiere, davon 101 in Kontrollexperimenten, herangezogen. Bei der Befeldung kommen alternativ 835.62 MHz-frequenzmodulierte Felder oder CDMA-modulierte 847.74 MHz-Mikrowellen zum Einsatz. Bei beiden Feldarten beträgt die Ganzkörper-SAR  $0.75 \pm 0.25 \text{ W}/\text{kg}$ . Die Feld-Tiere werden 4 Std./Tag, 4 Tage/Woche, 4 Wochen vor und 150 Tage nach der Tumorentstehung exponiert. Während der Studie werden die Ratten neurologisch und anschließend das Gehirn auf Gliosarkoma-Tumore histopathologisch untersucht. In der statistischen Bewertung zeigt sich in den Tumor-Charakteristika sowie in der Überlebensrate kein Unterschied zwischen den exponierten und den nichtexponierten Tieren.

20 transgene weibliche Mäuse vom Typ E $\mu$ -Pim 1, die zur Entwicklung von Lymphom-Tumoren neigen, kommen in Untersuchungen zur Einwirkung von Mikrowellen auf das Tumorstadium von **Repacholi et al. (1997)** zum Einsatz. Als Kontrolle dienen 100 Tiere, die restlichen 101 Ratten werden 2 mal je 30 Min./Tag 8 Monate lang mit einer planaren GSM-900 MHz-Welle befeldet. Unter Fernfeld-Bedingungen liegt die Leistungsdichte zwischen 2.6 und 13  $\text{W}/\text{m}^2$ , was zu SAR-Spitzenwerten zwischen 1.008 und 4.2  $\text{W}/\text{kg}$  bzw. Ganzkörper-Mittelwerten zwischen 0.13 und 1.4  $\text{W}/\text{kg}$  führt.

Die Ergebnisse zeigen eine 2.4-fache Erhöhung der Inzidenz von Lymphom-Tumoren in feldexponierten Tieren. Diese Ergebnisse könnten eine interessante Information über die mögliche Interaktion zwischen Mikrowellen und dem Krebsgeschehen liefern, falls sie in den laufenden Replikationen bestätigt werden.

Unabhängig davon muss weiterhin geklärt werden, inwieweit derartige Ergebnisse auf den Menschen übertragbar sind, da beim Menschen derartige Mutationen nicht vorkommen.

#### **Diskussion:**

Die Ergebnisse von Untersuchungen der Karzinogenese in Tieren mit spontanen, chemisch induzierten und durch Implantation von Krebsstellen initiierten Tumoren zeigen übereinstimmend keine promovierende Wirkung von Mikrowellen. Diese Erfahrung wurde gewonnen aus Mikrowellen, deren Frequenz zwischen 870 MHz und 2.45 GHz liegt, und die unterschiedliche Modulationen (CW, Frequenzmodulation, Pulsmodulation, GSM, NADC, CDMA, etc.) aufweisen.

In Experimenten werden Felder mit Leistungsdichten und SAR-Werten verwendet, die vergleichbar oder höher liegen als die stärksten auf den Menschen im Alltag einwirkenden D-Netz-Felder der Handys. Die Ergebnisse geben keinen Hinweis auf eine krebspromovierende Wirkung der Handy-Felder. Umso mehr gilt diese Feststellung für die Felder der Basisstationen, die mindestens um einen Faktor 1000 schwächer sind als die Felder der Handys. Durch die mehrmonatige Exposition der Tiere kann von den Resultaten auch ein Hinweis auf eine eventuelle Langzeitwirkung von Mikrowellen abgeleitet werden.

Aus den Ergebnissen lässt sich kein Verdacht, weder auf eine direkte, noch auf eine kumulative Wirkung von Mikrowellen bei der Promotion der ZNS-Tumore ableiten.

Die in Tierexperimenten erhobenen Resultate sind auf den Menschen nicht völlig übertragbar, sie deuten aber mit einer großen Wahrscheinlichkeit auf das Nichtvorhandensein krebspromovierender Effekte unter der Einwirkung von Mikrowellen der Mobilfunkanlagen im D-Netz hin.

### **7.3 Chromosomen-Mutationen und -Aberrationen**

Chromosomen und ihre Untereinheiten Chromatide bestehen aus strukturellen Einheiten, deren Berührungsstellen eine erhöhte Restitutionsneigung zeigen. Die in dieser Interphase durch spontane oder auch durch äußere Einflüsse häufig auftretenden Brüche führen zu unterschiedlichen Schäden der DNA. Im Prinzip wird unterschieden zwischen:

- Defizienten bzw. Deletionen durch den Verlust von Chromosomenregion
- Duplikationen
- Translationen und Inversionen durch den Umbau von DNA-Einheiten.

Derartige Schäden werden ebenfalls im Zusammenhang mit der Einwirkung von ionisierenden elektromagnetischen Feldern aufgezeigt und mit dem Krebsgeschehen positiv korreliert.

Für die nichtionisierenden Mikrowellen mit einem Frequenzbereich um 1 GHz stehen zu dieser Problematik nur wenige Publikationen über in-vitro- und in-vivo-Untersuchungen einzelner Schädigungen der DNA zur Verfügung, die eine ausreichende Qualität gewährleisten.

Die Formation von Mikronuklei, die auf eine Inversion zurückgeführt wird, untersuchen **Vijayalaxmi et al. (1997)** an C3H/HeJ-Mäusen unter Einwirkung von Mikrowellen. Diese Tiere neigen zu einer erhöhten Entwicklung von Brustkrebs. Neben einer Kontrollgruppe und einer Gruppe für eine positive Kontrolle wird eine Gruppe von Mäusen mit kontinuierli-

chen Mikrowellen mit einer Frequenz von 2.45 GHz exponiert. Die Ganzkörper-SAR beträgt 1 W/kg in einer Exposition, die 20 Std. pro Tag, 7 Tage pro Woche und insgesamt 18 Monate lang andauert. In Experimenten werden 225 4 Wochen alte weibliche Mäuse verwendet. Je 100 Tiere werden zufällig einer schein- und exponierten Gruppe zugeteilt, 25 dienen als positive Kontrolle. Die Mäuse zur positiven Kontrolle werden mit dem chemischen Promotor Mitomycin C 24 Std. vor dem Abschluss der Untersuchung behandelt. Die Genotoxizität in Blut und Knochenmark wird zytologisch untersucht. Darüber hinaus werden die Tiere seziert und histologisch überprüft.

Die statistische Bewertung zeigt eine signifikante Erhöhung der Inzidenz von Mikronuklei in positiven Kontrollen. Im Vergleich zwischen exponierten und scheinexponierten Tieren ergibt sich kein Unterschied der Inzidenz von Mikronuklei in jungen polychromatischen Erythrozyten des peripheren Blutes und des Knochenmarks.

Die Frequenz des Schwesterchromatid-Austausches wird in mehreren in-vitro-Studien geprüft. **Ciaravino et al. (1991)** nutzen für diese Untersuchung Eierstock-Zellen der chinesischen Hamster. Neben den Kontrollgruppen stehen zum Vergleich Zellen, die zusätzlich einem chemischen Mutanten und/oder Mikrowellen ausgesetzt waren. Die 2.45 GHz-Felder sind pulsmoduliert (Pulsbreite 10  $\mu$ s, 25.000 Pulse/s) und wirken 2 Std. auf die Eierstockzellen ein. Die SAR beträgt 33.8 W/kg, sie führt zu einer Erwärmung der Zellen auf 39.7°C. Untersucht wird die Fähigkeit von Mikrowellen, die Verteilung der Zellen im ersten und zweiten Zyklus der Mitose allein im Verhältnis zu toxisch mit Adriamycin behandelten Zellen zu ändern. Weiterhin wird geprüft, ob die applizierten Mikrowellen die Anzahl des Schwesterchromatid-Austausches, induziert mit Adriamycin, beeinflussen können.

Die Ergebnisse zeigen keinen Einfluss von Mikrowellen auf Frequenz des Schwesterchromatid-Austausches, weder bei der direkten Applikation auf die chemisch behandelten, noch bei der Exposition der nichtmutierten Zellen.

Maes et al. widmen sich der Frequenz des Schwesterchromatid-Austausches in drei unterschiedlichen in-vivo-Untersuchungen mit humanen Lymphozyten.

In der Studie von **Maes et al. (1993)** werden menschliche Lymphozyten bei einer konstanten Temperaturhaltung von 36°C für 30 oder 120 Min. einem 2.45 GHz-Feld mit einer kontinuierlichen Welle ausgesetzt. Obwohl eine Leistung von 80 mW/ml entsprechend einer SAR von 75 W/kg appliziert wird, kommt es zu keiner signifikanten Veränderung der Schwesterchromatid-Austauschfrequenz.

In einer weiteren Untersuchung von **Maes et al. (1995)** werden humane Lymphozyten bei 17°C gehalten, alternativ mit chemischen Mutagenen behandelt und zusätzlich 954 MHz-Mikrowellen mit einer GSM-Modulation ausgesetzt. Bei der jeweils zweistündigen Feldexposition beträgt die SAR 1.5 W/kg. Die Resultate zeigen keinen Einfluss der Mikrowellen auf

die chemisch unbehandelten Zellen. Dagegen wird eine Erhöhung der Häufigkeit des Schwesterchromatid-Austausches in chemisch mutierten Lymphozyten nach der Feldexposition deutlich.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in einer nachfolgenden Studie von **Maes et al. (1997)** unter Verwendung von 935 MHz-Mikrowellen ohne Modulation (CW) bestätigt. Humane Lymphozyten, behandelt mit mutagenem Mitomycin C zeigen nach der Feldexposition eine erhöhte Häufigkeit des Schwesterchromatid-Austausches, wohingegen bei unbehandelten Zellen kein Effekt festzustellen ist. Die systematische Faktorisierung des Versuchsablaufes und die dabei gewonnenen Resultate lassen den Schluss zu, dass nur beschädigte Zellen einen Einfluss durch Mikrowellen erfahren. Dabei hat die Art der Modulation (CW oder GSM) keinen Einfluss auf das Ergebnis der Untersuchung. Für eine dosimetrische Betrachtung der Schwellenwerte der Feldstärken reichen die bisherigen Resultate allerdings nicht aus.

Klastogene Wirkungen von Mikrowellen werden über die Häufigkeit der chromosomalen Aberrationen in vivo in mehreren Studien ermittelt.

**Manikowska-Czerska et al. (1985)** untersuchen die Häufigkeit der chromosomalen Aberration in den männlichen Keimzellen der CBA/CEY-Mäuse (Alter 10 Wochen, Gewicht 21-25 g). Neben der Kontrolle werden Tiergruppen in einem Wellenleiter mit einem 2.45 GHz-Feld ohne Modulation (CW) 30 Min./Tag, 6 Tage/Woche und insgesamt 2 Wochen lang exponiert. Die Ganzkörper-SAR beträgt alternativ 0.05, 0.5, 5, 10 und 20 W/kg. Vor und nach der Exposition wird die Rektaltemperatur gemessen. Die Ergebnisse der chromosomalen Analyse von 960 Zellen und der Inzidenz der Translokationen pro Gruppe werden statistisch bewertet.

Die Ergebnisse zeigen eine erhöhte Häufigkeit von chromosomalen Aberrationen bei feldexponierten Tieren gegenüber Kontrolltieren und höheren Werten der SAR zwischen 10 und 20 mW/kg. Die Veränderungen können nicht auf eine Erwärmung zurückgeführt werden.

Eine Replikation dieser Experimente wird bei **Beechey et al. (1986)** unter vergleichbaren Expositions- und Versuchsbedingungen mit C3H/HeH-Mäusen durchgeführt. 8-10 Wochen alte Tiere werden in Gruppen von 4 Tieren alternativ scheinexponiert oder einem 2.45 GHz-Feld, amplitudenmoduliert mit 100 Hz für 30 Min./Tag, 6 Tage/Woche, insgesamt 2 Wochen lang, ausgesetzt. Die Leistungsdichte des Fernfeldes beträgt 1, 100 und 400 W/m<sup>2</sup>, was einer Ganzkörper-SAR von 0.05, 5 und 20 W/kg entspricht. Bei exponierten Tieren wird am 1., 6. und 12. Tag die Rektaltemperatur gemessen. Zur Bewertung wird die Frequenz der chromosomalen Aberration in Spermatozyten und die Rektaltemperatur herangezogen. Nur unter der Leistungsdichte von 400 W/m<sup>2</sup> kommt es zu einer nennenswer-



ten Erhöhung der Rektaltemperatur um 3°C. Schon 2-3 Tage nach der Exposition mit dieser Leistungsdichte liegt die Frequenz der chromosomalen Aberration statistisch nicht signifikant um ca. 1.5 % höher. Ein kleiner aber signifikanter Anstieg der Anzahl von Spermien zeigt sich 12-13 Tage nach der Exposition. Diese Resultate werden auf die durch Mikrowellen erhöhte Temperatur zurückgeführt.

Untersuchungen von chromosomalen Aberrationen in humanen Lymphozyten werden von **Maes et al. (1993, 1995)** durchgeführt.

Bei **Maes et al. (1993)** werden humane periphere Blut-Lymphozyten mit CW-2450 MHz-Mikrowellen 30 oder 120 Min. lang befeldet. Die Temperatur der Kulturlösung wird konstant bei 36.1°C gehalten. Die Blutproben kommen von 2 Spendern, und zwar einem 38-jährigen Mann und einer 34-jährigen Frau. 48 und 72 Std. nach der Exposition und Zellvorbereitung werden chromosomale Aberrationen, die Frequenz des Schwesterchromatid-Austausches sowie die Inzidenz von Mikronuklei ermittelt. Nur die 120-minütige Exposition verursacht einen statistisch signifikanten Anstieg der Häufigkeit chromosomaler Aberrationen. In ähnlicher Weise steigt die Anzahl der Mikronuklei unter diesen Expositionsbedingungen. Die Häufigkeit des Schwesterchromatid-Austausches bleibt im Vergleich mit der Kontrolle für beide Befeldungen gleich.

**Maes et al. (1995)** ziehen Blutproben von Arbeitern, die an GSM-954 MHz-Antennen arbeiten, sowie Blutproben von Probanden zur Untersuchung chromosomaler Aberrationen heran. 8 gesunde männliche und weibliche Spender im Alter zwischen 21 und 63 Jahren spenden Blut. Jeweils 10 ml heparisierter Blutproben werden bei einer Temperatur von 17°C 2 Std. lang Feldern mit 49 V/m Feldstärke exponiert. Die SAR wird auf 1.5 W/kg geschätzt. In einer nachfolgenden Studie werden Blutproben von 6 gesunden Arbeitern, die häufig an GSM-954 MHz-Antennen arbeiten, und 6 gesunden Probanden entnommen. Nach der Kultivierung der Blutproben (48 Std.) erfolgt eine Analyse der strukturellen chromosomalen Aberrationen.

Obwohl in in-vitro-Untersuchungen einige Proben eine erhöhte zytogenetische Schädigung zeigen, liefern die in-vivo-Untersuchungen der Blutproben von Antennen-Arbeitern keinen Hinweis auf eine vergleichbare Störung.

### **Diskussion:**

Insgesamt zeigen die bisherigen Studien zur chromosomalen Aberration unter der Wirkung von Mikrowellen keine konsistenten Ergebnisse. Die Mehrheit der Arbeiten in relativ starken und lange einwirkenden Feldern verneinen die Existenz solcher Wirkungen. Darüber hinaus ist es nicht ausgeschlossen, dass die positiven Befunde auf eine thermische Wirkung der Mikrowellen zurückgeführt werden müssen. In-vivo-Untersuchungen mit Arbei-

tern an GSM-Antennen deuten ebenfalls eine negative Wirkung relativ starker Mobilfunkfelder in der unmittelbaren Umgebung der Antenne an. Allerdings wurden diese Untersuchungen mit nur 6 Arbeitern durchgeführt, die Dosimetrie ist völlig unklar. Weitere Untersuchungen, insbesondere des Arbeitspersonals in Bereichen mit starken GSM-Feldern, sind erforderlich, um eine schlüssige Beantwortung der gestellten Fragen zu gewährleisten.

#### 7.4 Zellproliferation unter der Einwirkung von Mikrowellen

Die mögliche Beeinflussung der Proliferation von Tumorzellen durch Mikrowellen wird zytogenetisch wie auch mittels des Proliferations- (Tumor-) Markers ODC (Ornithine decarboxylase) untersucht.

**Cleary et al. (1990)** untersuchen die Proliferation der LN71-Glioma-Tumorzellen des ZNS in vitro ohne und unter der Einwirkung von einem 2.45 GHz-Feld, appliziert als kontinuierliche Welle mit einer SAR von 0 bis zu 75 W/kg. Unter isothermischen Bedingungen bei 37°C wirkt das Feld 2 Std. ein. Die DNA- und RNA-Synthese in den LN 71 Glioma-Zellen wird szintigraphisch über die Aufnahme des [<sup>3</sup>H] Thymidin und [<sup>3</sup>H] Uridin 1, 3 und 5 Tage nach der Exposition ermittelt. Die 2-stündige Exposition bewirkt Veränderungen der DNA- und RNA-Synthese 1, 3 und 5 Tage nach der Exposition. Diese Beeinflussung kann nicht auf Erwärmung der Kulturlösung zurückgeführt werden. Bis zu einer Leistungsdichte von 50 W/kg zeigt sich eine Stimulation der Synthese, 70 W/kg lassen eine Unterdrückung der Synthese erkennen. Da die Wirkungen bis zu 5 Tage nach der Exposition präsent sind, wird von kumulativen Effekten ausgegangen.

Die Untersuchungen ergeben einen mäßigen Proliferationsanstieg unter der Wirkung von Mikrowellen mit einer SAR von bis zu 50 W/kg.

Zu ähnlichen Ergebnissen gelangen **Stagg et al. (1997)** in Untersuchungen an Glial- und an C<sub>6</sub>-Glioma-Zellen von Ratten unter der Einwirkung eines 836 MHz-Feldes mit TDMA-Modulation. Bei der Applikation alternativer Leistungsdichten von 0.09, 0.9 und 9 mW/cm<sup>2</sup> resultieren SAR-Werte zwischen 0.15 und 60 mW/kg. Die scheinexponierten und exponierten Proben befinden sich in TEM-Zellen innerhalb eines Inkubators bei 37°C und 5 %-iger CO<sub>2</sub>-Schutzatmosphäre. Für die Bewertung verschiedener Phasen der DNA-Synthese nach der 24-stündigen Exposition wird die Zahl der Zellen pro Probe ausgezählt. Die Resultate zeigen für die primären Glial-Zellen der Ratten in keiner Phase statistisch signifikante Unterschiede. C<sub>6</sub>-Glioma-Zellen, befeldet mit 0.9 mW/cm<sup>2</sup> (SAR 5.9 mW/kg), weisen einen kleinen signifikanten Anstieg der DNA-Synthese auf. Andere Kenngrößen der befeldeten Proben bleiben unverändert gegenüber den Kontrollproben. Die Autoren stellen fest, dass die verwendeten TDMA-Felder weder die Proliferation der ursprünglichen Glial-Zellen, noch die der Transformatorischen C<sub>6</sub>-Zellen beeinflussen.

GSM-modulierte 960 MHz-Felder werden von **Kwee et al. (1998)** zur Untersuchung der Einflussnahme von Mikrowellen auf die Proliferation der humanen Haut-Amnion-Zellen verwendet. Für die Befeldung in einer TEM-Zelle werden SAR-Werte von 0.021, 0.21 und 2.1 mW/kg errechnet. Die Expositionszeit beträgt 20, 30 oder 40 Min. Die Proliferation der schein- und feldexponierten Tiere wird kolorimetrisch bestimmt. Die Proliferation der Zellen wird durch die Befeldung im Verhältnis zur Kontrolle gesenkt und variiert nicht nur mit der applizierten Leistungsdichte, sondern auch mit der Dauer der Exposition. Ein maximaler Effekt wird mit der größten Leistungsdichte und der längsten Exposition erreicht.

Die der Ornithinen Decarboxylase (ODC) zugeschriebene enzymatische Wirkung bei der DNA-Synthese wird in mehreren Studien zur Überprüfung einer erhöhten Proliferation durch Mikrowellen eingesetzt.

**Litovitz et al. (1993)** beobachten die ODC bei Fibroblasten der L929-Mäuse unter der Einwirkung von 915 MHz-Feldern. Die Mikrowelle ist alternativ mit 55, 60 oder 65 Hz amplitudenmoduliert. Die kalorimetrisch ermittelte SAR beträgt 2.5 W/kg. Zellkulturen werden in einem Inkubator in 5% CO<sub>2</sub>-Atmosphäre bei 37°C gehalten und alternativ 8 Std. exponiert oder scheinexponiert. Die ODC-Aktivität in den Proben wird vor und nach der Exposition szintigraphisch bestimmt. Das Verhältnis der ODC-Aktivität zwischen Feld- und Kontrollproben wird statistisch bewertet. Die 8-stündige Exposition der Fibroblasten mit 915 MHz führt zur Verdopplung der ODC-Aktivität.

**Penafiel et al. (1997)** präsentieren Untersuchungen der ODC-Aktivität am gleichen Substrat (Fibroblasten der L929-Mäuse) unter einer 2- oder 24-stündigen Einwirkung von 835 MHz-amplitudenmodulierten Feldern (Modulationsfrequenz 0, 6, 16, 55, 60, 65 und 600 Hz oder mit AMPS-Modulation) mit einer mittleren SAR von 2,5 W/kg. Jeweils 5 ml Kulturlösung befinden sich in Behältern von 25 cm<sup>2</sup>. Behälter der Kontroll- und Feldproben werden

in 95 % Luft, 5 % CO<sub>2</sub>-Schutzatmosphäre bei 37°C gehalten. Die ODC-Aktivität einzelner Proben wird szintigraphisch bestimmt. Nur CW-835-MHz-Mikrowellen verursachen nach einer 6-stündigen Exposition eine geringe, aber signifikante Erhöhung der ODC-Aktivität.

Ein bis zu 100 %-iger Anstieg der ODC-Aktivität im H25-Hepatom (Leber-Tumor) unter der Einwirkung eines 450 MHz-Feldes mit Amplitudenmodulation (Modulationsfrequenz 5, 10, 16, 20, 60 und 100 Hz) wird von **Byus et al. (1988)** berichtet. Die Welle ist sinusförmig amplitudenmodelliert mit einer Frequenz von 16 Hz, der Spitzenwert der Leistungsdichte des jeweils 1 Std. einwirkenden Feldes beträgt 1 mW/cm<sup>2</sup>. Die ODC-Aktivität wird standardmäßig über radioaktive Markierung szintigraphisch ermittelt. Die 50 %-ige Erhöhung der ODC-Aktivität im Verhältnis zu den Kontrollproben mit H25-Hepatom-Zellen vom chinesischen Hamster stellt sich bereits nach einer einstündigen Exposition ein.

Zwei verschiedenen Gruppen beobachten eine bis zu zweifache Erhöhung der ODC-Aktivität unter der Einwirkung von amplitudenmodulierten Mikrowellen, die ebenfalls auf einen konsistenten Effekt hindeutet.

Bei der Wertung der ermittelten zweifachen Änderung muss berücksichtigt werden, dass die ODC-Aktivität bei der Applikation bekannter krebspromovierender Substanzen wesentlich stärker, bis zu einem Faktor 1000 ansteigt. Eine Überprüfung dieser Ergebnisse in pulsmodulierten Mikrowellen, wie sie bei Mobilfunkanlagen verwendet werden, sowie deren Übertragbarkeit auf das Säugetier, ist dringend erforderlich. Offen ist auch die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den gesamten Organismus und schließlich auch auf den Menschen.

### **Diskussion:**

In allen in-vitro-Studien wird übereinstimmend eine Einflussnahme der Mikrowellen, unabhängig von ihrer Modulation, auf die Zellproliferation gemeldet.

## **7.5 DNA-Brüche unter der Einwirkung von Mikrowellen**

Bereits in früheren Tierexperimenten werden DNA-Brüche in verschiedenartigem Gewebe unter der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder beobachtet. Die applizierten hohen Feldstärken lassen eine primär thermische Wirkung in diesen Arbeiten nicht ausschließen.

Interessant sind dagegen neue Studien, die die Bildung der DNA-Brüche auch bei der Einwirkung schwacher Mikrowellen aufzeigen.

**Sarkar et al. (1994)** ermitteln eine deutliche Erhöhung der DNA-Umstellung in Proben von Gehirn und Hoden, abgenommen von Swiss-Albino-Mäusen nach einer Exposition mit einem 2.45 GHz-Feld bei einer Leistungsdichte von 1 mW/cm<sup>2</sup> und einer Ganzkörper-SAR

von 1.18 W/kg. Die Expositionsdauer beträgt 2 Std./Tag, alternativ 120, 150 und 200 Tage. Für die Experimente werden männliche, 5 Monate alte Tiere herangezogen. Je Expositionsschema werden 10 Tiere (4 Kontrollen, 6 Expositionen) angesetzt. Nach den Experimenten wird die DNA-Analyse elektrophoretisch vorgenommen.

**Lai und Singh (1995)** berichten über einen statistisch signifikanten Anstieg der einfachen Strangbrüche der DNA im Hippocampus und im Gehirn der Sprague-Dawley-Ratten nach der Exposition mit einem 2.45 GHz-Feld als kontinuierliche oder pulsmodulierter Welle (Pulsbreite 2  $\mu$ s, 500 Pulse/s). Die räumlich gemittelte Leistungsdichte erreicht 1 oder 2 mW/cm<sup>2</sup>, die SAR der applizierten Felder liegt bei 0.6 oder 1.2 W/kg. Insgesamt werden pro Untersuchung je 27 männliche Ratten (11 für die Kontrolle, 8 mit einer SAR von 0.6 W/kg, 8 mit einer SAR von 1.2 W/kg) mit einem Gewicht zwischen 250 g und 300 g herangezogen. Sofort und 4 Std. nach der Exposition wird die Anzahl der einzelnen DNA-Brüche im Hippocampus und im restlichen Gehirn mittels der Elektrophoresie bestimmt. Sofort nach der Exposition mit pulsmodulierten Mikrowellen bleibt die Anzahl der DNA-Brüche im Hippocampus wie auch im restlichen Gehirn im Vergleich zur Kontrolle unverändert. Ein konsistenter und statistisch signifikanter Anstieg der DNA-Brüche mit einer Erhöhung der SAR wird 4 Std. nach der Exposition beobachtet. Eine kontinuierliche Welle führt sofort wie auch 4 Std. nach der Exposition mit einer SAR von 1.2 W/kg zu einem statistisch signifikanten Anstieg der Anzahl von DNA-Brüchen.

**Lai H, Singh NP (1996)** verfeinern die vorangegangenen Untersuchungen, indem unter gleichen Versuchsbedingungen (2.45 GHz, 2 mW/cm<sup>2</sup>, SAR 1.2 W/kg, CW- oder pulsmoduliert) in Untersuchungen mit Ratten nicht nur einfache, sondern auch doppelte DNA-Brüche im Gehirn elektrophoretisch aufgenommen werden. Der statistischer Vergleich der schein- und feldexponierten Proben 4 Std. nach der Exposition zeigt einen signifikanten Anstieg in beiden Arten von DNA-Brüchen. Die Wirkung der CW- und pulsmodulierten Welle ist gleich. Die Autoren spekulieren, dass eine Einflussnahme des Feldes auf die DNA-Reparaturmechanismen diese Veränderungen einleitet.

**Malyapa et al. (1998)** überprüfen in einer Replikation die Ergebnisse der Arbeiten von Lai und Singh unter gut vergleichbaren Versuchsverhältnissen. Männliche Sprague-Dawley-Ratten mit einem Gewicht von ca. 250 g werden im zylindrischen Wellenleiter 2 Std. lang mit 2.45 MHz als kontinuierliche Welle befeldet. Die mittlere SAR beträgt 1.2 W/kg und wird kalorimetrisch ermittelt. Zusätzlich erfolgt eine Messung verschiedener Körpertemperaturen. 2 oder 4 Std. nach der Schein- oder Exposition werden die Tiere mit CO<sub>2</sub> oder mit der Guillotine getötet, um Proben vom Kortex und Hippocampus entnehmen zu können. Die Bestimmung der DNA-Brüche erfolgt elektrophoretisch. Die statistische Bewertung zeigt keine signifikanten Unterschiede in der Anzahl der DNA-Brüche zwischen den exponierten und den scheinexponierten Tieren. Diejenigen Tiere, die mit CO<sub>2</sub> eingeschläfert werden, weisen eine höhere Anzahl von DNA-Brüchen auf. Dies könnte auch die Ursache für die beobachteten DNA-Brüche in den Experimenten von Lai et al. sein. Die Häufigkeit der Brüche der DNA des Gehirns ist weder sofort nach der zweistündigen Exposition, noch 4 Stunden danach verändert.

#### **Diskussion:**

Insbesondere die Ergebnisse von Lai et al. über eine erhöhte Inzidenz von einfachen und doppelten DNA-Brüchen im Hirngewebe unter der Wirkung von athermischen Mikrowellen hat nicht nur bei Experten, sondern auch in der Öffentlichkeit, viele Emotionen geweckt. Eine unbedachte Interpretation dieser Resultate hat zu der Behauptung geführt, dass auch Felder der Mobilfunkanlagen auf diese Weise zur Initiierung des Krebsgeschehens führen können.

In den nachfolgenden Replikationen, z. B. von Malyapa et al., konnte gezeigt werden, welche Unsicherheiten bei der Bewertung der DNA-Brüche durch verschiedene Faktoren, wie z. B. der Art der Tötung der Tiere, entstehen können.

Orale Präsentationen vorläufiger Resultate aus laufenden Untersuchungen bestätigen ebenfalls diese Problematik, indem die von Lai et al. gemeldeten Ergebnisse als nicht nachvollziehbar gemeldet werden. Mehrere Arbeiten mit gleichem negativen Ausgang werden in den nächsten Monaten erscheinen.

## **7.6 Genmutation und -expression unter der Einwirkung von Mikrowellen**

Genmutationen spielen nachweislich eine Schlüsselrolle in der initialen Phase der Tumorentstehung. Die entstandenen Schäden können zur Beeinflussung der Genregulation und schließlich zu explosiven Proliferationen der Zelle führen. Es wird angenommen, dass das Krebswachstum in spezifischen Genen, wie z. B. Proto-Onkogenen oder Tumor-Supersogenen, induziert wird, die ohne Schädigung einen lebenswichtigen Bestandteil des Genoms bilden.

Die Proto- oder zellulären Onkogene, die sich in einer gesunden Zelle offenbar als

- Wachstumsfaktoren
- Wachstumsfaktor-Rezeptoren und
- Signal-Transduktoren

an der Steuerung von Zellwachstum und Differenzierung beteiligen, sind zufällig über das

Genom verteilt und nicht zu Clustern angeordnet. Die Proto-Ontogene können durch Punktmutation und Verlagerung in die Nachbarschaft eines Promotors, z. B. in Verbindung mit einer Translokation oder einer Amplifikation, zu Onkogenen werden. Die aktivierten Pro-Ontogene sind im Stande, eine normale Zelle zur Tumorzelle zu transformieren.

Die Anti-Onkogene oder Tumor-Suppressions-Gene verringern dagegen das Zellwachstum und unterdrücken in der gesunden Zelle die Entstehung von Tumoren.

Ihre Funktion ist die

- Beeinflussung der Zelldifferenzierung
- Kontrolle des Zell-Zell-Kontaktes
- Inhibition der Wachstumsfaktoren
- Regulation der Transkription
- Interaktion mit Onkogenen.

Ihr Funktionsverlust oder ihre Inaktivierung führt zu unkontrollierten Zellteilungen, und sie werden dadurch zu den wichtigsten krebsauslösenden Faktoren. Bisherige molekularbiologische Studien haben mindestens 11 Tumor-Suppressions-Gene aufgezeigt.

Im menschlichen Genom wurden bisher mehr als 70 verschiedene Proto-Ontogene erkannt, wobei in vielen Arbeiten dem c-myc-Onkogen eine besondere Bedeutung beigemessen wird. Eine Erhöhung von c-myc in der mRNA wird als Indikator für eine Tumorpromotion angesehen. Die Transkription der "Early-Response-Gene" wie der c-jun und c-fos gelten als eine weitere potentielle Einflussstelle der exogenen Faktoren.

Die Krebsentstehung wird aber als ein mehrstufiger Prozess angesehen, bei dem eine Aktivierung eines einzigen Proto-Ontogens, bzw. die Aktivierung eines Tumor-Suppressions-Gens, nicht ausreichend ist. Es wird angenommen, dass mehrere Mutationen an verschiedenen Stellen des Genoms erforderlich sind, damit das Krebsgeschehen eingeleitet wird.

Unter der Genexpression wird eine selektive Aktivierung einzelner Gene aus dem sonst einheitlichen Gene-Satz in allen Chromosomen der somatischen Körperzellen verstanden. In den nachfolgenden Schritten der Transkription und Translation werden an Hand der in Genen enthaltenen Information besondere Einflüsse und strukturelle Proteine gebildet. Bei der Transkription erfolgt die Synthese von RNA, wobei in der Translation unter der Kontrolle der RNA bestimmte Proteine gebildet werden. Die produzierten Enzyme und Proteine sind u. a. für die Regulation des Zellwachstums mit verantwortlich.

Verschiedene Gene könne auch durch starke exogene Einflüsse, wie z. B. mitogene Chemikalien oder auch durch Stress oder intensive Wahrnehmung aktiviert werden. Diese Eigenschaft wird z. B. den sogenannten früherkennenden Genen wie c-fos oder c-jun zugeschrieben.

Die Expression anderer Gene, wie z. B. c-myc oder c-ras, kann nachweislich durch ultraviolette Strahlen oder Röntgenstrahlen erhöht werden. Es wird allgemein angenommen, dass diese Gene eine zentrale Rolle bei der Regulation der Gentranskription spielen.

Zahlreiche frühere in-vitro- und in-vivo-Untersuchungen zeigen unterschiedliche Genmutationen auf, die überwiegend mit der Exposition durch niederfrequente elektromagnetische Felder in Verbindung gebracht werden. Die Ergebnisse sind allerdings sehr heterogen bis widersprüchlich und erlauben keine klare Schlussfolgerung. In der jüngeren Forschung wird geprüft, ob Felder unterschiedlicher Mobilfunksysteme eine eindeutig nachweisbare Genschädigung verursachen.

**Ivaschuk et al. (1997)** führen in-vitro-Untersuchungen an Krebszellen der Phäochromozyten in PC-12-Ratten durch, die maligne Tumore des chromafinen Gewebes mit 10%-iger Häufigkeit entwickeln. Gewebeproben werden 20, 40 und 60 Min. lang (20 Min. an, 20 Min. aus) TDMA-modulierten Mikrowellen mit einer Frequenz von 836.55 MHz bei einer Leistungsdichte zwischen 0.09 und 9 mW/cm<sup>2</sup> und einer SAR zwischen 0.5 und 5 mW/kg exponiert. Die Expression der c-jun- und c-fos-Gene der exponierten Proben wird mit Kontrollproben ohne Feldexposition verglichen. Im Vergleich ergibt sich in den exponierten Proben eine erhöhte Expression der c-jun-Gene bei der SAR von 5 mW/kg, wohingegen für die c-fos-Gene keine statistisch signifikante Expressions-Veränderung resultiert.

Andere Ergebnisse liefert die in-vitro-Untersuchung von **Goswami et al. (1999)** an embryonalen Fibroblasten von C3H/10T-Mäusen. Fibroblasten sind Vorläufer der Fibrozyten-Zellen, die das Bindegewebe z. B. der Gefäße ausbilden und bekanntlich durch Genmutation zu Tumorzellen transformiert werden können. Die Zellproben werden alternativ FM-modulierten Mikrowellen von 835 MHz und CDMA-modulierten Mikrowellen von 847 MHz-Mikrowellen ausgesetzt. Für die Exposition der Feldproben bis zu 4 Tagen wird eine SAR von 0.6 W/kg geschätzt. Die Expression der c-fos-, c-jun- und c-myc-Gene, der feldexponierten und der Kontroll-Proben werden statistisch bewertet. Dabei ergibt sich ein schwacher, nicht signifikanter Anstieg der Expression der c-fos-Gene und keine Veränderung der Expression der c-myc- und c-jun-Gene. Die nichtkonformen Ergebnisse beider Untersuchungen dürfen nicht überbewertet werden, da hier unterschiedliche Substrate zur Prüfung stehen.

Bei in-vivo-Studien bezüglich der Wirkung der Felder von Mobilfunk-Systemen mit Ratten und Mäusen steht die Genexpression im Gehirngewebe im Vordergrund.

**Fritze et al. (1997)** führen vergleichbare in-vitro-Untersuchungen mit männlichen Vistar-Ratten durch, bei denen die Änderung des Messenger-RNAs, des Wärme-Schock-hsp70-



Genes sowie der c-fos-, c-jun- und GFAP-Gene nach einer vierstündigen Exposition mit einer Frequenz von 915 MHz und ohne Feldexposition ermittelt werden. In der Studie werden alternativ kontinuierliche und GSM-modulierte Wellen appliziert. Die SAR beträgt 0.3 und 1.5 W/kg bei GSM-Modulation und bis zu 7.5 W/kg bei CW-Modulation. Die Ergebnisse zeigen eine schwache Induktion des hsp70-Messenger-RNAs im Kleinhirn und Hippocampus, und zwar nur sofort nach der Exposition bei den Tieren, die der höchsten SAR ausgesetzt wurden. Die dabei auftretende Hirn-Erwärmung muss als eine sehr wahrscheinliche Ursache für die beobachteten Effekte betrachtet werden.

**Morrissey et al. (1999)** setzen Mäuse in einer Kontroll- und in einer Feldgruppe 1 Std. lang alternativ einer kontinuierlichen oder pulsmodulierten IRIDIUM-Welle (9,2  $\mu$ s Pulsbreite, 11 Hz Wiederholfrequenz) von 1.6 GHz-Mikrowellen aus. Die SAR im Gehirn der Tiere variiert bis über 3 W/kg. Die c-fos-Expression im Gehirn der kontroll- und feldexponierten Tiere bleibt vergleichbar, bis die mittlere SAR das 6-fache und der Spitzenwert der SAR das 30-fache der US-Norm überschreitet. Die statistisch signifikante Erhöhung der c-fos-Expression wird bei stärkeren SAR-Werten beobachtet, wobei kein Unterschied zwischen der CW- und pulsmodulierten Welle festzustellen ist.

Insbesondere in der thermoregulatorischen Region des Gehirns ergibt sich eine erhöhte Expression des c-fos-Genes. Die Resultate sprechen dafür, dass die thermische Wirkung der Mikrowellen die c-fos-Expression anhebt.

### **Diskussion:**

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen unterschiedliche Schädigungen der Zelle auf der Gen-Ebene unter der Einwirkung von Mikrowellen mit thermischem wie auch athermischem Charakter. Am häufigsten wird über eine Veränderung der Expression der c-fos-Gene berichtet. Die Einzelergebnisse sind nicht konsistent, was auch wegen unterschiedlicher Ansätze nicht in vollem Umfang zu erwarten ist. Für eine mutmaßliche athermische Wirkung der Mikrowellen wird auch keine eindeutige Tendenz gezeigt. Dagegen ist offensichtlich, dass dann, wenn Mikrowellen eine Erwärmung des Hirngewebes um einige Grad Celsius verursachen, auch reproduzierbare Effekte auf die Genexpression ermittelt werden. Allerdings werden derart starke Felder in keinem frei zugänglichen Bereich der Mobilfunkanlagen aufgebaut.

## 8. Das Zentralnervensystem (ZNS) in den Feldern der Mobilfunkanlagen

### 8.1 Relevanz und Verfahren

Einer eventuellen Einwirkung der Mobilfunkfelder auf das Zentralnervensystem (ZNS) muss besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, da

- das ZNS alle vitalen Vorgänge im Organismus neural und hormonell steuert,
- im ZNS die gesamte Verarbeitung und Speicherung der vom Äußeren wie vom Inneren des Körpers zugeführten Informationen erfolgt und
- im Bereich des Kopfes bei Anlehnung eines betriebenen Handys die stärksten Felder (siehe Abschnitt 2) der Mobilfunkanlagen auftreten.

Wegen der vielfältigen und komplexen Funktionen des Gehirns ist der Beweis einer Einwirkung durch die äußeren Einflüsse insbesondere dann sehr schwierig, wenn schwache Effekte vorliegen. Eine integrale Überprüfung der Funktionalität des Gehirns und dessen möglicher Beeinflussung ist nicht möglich, weshalb sich die psychologischen und neurologischen Testverfahren auf die Überprüfung einzelner Prozesse beschränken müssen.

So werden zugeschnittene Tests zur Überprüfung der Beeinflussung der Efferenzsysteme des ZNS verwendet, die die Kommandos für die Erfolgsorgane bereitstellen. Die somatomotorischen Efferenzsysteme, die die Rumpf- und Extremitätenmuskulatur steuern, werden z. B. mit den Reaktionstests geprüft. Allerdings ändern sich solche Reizantworten infolge komplexer Bahnungs- und Hemmungserscheinungen in kortikalen Neuronen.

Vegetative Efferenzsysteme können über die Überprüfung der Funktion der inneren Organe (z. B. im Falle der Steuerung des Herzkreislaufs über die Herzfrequenz, den Blutdruck, etc.) vorgenommen werden.

Die einfachste Form der Koordination zwischen afferenten und efferenten Teilen des ZNS spiegelt sich in Reflexen wieder, deren Beeinflussung durch äußere Einflüsse mit verschiedenen physiologischen und neurologischen Messmethoden überprüft werden können.

Wesentlich problematischer ist die Erfassung der höheren Nerventätigkeit, die sich durch komplexe kognitive Prozesse auszeichnet. Assoziative Leistungen wie Verhalten, Emotion und Motivation, Kurz- und Langzeitgedächtnis sowie Bewusstseinsprozesse sind in den meisten Fällen nur über aufwendige psychologische Tests zugänglich. Wegen der zwangsläufigen Variation der Einzelergebnisse ist auch das Gesamtergebnis mit einer gebührenden Unsicherheit behaftet. Bei der Betrachtung eventueller Umwelteinflüsse auf das Zentralnervensystem stellt sich die Frage nach der Beeinflussung der Bewusstseinsprozesse, die sich mit einer unterschiedlichen Aktivierung und Leistung des ZNS charakterisieren lassen. Aus der breiten Skala möglicher physiologischer Zustände bietet der Schlaf einen be-

sonderen Zugang, da diese Phase mit einer niedrigen Aktivierung und mittleren bis niedrigen Leistung des ZNS einher geht.

Bei der Untersuchung der Bewusstseinsprozesse im ZNS wird parallel neben den subjektiven psychologischen und neurologischen Testmethoden die Aufnahme des Elektroenzephalogramms (EEG) in bis zu 128 Ableitungen zur Diagnose herangezogen. Da das EEG die elektrische Summenaktivität insbesondere der oberflächlichen Hirnrinde-Areale erfasst, ist die eindeutige Zuordnung zwischen den EEG-Mustern und dem Geschehen im Gehirn nur bei einer niedrigen Aktivität und Leistung des ZNS, wie z. B. beim Schlaf, möglich. So können verschiedene Schlafstadien, wie z. B.

- aktiv wach mit Kontrolle des Verhaltens und Problemlösen
- entspannt mit spontanen Gedanken und Fantasie
- Schlafstadium 1 mit Hypnagogen, Halluzinationen (fragmentarisches Bildmaterial und Träumchen)
- Schlafstadium 2-4 mit Gedankenketten, Tageserinnerungen und Traumbruchstücken unter geringer emotionaler Beteiligung
- REM-Phase mit Träumen (visuell, dramatisch, emotional)

aus dem EEG grob abgegrenzt werden.

Die Beurteilung der Bewusstseinsprozesse mit einer hohen Aktivierung und Leistung des ZNS, wie es beim Wach- und Erregungszustand der Fall ist, sind dagegen allein mittels des EEG nur schwer und ungenau möglich. Dagegen erlauben elektrische Antworten einzelner Gehirnregionen auf definierte Reize eine gute Charakterisierung einzelner Systeme. Sie werden durch eine reizsynchrone Mittelung aus dem EEG gewonnen und als evozierte Potentiale bezeichnet. Wegen der Problematik, eventuelle schwache Einflüsse der Mikrowellen auf das ZNS objektiv mittels EEG oder subjektiv mittels psychischer und neurologischer Untersuchungsmethoden möglicherweise nicht herausfinden zu können, werden zusätzlich für die Beweisführung unterschiedliche Untersuchungen des Stoffwechsels im ZNS herangezogen. Die Ergebnisse versprechen, eine Auskunft über eventuelle Wirkungsmechanismen der Mikrowellen im Gehirn zu geben. Im Zusammenhang mit der Einwirkung von elektromagnetischen Feldern werden Untersuchungen der Blut-Hirn-Schranke, der Neurotransmitter im Gehirn sowie des Kalziumhaushaltes in Neuronen vorgenommen.

Die Blut-Hirn-Schranke erfüllt eine allgemeine Schutzfunktion des Gehirns gegenüber unerwünschten stofflichen Einflüssen. Es ist bisher nicht ausreichend geklärt, warum einige Stoffe und Gase durch die Blut-Hirn-Schranke diffundieren und andere nicht. Einige Stoffe, die die Blut-Hirn-Schranke nicht zu passieren vermögen, können vom Blut in den Liquor und von dort aus in das ZNS gelangen. Dabei ist die Funktion des Liquor mit einer auffällig konstanten Ionenkonzentration im Vergleich zum Blut nicht ausreichend geklärt. Die

Durchlässigkeit der Blut-Hirn- und Blut-Liquor-Schranken ist nicht nur stoffspezifisch, sondern unterliegt auch einer großen biologischen Variabilität, was bei vergleichenden Untersuchungen Berücksichtigung finden muss.

Ein großes Aufsehen haben Publikationen erregt, die Einflüsse hochfrequenter Felder auf den Kalziumhaushalt der Neuronen postulieren. Wegen der großen Bedeutung des Kalziums für die Steuervorgänge im Gehirn wurde eine weitere Auseinandersetzung mit dieser Problematik erforderlich.

In der Literatur wird häufig auch der Zusammenhang zwischen der Wirkung elektromagnetischer Felder und Veränderungen des neuroendokrinen und hormonalen Systems hergestellt. Die Ergebnisse, vorwiegend aus Tierexperimenten, müssen als eine weitere Informationsquelle bei der Einschätzung der möglichen Wirkungen von Feldern der Mobilfunkanlagen herangezogen werden.

## 8.2 Beeinflussung kognitiver Funktionen

Kognitive Funktionen stellen einen sehr empfindlichen Indikator für die Überprüfung einer eventuellen Einwirkung von Mikrowellen auf die höhere Funktion des Zentralnervensystems dar. Dabei müssen die Vielschichtigkeit und Komplexität der höheren ZNS-Leistungen sowie große individuelle Unterschiede und intraindividuelle Schwankungen der Ergebnisse in Kauf genommen werden. Darüber hinaus können verschiedene Faktoren der Umwelt und der Psyche wie Konzentration, Motivation oder auch Alkoholkonsum die Resultate wesentlich verfälschen. Deshalb erfordert eine derartige Untersuchung streng standardisierte Versuchsbedingungen, eine sorgfältige Auswahl und Beobachtung von Probanden, ausreichend große Fall- und Kontrollgruppen sowie eine exakte Beschreibung der Testabläufe und Expositionsbedingungen. Wegen des beträchtlichen Aufwandes wurden bisher wenige überzeugende Untersuchungen mit verlässlichen Ergebnissen über die Beeinflussung der kognitiven Funktionen unter der Wirkung von Mobilfunkfeldern durchgeführt.

**Gehlen et al. (1996)** führen Untersuchungen der kognitiven Leistungen ohne und unter Exposition durch 900 MHz-GSM-Felder durch. Unter Verwendung eines 8 W-Handys im Abstand von 45 cm vom Kopf werden Grenzwertbedingungen nach DIN VDE 0848 mit ungestörten Feldstärken im Bereich des Kopfes von ca. 40 V/m simuliert. In zwei Versuchsgruppen mit 24 Probanden (12 männlich, 12 weiblich, 20-38 Jahre) und 28 Probanden (14 männlich, 14 weiblich, 20-34 Jahre) werden je eine Expositions- und eine Kontrollphase von jeweils 70 Min. Dauer in 2 Sitzungen in umgekehrter Reihenfolge hintereinander geschaltet. Während beider Phasen erfolgt eine computergestützte Überprüfung der Aufmerksamkeitsleistung und ein manuell vorgenommener Test der Lern- und Merkfähigkeit. Der

Aufmerksamkeitstest setzt sich aus Einzelprüfungen der Alertness, der Vigilanz und einem Go/No Go-Test zusammen.

Bei tonischer Alertness wird mittels der Messung der Reaktionszeit auf einen visuellen Reiz mit und ohne akustischem Warnreiz die Steigerung und Aufrechterhaltung des Aufmerksamkeitsniveaus erfasst.

Die Vigilanz dient der Überprüfung der Aufmerksamkeit unter monotonen Bedingungen. Der Versuchsperson werden optische und akustische Reize dargeboten, wobei die Testperson eine bestimmte Abfolge und Qualität beider Reize erkennen und bestätigen soll.

Der Go/No Go-Test wird zur Überprüfung der Fähigkeit zur Unterdrückung von irrelevanten Reizen herangezogen. Dabei wird die Reaktionszeit auf vordefinierte optische Reize geprüft, die aus einer Fülle von Reiz-Darbietungen vom Probanden selektiv ausgesucht werden müssen.

Die Fähigkeit des gleichzeitigen Behaltens einer und die Verarbeitung neu angebotener Informationen zeichnet das sogenannte Arbeitsgedächtnis aus. Die Prüfung erfolgt über die Darbietung verschiedener Bildmuster, wovon einige vorher gezeigte Muster von der Versuchsperson erkannt und per Tastendruck bestätigt werden sollen. Die jeweilige Reaktionszeit auf all diese unterschiedlichen Reize stellt in den meisten Untersuchungen ein Bewertungskriterium dar.

Zur Prüfung des Gedächtnisses wird ein standardisierter Auditiv Verbaler Lerntest (AVLT) herangezogen. Dabei soll der Proband 15 zuvor vom Versuchsleiter vorgelesene Substantive wiedergeben. Die Resultate der Einzelmessung werden pro Test und Gruppe ohne oder mit Exposition statistisch bewertet. Die Standardabweichung einzelner Kennwerte liegt zum Teil über 10 %. Dabei zeigt der Vergleich der Ergebnisse aus den Expositions- und Kontrollsituationen keine statistisch signifikanten Unterschiede.

**Preece et al. (1999)** führen eine Untersuchung der kognitiven Funktionen des Menschen im 915 MHz-Feld ohne Modulation (CW) oder mit einer GSM-pulsmodulierten Welle (217 Hz, Tastverhältnis 1:8) durch. Die Exposition einzelner Personen dauert 25-30 Min., wobei das Feld mit einer mittleren Leistung von 1 W bei einer CW-Welle und mit 0.125 W bei einer pulsmodulierten Welle auf der linken Kopfseite appliziert wird. Die Kontrollphase A wechselt mit Feldphasen B (kontinuierliche Welle) und C (Impulsmodulation mit 217 Hz, Tastverhältnis 1:8) in randomisierter Abfolge, jeweils in 25 bis 30 Min. dauernden Intervallen. Insgesamt werden 18 Probanden (9 männlich, 9 weiblich) im Alter zwischen 21 und 60 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 38 Jahren herangezogen. Zur Überprüfung der kognitiven Leistungen mit und ohne Feldeinwirkung werden 15 verschiedene standardisierte Tests der sofortigen Wortwiedergabe, der einfachen und verzögerten Bilddarstellung, der einfachen, verzögerten, kontrollierten und räumlichen Reaktionszeit, der Vigilanz-Reaktionszeit, des räumlichen Arbeitsgedächtnisses und der Wort- und Bildererkennung bezüglich der Reaktionsgeschwindigkeit und -genauigkeit durchgeführt. Die statistische Be-

wertung erfolgt alternativ mit einem standardisierten nichtparametrischen Test ANOVA und einem multiparametrischen Test MANOVA. Die Resultate bestätigen eine bekannte Verlängerung aller Reaktionszeiten mit dem Alter, ohne Unterschied für beide Geschlechter. Der Vergleich zwischen der Kontrollphase A und den beiden Feldphasen B und C ergibt nur für die kontinuierliche Welle (Phase B) eine statistisch signifikante Verkürzung der Wahl-Reaktionszeit um weniger als 4 %. Bei diesem Test wird die Reaktionszeit des Probanden auf die Worte "yes" oder "no" auf dem Computerbildschirm gemessen.

**Koivisto et al. (2000)** untersuchen Veränderungen kognitiver Funktionen an 48 gesunden Probanden (24 männlich, 24 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 26 Jahren (18-49 Jahre) unter der Einwirkung von GSM-Handy-Feldern (Frequenz 902 MHz, mittlere Leistung 0,25 W). Bei allen Probanden wird für die Untersuchungen ein Handy auf der linken Kopfseite in der normalen Sprech/Hör-Position angelegt. In den beiden einstündigen Untersuchungsphasen wird das Handy alternativ eingeschaltet (Feldphase) oder ausgeschaltet (Kontrollphase). Während jeder Phase werden die Probanden 6 verschiedenen standardisierten Tests der perzeptiven und motorischen kognitiven Leistung unterzogen, wobei als Beurteilungsmaß die jeweilige Reaktionszeit dient. Die statistische Bewertung der Ergebnisse mit dem nichtparametrischen Wilcoxon-Test ergibt für alle Tests in der Kontroll- wie auch in der Feldphase etwa das gleiche niedrige Feldniveau um 3 %. Aus dem Vergleich zwischen der Feld- und der Kontrollphase resultiert eine statistisch signifikante Verkürzung der einfachen Reaktionszeit um 3 %, der Vigilanz um 11 % und der kognitiven Reaktionszeit bei Subtraktion um fast 12 %.

### **Diskussion:**

Eine gemeinsame Bewertung aller drei Studien bezüglich einer möglichen Wirkung von Mobilfunkfeldern und insbesondere von Handy-Feldern ist wegen recht unterschiedlicher Expositionsbedingungen problematisch.

Bei Gehlen et al. finden sich keine Befunde einer Einwirkung auf die kognitiven Funktionen. Wegen des Abstandes zwischen Kopf und Sendeantenne handelt es sich hier mehr um eine Exposition im Fernfeld, was bekanntlich eine unterschiedliche Verteilung und niedrigere Maxima der SAR-Werte im Kopf als das Nahfeld aufbaut.

Die Exposition der Probanden mit einem 915 MHz-GSM-Feld führt bei Preece et al. zu keinem statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Messgrößen mit und ohne Feld. Wegen der applizierten mittleren Leistung von nur etwa 0.125 W ist diese Exposition aber um einen Faktor 2 schwächer als sie bei den 900 MHz-GSM-Handys auftreten kann. Für die praxisorientierte Verwendung von Handys lässt sich deshalb aus dieser Studie keine Schlussfolgerung ableiten. Das gleiche gilt für die Felder der Basisstationen, die zwar um mehrere Zehnerpotenzen schwächer sind, dafür aber über längere Zeiträume einwirken.

Die Arbeiten von Preece et al. und Koivisto et al. zeigen übereinstimmend schwache Effek-

te einer kontinuierlichen Nahfeld-Welle mit einer Leistung von 1 W und einer GSM-modulierten Welle mit einer Leistung von 0.25 W auf die kognitiven Leistungen des ZNS. Diese Ergebnisse könnten so gedeutet werden, dass unabhängig von der Art der Modulation, 900 MHz-Mikrowellen mit einer mittleren Leistung von über 0.25 W, direkt am Kopf appliziert, derartige Effekte produzieren können. Hypothetisch bietet sich für die Erklärung dieser Effekte eine schwache Erwärmung eines Gehirnteiles durch die Mikrowellen an, obwohl bisherige dosimetrische Untersuchungen keine nennenswerte Wärmeentwicklung für die 2 W-Handys bestätigen.

Die in zwei Studien übereinstimmend beobachtete Verkürzung der Reaktionszeit könnte auf den ersten Blick nicht als Beeinträchtigung, sondern vielmehr als Verbesserung der Leistungsfähigkeit des ZNS gedeutet werden. Solange aber die Wirkungsmechanismen dieser Effekte nicht geklärt sind, ist eine derartige Zuweisung nicht zulässig. Die Klärung der postulierten Effekte auf die kognitiven Funktionen des Zentralnervensystems muss ernsthaft beachtet und in weiteren gut kontrollierten Studien verifiziert oder falsifiziert werden.

### **8.3 Einfluss der Mikrowellen auf den menschlichen Schlaf**

Zur Aufrechterhaltung der körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit braucht der Körper einen regelmäßigen Schlaf. In dem vegetativ gesteuerten zirkadianen 24-Stunden-Rhythmus fallen der Schlafphase 5-8 Std. bei Erwachsenen und bis zu 18 Std. bei Säuglingen zu.

Eine der Voraussetzungen für einen gesunden Schlaf ist eine geregelte Lebensweise. Ihre Einhaltung ist jedoch keine Garantie für einen erholsamen Schlaf. Schlafstörungen können auch andere vielfältige Ursachen haben. Psychische Belastung wie Stress, übermäßige Erregung und Sorgen sind dafür die häufigsten Ursachen. Sie können aber auch durch verschiedene Umweltfaktoren, wie z. B. Lärm, ausgelöst werden. Wegen ihrer multifaktorellen Abhängigkeit sind die Ursachenfindung sowie die Diagnose nicht eindeutig, so dass ein beträchtlicher Interpretationsraum bleibt. In der jüngsten Zeit werden unspezifische Symptome, zu denen auch Schlafstörungen zählen, häufig mit den Einwirkungen elektromagnetischer Felder in Zusammenhang gebracht. Wegen der starken psychischen Komponente von Schlafstörungen könnte bereits die Angst der breiten Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern die Schlafstörungen potenzieren. Gerade wegen der flächendeckenden Versorgung durch die Felder der Mobilfunkanlagen mit neuartigen elektromagnetischen Feldern scheint eine Überprüfung dieser Hypothese in zugeschnittenen Schlafuntersuchungen angezeigt.

Der Schlaf äußert sich charakteristisch in Veränderungen verschiedener physiologischer Größen. So werden z. B. die Körpertemperatur und die Herz- und Atemfrequenz während des Schlafes autonom herabgesenkt. Die beste objektive Möglichkeit zur Überprüfung der

Qualität und Länge des Schlafes bietet die Aufnahme der elektrischen Aktivität des Gehirns, das Elektroenzephalogramm (EEG). Während des Schlafes wird die Aktivierung und Leistung des ZNS stark gesenkt, wodurch sich im EEG spezifische Schlafmuster des orthodoxen Schlafes sowie der sogenannten REM- (Rapid Eye Movement) Phase unterscheiden lassen (siehe Abschnitt 7.1). Die orthodoxe Phase mit etwa 80 % der Dauer des gesamten Schlafes dient primär der Körpererholung, wohingegen die REM-Phase mit den restlichen 20 % des Schlafes mit der Verarbeitung der Gefühls- und Triebkomponenten, der Tagesreste und einem Vergleich mit früherem Material in Verbindung gebracht wird.

Für die Aufzeichnung des EEG wird von definierten Stellen an der Kopfoberfläche (zumeist dem international standardisierte System 10/20) die elektrische Aktivität abgeleitet. In den nachfolgenden Bewertungsschritten werden die einzelnen Zeitsignale einer Spektralanalyse unterzogen und dann einer frequenzmäßigen Einteilung in sogenannte  $\delta$ -,  $\theta$ -,  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Bänder unterzogen. Die mittlere Leistungsdichte pro Ableitung und Band stellt die Kenngrößen des EEG dar, die weiterhin statistisch verglichen werden.

**Mann und Röschke (1996)** führen eine Untersuchung des Schlafes an 12 Probanden im Alter zwischen 21 und 34 Jahren zur Überprüfung der Beeinflussung des Schlafes durch 900 MHz-GSM-Felder durch. Jeder der Probanden verbringt 3 sukzessive Nächte im Schlaflabor. Neben dem EEG wird bei den Probanden auch ein EOG (Elektrookulogramm) und EMG (Elektromyogramm) kontinuierlich zur Erkennung von Artefakten abgeleitet und abgespeichert.

Die Exposition erfolgt mit einem 8 W-Handy, dessen Antenne 40 cm vom Kopf entfernt angeordnet ist. Die ungestörte Leistungsdichte im Bereich des Kopfes beträgt  $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ( $0.5 \text{ W}/\text{m}^2$ ).

Von den 3 Nächten dient die erste Nacht zur Adaptation, die nachfolgenden 2 Nächte verbringen die Versuchspersonen randomisiert mit oder ohne Feld, in denen sie von 23.00 Uhr an 8 Std. lang mit kontinuierlicher EEG-Aufnahme überwacht werden. Die Ergebnisse werden mit dem Wilcoxon-Test für gepaarte Proben bewertet. Von den 15 ausgearbeiteten Beurteilungskriterien für Schlafqualität und -quantität haben sich beim Vergleich zwischen Kontroll- und Feldphase in drei Größen signifikante Unterschiede ergeben. Unter der Einwirkung des Feldes verkürzt sich die Latenz zum Schlafbeginn statistisch signifikant ( $p < 0.005$ ) um 23 %. Mit einer geringeren statistischen Sicherheit ( $p < 0.05$ ) ergibt sich eine ca. 18 %-ige Verkürzung der REM-Phase und eine 6 %-ige Herabsetzung der mittleren Leistungsdichte im  $\theta$ -Band während der REM-Phase. Die Probanden geben zwar keine Verschlechterung der Schlafwahrnehmung zu Protokoll, die subjektiven Parameter deuten jedoch auf eine signifikante ( $p < 0.05$ ), etwa 18 %-ige Erhöhung der Gemütsruhe in den nachfolgenden Tagen.

Die Ergebnisse müssen unter dem Gesichtspunkt der niedrigen Anzahl von Probanden und relativ großer Schwankungen in den verschiedenen Schlafparametern sehr vorsichtig ge-



deutet werden. Primär ist auf dieser Grundlage eine weitere vergleichende Untersuchung erforderlich.

**Wagner, Röschke, Mann et al. (1998)** versuchen, eigene Experimente zur Überprüfung des Einflusses der Mobilfunkfelder auf die Schlafabläufe zu reproduzieren. 24 gesunde und an keiner Schlafstörung leidende Probanden in Alter zwischen 18 und 37 Jahren werden für diese Untersuchung herangezogen. Das Bett steht in einer Expositions-kammer, wo eine Befeldung mit kreispolarisierter logarithmischer periodischer Flachantenne im Bereich des Kopfes ein GSM-900 MHz-Feld mit einer Leistungsdichte von  $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ( $0.2 \text{ W}/\text{m}^2$ ) aufbaut. Die SAR im Bereich des Kopfes wird auf  $0.3 \text{ W}/\text{kg}$  als Mittelwert und  $0.6 \text{ W}/\text{kg}$  als Maximalwert geschätzt. Der Versuchsablauf gleicht den Untersuchungen von Mann und Röschke (1996). Zur Beurteilung der Schlafqualität und -quantität werden die Standard-Ableitungen des EEG mit der FFT (Fast-Fourier-Transformation) in  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Bänder aufgeteilt und deren mittlere Leistungen herangezogen. Die statistische Bewertung erfolgt mit Wilcoxon- und ANOVA-Tests.

10 unterschiedliche Schlafparameter werden ausgearbeitet und zwischen Feld- und Kontrollphase verglichen. Im Gegensatz zu den ersten Untersuchungen ergeben die Resultate bezüglich der Latenz des Einschlafens und der REM-Dauer keine statistisch signifikanten Differenzen. Damit können die Ergebnisse der ersten Untersuchung in einem doppelt so großen Kollektiv von Probanden nicht bestätigt werden.

**Borbély et al. (1999)** führen Untersuchungen zur Beeinflussung des Schlafes durch 900 MHz-GSM-Felder an jungen Probanden durch. Für die Untersuchung werden 24 Probanden im Alter zwischen 20 und 25 Jahren (Durchschnittsalter 22,6 Jahre) ausgewählt, die nicht an Schlafstörungen leiden und weder Koffein noch Alkohol konsumieren. Das 900 MHz-Pseudo-GSM-Feld ist linear polarisiert und im Bereich des Bettes mit 3  $\lambda/2$ -Dipolantennen im Abstand vom 30 cm vom Kopf entfernt aufgebaut. In der Expositionsphase wird das Feld abwechselnd für 15 Min. ein- und ausgeschaltet. Die maximale Leistungsdichte im Kopfbereich wird auf  $1 \text{ W}/\text{kg}$  über 10 g Masse geschätzt. Für die Bewertung des Schlafes werden das EEG in mehreren Standard-Ableitungen, das EMG und das EOG herangezogen. Für die EEG-Analyse werden 20 Sek. dauernde Abschnitte mit der FFT-Routine bewertet und in Bänder aufgeteilt. Die statistische Bewertung und der Vergleich erfolgen mit Wilcoxon- und ANOVA-Tests. Die Probanden werden in zwei aufeinanderfolgenden Nächten untersucht, wobei nur eine dieser Nächte nach zufälliger Auswahl mit den Feldexpositionen verbunden ist. Die Ergebnisse zeigen eine statistisch signifikante Verkürzung der Wachraum-Phase von 18 auf 12 Min. unter der Einwirkung der Felder. In der Schlafphase ohne REM-Schlaf zeichnet sich ein Anstieg der mittleren Leistungsdichte insbesondere im EEG-Frequenzband zwischen 7.25 und 14.25 Hz ab. Die Autoren interpretieren das Ergeb-

nis mit einer Verbesserung der Schlafqualität durch die Einwirkung der Mobilfunkfelder.

Die jüngste Untersuchung über die Einwirkungen von Mobilfunkfeldern auf die Qualität des menschlichen Schlafes wird von **Fritzer et al. (2000)** präsentiert. Dazu werden 20 Probanden für je 8 Nächte einbestellt und randomisiert in eine Kontroll- und eine Feldgruppe mit je 10 Personen unterteilt. Die feldexponierte Gruppe wird 7 Nächte lang einem 900 MHz-GSM-Feld ausgesetzt. Die Antenne befindet sich 30 cm entfernt, die verwendete Leistung des Feldes wird im ersten Bericht als weit unterhalb des Basiswertes von 2 W/kg angegeben. Die genaue Stärke wird in weiteren Messungen genau bestimmt. Als Probanden werden körperlich und psychisch gesunde Männer im Alter zwischen 20 und 50 Jahren rekrutiert. Starkes Rauchen, chronischer Alkoholkonsum, Einnahme von Drogen oder psychotropen Substanzen gelten als Ausschlusskriterium. Weiterhin erfolgt im Vorfeld eine internistische, neurologische sowie psychiatrische Untersuchung der Probanden. In der Schlafphase zwischen 23.00 Uhr und 7.00 Uhr (Weckzeit) werden von standardisierten Stellen des Kopfes 15 EEG abgeleitet, desweiteren werden die Probanden psychologischen Tests unterzogen. Als Schlafparameter werden registriert: Bettzeit, totale Schlafzeit, Schlafeffizienz, Schlaflatenz, REM-Latenz, prozentualer Anteil der einzelnen Schlafstadien, Dauer der einzelnen Stadien, REM-Dichte und Häufigkeit des Auftretens der einzelnen REM-Phasen. Die Bewertung richtet sich nach den Auswerterichtlinien von Rechtschaffen und Kales. Die bisher erfolgte Auswertung ergibt weder für die aus dem EEG abgeleiteten Parameter, noch für die Ergebnisse der testphysiologischen/psychologischen Verfahren einen signifikanten Unterschied zur Exposition der Kontrollgruppe.

### **Diskussion:**

Im Vordergrund des Interesses stehen die sogenannten Fernfelder der Basisstationen, die über längere Zeiträume auf den Schlaf einwirken. Im Vergleich zu den Leistungsdichten der Basisstationen im Alltag (siehe Abschnitt 2.2) sind die in den Experimenten angewandten Felder zum Teil beträchtlich stärker. Alle bisher durchgeführten Studien zur Überprüfung eines eventuellen Einflusses der Mobilfunkfelder auf den menschlichen Schlaf werden, gemessen an der Subtilität der Veränderungen und der Variabilität aller Schlafparameter, in relativ kleinen Gruppen durchgeführt. Die Ergebnisse der bisherigen Studien sind auch nicht konsistent. Einige Untersuchungsergebnisse könnten durchweg als eine positive Einflussnahme der Mikrowellen auf den Schlaf gedeutet werden. Allerdings können die berichteten Untersuchungsergebnisse bei einer einzigen Replikation eigener Untersuchungen (Wagner et al., 1998) nicht bestätigt werden. Damit stellt sich die Frage, inwieweit überhaupt eventuelle subtile Effekte der Mikrowellen bei der großen Breite und Variation des Schlafgeschehens verlässlich ermittelt werden können, und welche Bedeutung sie für die Gesundheit haben. Wegen der Bedeutung des Schlafes für die körperliche und psychische Regeneration einerseits und der Langzeit-Exposition des Menschen durch die Felder der

Basisstationen andererseits sind weitere klärende Untersuchungen angezeigt.

#### 8.4 EEG unter der Einwirkung von Mikrowellen

Obwohl dem EEG eine sehr niedrige Spezifität und Sensitivität bezüglich des Nachweises einer pathologischen Veränderung des Zentralnervensystems im Wachzustand zugesprochen wird, wird in einer Reihe von Tierexperimenten und Untersuchungen mit Probanden die Analyse des EEG zur Beeinflussung eines eventuellen Einflusses von Mikrowellen herangezogen.

Eine den abgesteckten Rahmen sprengende, aber im deutschsprachigen Raum kontrovers diskutierte Arbeit von **L. von Klitzing (1995)** baut auf der Aufnahme und Bewertung vom EEG auf. Dabei wird die Wirkung einer 150 MHz-Welle mit einer 212 Hz-Pulsmodulation auf das EEG von 17 Probanden untersucht. Das Alter der Versuchsprobanden liegt zwischen 20 und 29 Jahren. Das applizierte Nahfeld wird im Bereich des Nackens mit einer Spule erzeugt, wobei die magnetische Flussdichte etwa  $1 \mu\text{T}$  betragen soll. Für die Leistungsdichte 6 cm tief im Gehirn wird eine Leistungsdichte kleiner als  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ( $0.01 \text{ W}/\text{m}^2$ ) angegeben. Die Probanden liegen während der Untersuchung mit geschlossenen Augen, ihr Wachzustand wird über die periodische Betätigung einer Kontrolltaste überprüft. Innerhalb der nicht näher definierten Untersuchungszeit wird das Feld 2-3 mal für Probanden blind jeweils 15 Min. eingeschaltet. Zur Überprüfung des Feldeinflusses wird das EEG von der standardisierten Lokalisation O1/O2 respektive P3/P4 abgeleitet und der Fast-Fourier-Transformation unterzogen. Die Spektren werden visuell verglichen, die Arbeit beinhaltet keine Angaben über eine statistische Bewertung und die dabei erzielten Resultate. Exemplarisch werden nur einige Verläufe der Leistungsdichte jeweils aus der 1. und 2. Kontroll- und Feldphase präsentiert. Aus der Beschreibung geht nicht hervor, ob diese Aufzeichnungen von der gleichen Versuchsperson stammen, oder ob sie beliebig zusammengesetzt wurden. Die Aufzeichnungen der spektralen Leistungsdichte für kurze Intervalle, jeweils verglichen aus einer Kontroll- und nachfolgenden Feldphase, weisen ähnliche Verläufe mit unterschiedlicher Amplitude der Leistungsdichte auf. Die Verläufe der Spektraldichte aus der ersten Kontroll- und Feldphase sind mit der darauffolgenden Kontroll- und Feldphase nicht vergleichbar. Trotzdem wird vom Autor die Hypothese aufgestellt, dass die Feldexposition die intrazelluläre Kommunikation im ZNS durch die niederfrequente Umhüllende des hochfrequenten Signals beeinflusst. Die präsentierten Daten liefern jedoch keine nachvollziehbare Grundlage für eine derartige Behauptung.

**Freude et al. (1998)** unterziehen 16 gesunde rechtshändige männliche Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 36 Jahren unter der Einwirkung von 916.2 MHz-GSM-Feldern

zwei unterschiedlichen psychologischen Tests. Die auf der linken Kopfseite befestigten Handy-Phantome senden im eingeschalteten Zustand eine Spitzenleistung von 2.8 W, woraus eine SAR von 1.42 mW/g bei Mittelung über 1 g und 0.882 mW/g bei Mittelung über 10 g Gewebe ermittelt wird. In den Kontroll- und Feldphasen wird vom Kopf des jeweiligen Probanden das EEG in 30 Ableitungen nach dem international erweiterten 10/20-System aufgenommen. Für die Detektion der Augenbewegungen erfolgt eine kontinuierliche Registrierung des Elektro-okologramms (EOG) in vertikaler und horizontaler Ebene.

In jeder Kontroll- und Feldphase führen die Probanden Experimente zur Erzeugung von EEG-Bereitschaftspotentialen und Aufgaben mit Visuellem Monitoring durch. Die Bereitschaftspotentiale werden mit einer schnellen 30-fachen Betätigung einer Mouse-Taste durch den rechten Zeigefinger erzeugt. Bei der Visuellen Monitoring-Aufgabe erfolgen jeweils 50 Versuche mit einer schnellen dreistufigen Bewegung des Pointers auf dem Bildschirm gegen den Uhrzeigersinn, um eine definierte Position eines Punktes möglichst schnell und genau zu erreichen. In der statistischen Bewertung werden die Werte mit und ohne Feld unter Anwendung des ANOVA-Modells verglichen. In der einfachen Finger-Bewegungsaufgabe ergibt sich keine signifikante Feldwirkung auf die Bereitschaftspotentiale. Dagegen zeigen sich statistisch signifikante Differenzen in langsamen Hirnpotentialen beim visuellen Monitoring-Test, indem die mittlere Amplitude der langsamen Hirnpotentialen unter der Feldwirkung verringert wird. Diese Veränderung macht sich in der zentralen und temporo-parieten-occipitalen Hirnregion, aber nicht in der frontalen Region bemerkbar. Die bekannte akustische Hör-Wahrnehmung in Mikrowellen wird von den Autoren wegen der niedrigen Leistung des applizierten Feldes als Ursache für diese Effekte ausgeschlossen.

**Eulitz et al. (1998)** präsentieren Untersuchungen mit 13 gesunden männlichen Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 27 Jahren mit und ohne Einwirkung von 916.2 MHz-GSM-Feldern auf die Akustisch Evozierten Potentiale (AEP). Ein Handy-Phantom wird in der typischen Lage auf der linken Seite des Kopfes befestigt, wobei im eingeschalteten Zustand eine maximale Leistung von 2.8 W gesendet wird. Während der Untersuchung in der Kontroll- wie auch in der Feldphase wird das EEG der Probanden von 30 Lokalisationen auf der Kopfoberfläche nach dem international erweiterten 10/20-System kontinuierlich aufgenommen. Horizontale und vertikale Augenbewegungen werden mit EOG registriert und zur Artefakt-Erkennung herangezogen. Den Probanden werden je 450 Stimuli unter einseitig blinden Bedingungen angeboten. Als Reiz dienen akustische Töne von 1000 und 2000 Hz, wobei das Stimulus-Intervall von 2 Sek. eingehalten wird. Die EEG-Antworten der linken und rechten Hemisphäre auf einzelne akustische Stimuli werden gemittelt und einer verfeinerten Leistungsspektrum-Analyse der PE-300-Komponente unterzogen. Für den statistischen Vergleich kommt die 3-Faktoren-Methode ANOVA zum Einsatz. Die Ergebnisse der gemittelten EEG-Antworten auf akustische Reize (AEP) zeigen keine Abhängigkeit von Feldeinwirkung auf die Verläufe. Ein Effekt ist in der linken Hemisphäre erkennbar, und

zwar nur in Kombination mit dem Reiz. Die größte Differenz zeigt sich in den Ableitungen  $C_z$  und  $C_3$ . Als Schlussfolgerung wird abgeleitet, dass die durch das Feld induzierte Gehirnaktivitätsveränderung von der akustisch evozierten modifiziert wird, und nicht umgekehrt. Die möglichen Konsequenzen dieses Befundes für die ZNS-Verarbeitung werden als schwer einschätzbar dargestellt.

**Röschke und Mann (1997)** führen vergleichende Untersuchungen an 34 gesunden männlichen Probanden im Alter zwischen 21 und 35 Jahren mit und ohne Exposition durch Mikrowellen durch. In den Vormittagsstunden werden bei jedem Probanden 2 10-minütige EEG-Aufnahmen mit einer 30-minütigen Pause zwischen den beiden Aufnahmen durchgeführt. Es werden jeweils 2 EEG-Ableitungen, und zwar  $C_3/C_4$  und  $A_1/A_2$  nach dem internationalen 10/20-System registriert. Jede EEG-Aufnahme wird in 3 nachfolgende Segmente, bestehend aus 80 Scharen, mit je 2.55 Sek. Dauer eingeteilt. Das 1. und 3. Segment dient der Vigilanz-Kontrolle. Je 80 Spektren werden gemittelt und für die EEG-Bänder  $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$  und  $\beta$  die mittlere Leistungsdichte berechnet. Eine weitere statistische Analyse erfolgt mit dem Wilcoxon- und Kolmogorow- und Smirnow-Test. Die Ergebnisse ergeben keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den mittleren Leistungsdichten in den EEG-Bändern mit und ohne Kurzzeit-Exposition.

**Krause et al. (2000)** führen Untersuchungen des Einflusses von GSM-Handys auf das EEG während eines Gedächtnistests durch. Die von einem Computer gesteuerten Handys werden etwa 20 mm vom Kopf entfernt positioniert und mit einem 902 MHz-GSM-Feld betrieben. Die mittlere Leistung beträgt 0.25 W. Zur Untersuchung werden 16 gesunde rechtshändige erwachsene Probanden (8 männlich, 8 weiblich) im Durchschnittsalter von 23 Jahren herangezogen. In einem Gedächtnis-Paradigma werden den Probanden 24 Verben angeboten, wovon 4 richtig erkannt werden sollen. Gleichzeitig erfolgt die Aufnahme des EOG und des EEG. Je 7 EEG-Ableitungen werden von der rechten Hemisphäre und 7 von der linken Hemisphäre des Gehirns abgeleitet. Innerhalb von 1 Std. erfolgen 192 Gedächtnis-Tests, wobei für je 30 Min. das Feld ein- bzw. ausgeschaltet wird. Für die einzelnen Frequenzbänder des EEG wird die Leistungsdichte bestimmt und mit dem ANOVA-Test analysiert. Die Feldexposition führt zu einer Erhöhung der EEG-Leistungsdichte während der Ausführung des Gedächtnistests. Dieser Effekt manifestiert sich am deutlichsten in dem unteren  $\theta$ -Band zwischen 8 und 10 Hz, wo eine statistisch signifikante Erhöhung der relativen Leistungsdichte während der Exposition festgestellt wird.

**Freude et al. (2000)** überprüfen eigene frühere Ergebnisse über die Wirkung der von GSM-Handys ausgehenden Mikrowellen auf die langsamen Potentiale des EEG bei Probanden. 20 gesunde Probanden im Alter zwischen 21 und 30 Jahren führen komplexe und anspruchsvolle Aufgaben mit dem Visuellem Monitoring (VMT) durch. Während der Tests

werden Probanden über ein Handy auf der linken Kopfseite mit 916.2 MHz-Mikrowellen und GSM-Modulation sowie einer mittleren Leistung von 350 mW im Doppelblindversuch schein- oder feldexponiert. Die Beurteilung der Leistung unterschiedlicher Reaktionszeiten wird ermittelt. Darüber hinaus erfolgt eine kontinuierliche Aufnahme des EEG von 30 Standardpositionen sowie des EOG. In einem weiteren Verfahren werden diese Signale gefiltert und testsynchron gemittelt, um aus dem EEG Bereitschaftspotentiale und langsame Antwortpotentiale zu erhalten. Die statistische Analyse bestätigt keine statischen Unterschiede für das VMT. Langsame Antwortpotentiale zeigen eine Reduktion der negativen Verschiebung unter der Feldeinwirkung. Die Autoren leiten von diesem Resultat einen Effekt der Mikrowellen auf eine bestimmte Stufe der Informationsverarbeitung im Gehirn ab. Daraus können jedoch keine Rückschlüsse auf die Beeinflussung des Wohlbefindens und der Gesundheit abgeleitet werden.

### **Diskussion:**

Das spontane EEG des Menschen im Wachzustand wird als unspezifisch für die Beurteilung einer Einflussnahme oder krankhaften Veränderung im Zentralnervensystem eingestuft. Unterschiedliche Vigilanz-Stufen, Lidschlags etc. verändern maßgeblich, häufig nur temporär, die zeitlichen Verläufe des EEG. Die Spektralanalyse mittelt die Frequenzinhalte über ein bestimmtes Intervall, wodurch derartige Artefakte im Verlauf der Leistungsdichte markiert werden können.

Die Spezifität und Sensitivität des EEG wird deutlich erhöht durch die EEG-Mittelung der Reiz- oder Verarbeitungsantworten.

Einige Studien mit diesem Design haben eine schwache Beeinflussung Evozierter Potentiale (EP) durch die 2 W-GSM-Felder der Handys gezeigt. Inwieweit diese subtile Veränderung durch eine geringe Erwärmung mittels Mikrowellen zu Stande kommt, ist ungewiss. Die Bedeutung dieser Effekte für die Funktion des ZNS ist ebenfalls schwer einzuschätzen. Weitere Untersuchungen müssen diese Effekte erläutern, bevor in zugeschnittenen Experimenten deren Bedeutung und Wirkungsmechanismen nachgegangen werden kann.

## **8.5 Tierverhalten**

Zu einer generellen Überprüfung der Existenz von subtilen Effekten der Umwelt auf das Zentralnervensystem werden Untersuchungen des Verhaltens in Tierexperimenten vorgenommen. Die Tests erfolgen zumeist in einem mehrarmigen Labyrinth, wobei die Zeit vom Einlassen bis zur Erledigung einer bestimmten Aufgabe gemessen wird. Den eigentlichen Untersuchungen wird eine Konditionierungsphase vorgeschaltet, in der die Tiere in der Erledigung der Aufgabe bzw. in der Auffindung von Fressen trainiert werden, bevor die eigentlichen Untersuchungen mit und ohne Feld vorgenommen werden.

**Lai et al. (1994)** präsentieren eine Untersuchung des Verhaltens von männlichen Sprague-Dawley-Ratten in gepulsten 2.45 GHz-Mikrowellen (Pulsbreite 2  $\mu$ s, 500 Pulse/s). Die Leistungsdichte beträgt 1 mW/cm<sup>2</sup>, die mittlere spezifische Absorptionsrate 0.6 W/kg. In den Experimenten werden hungrige, mit einer Kochsalzlösung behandelte Tiere in einem radialen 12-armigen Labyrinth ausgesetzt, wobei am Ende jedes Armes ein Stück Futter liegt. Als Beurteilungsmaß wird die Gesamtzeit herangezogen, die ein Tier benötigt, um alle 12 Futterstücke aufzufressen. In der 1. Phase werden die 8 Versuchstiere an die Prozedur gewöhnt. Die Gewöhnung besteht aus 45 Min. Aufenthalt im Wellenleiter ohne Feld und nachfolgend aus der Futtersuche im Labyrinth. Im eigentlichen Experiment werden die Tiere an 18 aufeinanderfolgenden Tagen einmal pro Tag 45 Min. scheinexponiert oder exponiert und dann in das Labyrinth hinausgelassen. Die erzielten Ergebnisse der Dauer der Futtersuche werden pro Tag statistisch bewertet. Die Resultate zeigen, dass mit jedem Tag die zur Futtersuche notwendige Zeit bei exponierten wie auch bei scheinexponierten Tieren kürzer wird. Diese Ergebnisse belegen einen Lerneffekt. Dabei ist die benötigte Zeit der feldexponierten Tiere an allen 18 Versuchstagen statistisch signifikant höher als bei den Kontrolltieren, wenn die Ratten mit einer Kochsalzlösung vorbehandelt waren. Etwa vergleichbare Ergebnisse werden erzielt, wenn die Tiere mit Naloxon, mit dem die Wirkung der Opioide neutralisiert wird, behandelt werden. Eine Vorbehandlung mit Physostigmin, das das cholinergische System inaktiviert und Naloxon, das das opioide System hemmt, bewirkt dagegen keinen Unterschied im Lerneffekt zwischen den feldexponierten und den Kontrolltieren. Aus den Ergebnissen leiten die Autoren die Schlussfolgerung ab, dass die Mikrowellen ein Verhaltensdefizit im Arbeitsgedächtnis der Tiere verursachen. Dieses Defizit kann aufgehoben werden, wenn Physostigmin oder das Opiat Naloxon als Vorbehandlung verabreicht werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das applizierte Feld gleichzeitig in den cholinergischen wie auch endogenen Opioiden auf das Neurotransmitter-System einwirkt.

**Mitchell et al. (1988)** untersuchen das Verhalten von Ratten ohne und unter Einwirkung von kontinuierlichen 2.45 GHz-Wellen mit einer Leistungsdichte von 10 mW/cm<sup>2</sup>. Insgesamt werden 40 Fischer 344-Ratten mit einem Gewicht zwischen 200 und 250 g unter konstanten Temperatur-, Feuchtigkeits- und Ernährungsbedingungen gehalten und jeweils 7 Std. scheinexponiert oder exponiert. Direkt im Anschluss werden die Tiere einem Verhaltenstest unterzogen, bei dem die vertikale und horizontale spontane lokomotorische (Fortbewegungs-) Aktivität, die Schreckreaktion auf einen akustische Reiz und die passive, durch elektrische motivierte Stöße verursachte Meidungsfähigkeit eines Bereiches getestet werden. Die lokomotorische Untersuchung wird in 6 aufeinanderfolgenden Tagen wiederholt. Dabei zeigt die Trennanalyse grundsätzlich eine abnehmende Aktivität in Kontroll- und exponierten Tieren. Bei den exponierten Tieren fällt die Fortbewegungsaktivität in vertikaler wie auch horizontaler Richtung statistisch signifikant schwächer aus. Auch die

Schreckreaktion nach einem akustischen Reiz wird unter Feldeinwirkung statistisch signifikant schwächer. Dagegen zeigt der Vergleich zwischen den exponierten und nichtexponierten Tieren keinen Unterschied in der Häufigkeit der passiven Vermeidung eines Strafbereiches.

**D'Andrea et al. (1986a)** präsentieren Untersuchungen des Verhaltens von erwachsenen männlichen Long Evens-Ratten unter der Einwirkung von 2.45 GHz CW-Mikrowellen. Die mittlere Leistungsdichte der applizierten Felder liegt bei  $0.5 \text{ mW/cm}^2$ . Insgesamt werden 28 Tiere in 2 Gruppen mit je 14 Tieren eingeteilt und 19 Tage lang scheinexponiert oder exponiert (7 Std./Tag, 7 Tage/Woche, insgesamt 630 Std.). Nach dieser Phase werden aus jeder Gruppe jeweils 7 Ratten zufällig ausgesucht, um die Reaktion auf einen elektrischen Schock, die aktive Vermeidung eines Bereiches mit elektrischem Schock, das Verhalten im offenen Feld und die ablaufgesteuerte Betätigung des Behälters zum Erhalten des Futters zu testen. Der statistische Vergleich zwischen der Kontroll- und Feldgruppe ergibt nur für die Tests der aktiven Vermeidung und der Betätigung des Futterbehälters statistisch signifikante Unterschiede. Die Mikrowellen verursachen eine Verlängerung der Reaktion der Versuchstiere. Aufgrund großer individueller Differenzen zwischen den einzelnen Tieren wird dieser Effekt, wenn überhaupt, als schwach eingestuft.

**D'Andrea et al. (1986b)** präsentieren eine weitere Untersuchung des Verhaltens von männlichen erwachsenen Long Evans-Ratten unter der Einwirkung einer kontinuierlichen 2.45 GHz-Welle. 28 Tiere mit einem Gewicht von je 350 g werden unter streng standardisierten Umweltbedingungen gehalten. Die Hälfte der Tiere wird zufällig je einer Feld- und einer Kontrollgruppe zugeordnet. In einer 14-wöchigen Exposition (7 Std./Tag, 7 Tage/Woche) werden die Tiere einer mittleren Leistungsdichte von  $2.5 \text{ mW/cm}^2$  ausgesetzt. Sofort nach der Feld- bzw. Kontrollphase wird das Verhalten in einem offenen Feldtest in Bezug auf die Leistung bei der Vermeidung eines Strafbereiches und die ablaufkontrollierte Betätigung einer Taste, die mit Futter belohnt wird, ausgeführt. Die statistische Bewertung und der Vergleich der Ergebnisse in exponierten und scheinexponierten Gruppen zeigt statistisch signifikante Unterschiede in allen Verhaltensparametern, insbesondere direkt nach der Exposition. Mit der zunehmenden Leistungsdichte fallen die Effekte stärker aus, wobei die Schwelle für eindeutige Effekte zwischen  $0.5$  und  $2.5 \text{ mW/cm}^2$  Leistungsdichte liegt.



### Diskussion:

Die Tierexperimente zeigen übereinstimmend Effekte der Mikrowellen auf das Verhalten und die Lernfähigkeit der Tiere. Insbesondere Tests mit operativer Konditionierung liefern in Tierexperimenten verlässliche Resultate, da hier im Gegensatz zu den Probanden die mentale Komponente nicht zum Tragen kommt. Es muss deshalb unter den gegebenen Feldverhältnissen von einer realen Beeinflussung des ZNS bei den Tieren ausgegangen werden.

Wie unterschiedliche Modellbetrachtungen fast übereinstimmend zeigen, liegt die maximale Erwärmung im menschlichen Kopf durch das betriebene Handy im Bereich von  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Der Grund für eine derartig schwache Erwärmung liegt in der Physiologie des Menschen, sie kann ohne Folge für die Funktion des ZNS ausreguliert werden.

Die Ergebnisse der Verhaltensbeeinträchtigung durch Mikrowellen bei Ratten lassen sich auf keine praktische Situation der Exposition des Menschen durch die Felder der Mobilfunkanlagen im D-Netz übertragen.

Die Möglichkeit, mit Tierexperimenten pharmakologisch verschiedene Systeme des ZNS selektiv zu hemmen, liefert zusätzlich einen exzellenten Weg, den Ort der Wirkung zu überprüfen. Hier stellt sich die Frage, inwieweit diese Ergebnisse auf den Menschen in einer Alltagssituation übertragen werden können.

Die Tiere werden in den beschriebenen Experimenten relativ lange mit 2.45 GHz-Mikrowellen mit einer Leistungsdichte um  $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$  exponiert. Ähnliche Leistungsdichten werden im Kopfbereich des Menschen bei Verwendung von Handys aufgebaut, wobei die Expositionszeiten wesentlich kürzer sind. Allerdings handelt es sich bei der Benutzung eines Handys um ein Nahfeld, wohingegen die Tiere einem Fernfeld ausgesetzt sind. Der gravierendste Unterschied ist wahrscheinlich in der im Kopf des Menschen und im Körper der Ratten bei  $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$  Leistungsdichte aufgenommenen Leistung zu suchen. Wegen der kleinen Abmessungen des Rattenkörpers und insbesondere des Rattenkopfes wird hier bei einer Exposition mit  $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$  eine wesentlich höhere SAR auftreten. Es muss davon ausgegangen werden, dass die applizierte Leistungsdichte einen Wärmestress auslöst. Die Verhaltenstendenzen der Tiere sprechen ebenfalls für diese Hypothese.

## 8.6 Kalziumhaushalt des Hirngewebes

Das Kalzium spielt eine bedeutende Rolle in der Physiologie aller erregbaren Zellen. Im Zentralnervensystem üben die Kalziumionen einen Einfluss auf

- elektrophysiologische und biophysikalische Eigenschaften der Zellmembranen von Neuronen aus,
- sie vermitteln und modulieren die Freigabe der Neurotransmitter aus präsynaptischen Nervenendigungen und
- sind stark beteiligt bei dem Hirn-Energie-Metabolismus, an der Regulation und der Funktionalität der Blut-Hirn-Schranke.

Es ist anzunehmen, dass der Kalziumhaushalt auch von der Entstehung und Entwicklung von Krankheiten betroffen ist. Deshalb haben die ersten Meldungen über die Einflussnahme von Mikrowellen auf den Kalziumhaushalt in der Zelle in den 70er Jahren für große Aufregung gesorgt. Stellvertretend für zahlreiche, sich gegenseitig bestätigende Studien aus dieser Zeit werden hier 2 Studien exemplarisch präsentiert und diskutiert, obwohl sie sich von den Feldern der Mobilfunkanlagen in der Frequenz oder Modulation stark unterscheiden.

**Adey et al. (1982)** messen den Ausfluss von Kalzium aus dem Hirngewebe von Küken in in-vitro-Untersuchungen. Zur Befeldung werden 450-MHz-Felder mit 16 Hz-sinusförmiger Amplitudenmodulation (Modulationsgrad 90 %) verwendet. Die Leistungsdichte beträgt 0.375, 0.75 und 2 mW/m<sup>2</sup>. Proben aus der zerebralen Hemisphere des Gehirns der neugeborenen Küken werden nach Inkubation, aufbewahrt in physiologischer Lösung mit unterschiedlichen pH-Werten, 1 Std. lang exponiert. Der Efflux des Kalziums wird über radioaktive Markierung der Ca-Ionen ermittelt. Die Resultate bestätigen die vorherigen Beobachtungen, und zwar, dass die mit 16 Hz amplitudenmodulierten Wellen zur statistisch signifikanten Erhöhung des Kalziumflusses führt.

**Dutta et al. (1984)** setzen humane Neuroblastoma-Zellen unterschiedlichen 915 MHz-Mikrowellen aus. Für die Exposition wird die Welle alternativ kontinuierlich oder mit 16 Hz sinusamplitudenmoduliert mit einem Modulationsgrad von 80 % appliziert. Die spezifische Absorptionsrate in dem Kulturmedium wird stufenweise zwischen 0 und 5 mW/g variiert. Der Ausfluss der Kalziumionen aus den Zellen wird nach einer 30-minütigen Schein- oder Feldexposition über radioaktive Markierung erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass der Kalziumausfluss aus den Zellen nur bei bestimmten spezifischen Absorptionsraten gegenüber der Kontrolle erhöht wird. Bei der 16 Hz-amplitudenmodulierten Welle sind die SAR-Werte von 0.05, 0.75 und 1 mW/g, die zu einer Erhöhung des Kalziumausflusses bis zu 50 % führen. Die SAR-Werte darunter, dazwischen und darüber liefern keine statistisch signifi-

kanten Veränderungen. Eine kontinuierliche 915 MHz-Welle bewirkt eine statistisch signifikante Erhöhung des Kalziumausflusses um bis zu 20 % nur bei einer SAR von 1 mW/g, und nicht bei 0.05 mW/g. Aus den Ergebnissen wird abgeleitet, dass die humanen Neuroblastomazellen sehr sensitiv auf sehr schwache Felder reagieren und dass bezüglich der Wirkung klare "Windows-Effekte" auftreten.

Diese Beobachtungen werden im Prinzip durch die Publikation von **Kittel et al. (1996)** gestützt. Eine in-vivo-Exposition von Mäusen mit 2.45 GHz-Mikrowellen, sinusförmig mit 16 Hz moduliert mit einer SAR von 2 mW/g, lässt mikroskopisch betrachtet eine Reduktion der Zahl von Kalzium enthaltenden Vesikeln in den Neuronen und eine Erhöhung der Kalzium-Ionen auf der Zelloberfläche erkennen.

**Shelton et al. (1981)** exponieren Gehirngewebe von Ratten in vitro mit gepulsten 1 GHz-Mikrowellen. Die Pulsbreite beträgt 10-20 ms, 16-32 Pulse/s werden in der 20-minütigen Untersuchungsphase appliziert. Die verwendete Leistungsdichte beträgt 5-150 W/m<sup>2</sup>. Ein Vergleich zwischen feldexponierten und Kontrollproben zeigt keine statistisch signifikante Veränderung im Kalziumausfluss an.

**Merritt et al. (1982)** führen Untersuchungen am Gehirn von Ratten durch. Die radioaktive Markierung erfolgt in vivo, wohingegen die eigentliche Untersuchung in Kontroll- und Felduntersuchungen in vitro durchgeführt wird. Für die 20-minütige Exposition des Gehirngewebes werden 1 GHz- bzw. 2.45 GHz-Mikrowellen mit Pulsmodulation (Pulsbreite 10 ms, 6 Pulse/s) angewandt. Die mittlere spezifische Absorptionsrate liegt zwischen 0.29 und 2.9 W/kg. Aus dem statistischen Vergleich lässt sich keine Wirkung der Mikrowellen auf den Kalziumausfluss im Gehirngewebe ableiten.

**Diskussion:**

Alle Arbeiten verwenden eine veraltete Messung des Kalziumausflusses aus der Zelle mittels radioaktiver Markierung der Kalziumionen. Da die Kalziumkonzentration außerhalb der Zelle generell um bis zu 4 Zehnerpotenzen höher ist als die Konzentration im Zellinneren, können kleine Reste des extrazellulären Kalziums bei der Messung große Fehler verursachen. Neuere Fluoreszenzmethoden beschreiben direkt die Kalziumkonzentration in der Zelle. Leider liegen keine Replikationen der zuerst von den Gruppen um Adey und Bawin? im Hirngewebe ermittelten Einflüsse hochfrequenter Felder auf den Ca-Ausfluss unter der Anwendung der Fluoreszenzmethode vor.

Auf der anderen Seite gibt es keine Arbeit, die den GSM-Feldern einen Einfluss auf den Kalziumfluss aus der oder in die Nervenzelle anlastet. Trotzdem sollen derartige Untersuchungen unter der Anwendung von Mobilfunkfeldern durchgeführt werden.

**8.7 Blut-Hirn-Schranke**

Manche Stoffe im Blutplasma erreichen unter physiologischen Bedingungen die interzellulären Spalten des Gehirns nicht. Von dieser Tatsache wird die Existenz einer Blut-Hirn-Schranke abgeleitet, die wahrscheinlich mit einer speziellen Ausgestaltung der Wand der Hirnkapillaren unter Steuerung der Neuroglia diese Filterfunktion ausübt. Eine Veränderung der Durchlässigkeit dieser Schranken führt eine vielseitige Beeinträchtigung des ZNS nach sich. Verschiedene Erkrankungen wie Multiple Sklerose, Hirntumor, Parkinson'sche Krankheit, Schizophrenie oder bestimmte Arten von Epilepsie gehen mit einer z. T. spezifisch veränderten Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke einher. Die Durchlässigkeit kann aber auch durch Fieber oder Bakterientoxine gesteigert werden. Daher haben Berichte über eine Beeinflussung der Blut-Hirn-Schranke durch elektromagnetischen Felder Aufsehen erregt.

**Oscar et al. (1977)** führen Untersuchungen mit Ratten zur Überprüfung der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke unter der Einwirkung von Mikrowellen durch. Für die Untersuchungen, die jeweils zwischen 9.00 Uhr und 15.00 Uhr abliefen, werden 105 männliche Vistar-Ratten mit einem Gewicht zwischen 230 g und 270 g herangezogen. In einer je 20-minütige Exposition werden 1.3 GHz-Mikrowellen als kontinuierliche Welle oder pulsmoduliert (alternativ mit 1000 Pulsen/s und einer Pulsbreite von 0.5  $\mu$ s, mit 5 Pulsen/s und 10  $\mu$ s Pulsbreite, 50 Pulsen/s und 10  $\mu$ s Pulsbreite, 250 Pulsen/s und 20  $\mu$ s Pulsbreite, 250 Pulsen/s und 2  $\mu$ s Pulsbreite sowie 1000 Pulsen/s mit einer Pulsbreite von 10  $\mu$ s) verwendet. Die mittlere Leistungsdichte variiert dabei zwischen 0.1 und 2 mW/cm<sup>2</sup>, wobei die Spitzenwerte zwischen 60 und 1600 mW/cm<sup>2</sup> betragen. Die Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke wird szintigraphisch gemessen, und zwar 8 Min., 4 Std. und 24 Std. nach der Exposition bzw. Scheinexposition. Die Durchlässigkeitsprüfung der Blut-Hirn-Schranke erfolgt mittels Substanzen mit unterschiedlichem molekularem Gewicht, und zwar Mannitol (molekulares Gewicht 182), Inulin (molekulares Gewicht 5000-5500) und Dextran (molekulares Gewicht 60000-75000). Die Blut-Hirn-Schranke ist für diese Substanzen unter physiologischen Bedingungen nicht durchlässig. Die Substanzen werden vor dem Durchlässigkeitstest radioaktiv markiert in die Blutbahn injiziert und können dann in vitro im Ge-

hirngewebe szintigraphisch erfasst werden. Aus dem Verhältnis zwischen der Konzentration im Gehirngewebe und der Konzentration der Testsubstanz im Serum wird ein Durchlässigkeitsindex BUI (Brain-Uptake-Index) berechnet. Inwieweit eine Testsubstanz unter der Einwirkung der Felder die Blut-Hirn-Schranke durchdringt, wird aus dem Verhältnis zwischen den BUI-Faktoren in Kontroll- und feldexponierten Tieren ermittelt. Die statistische Bewertung zeigt, dass die Substanzen mit einem niedrigeren molekularen Gewicht (Mannitol und Inulin) die Blut-Hirn-Schranke der exponierten Tiere besser durchdringen können als die der scheinexponierten Tiere. Für Dextran zeigt sich dagegen keine Differenz zwischen feld- und scheinexponierten Proben. Für die niedermolekularen Substanzen Mannitol und Inulin ergeben sich bei einer mittleren Leistungsdichte von  $2 \text{ mW/cm}^2$  und einem Spitzenwert von  $200 \text{ mW/cm}^2$  eine ca. 1.5-fach höhere Konzentration der Testsubstanzen im Hypocampus und Cortex und eine etwa 3-fach höhere Konzentration im Medulla. Diese Verhältnisse ändern sich nicht wesentlich, wenn Mikrowellen mit einer mittleren Leistungsdichte von  $0.3 \text{ mW/cm}^2$  und einem Spitzenwert von  $600 \text{ mW/cm}^2$  einwirken. Die größte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke wird sofort nach der Exposition bzw. 4 Std. danach festgestellt, wohingegen 24 Std. nach der Exposition vergleichbare Werte mit Kontrollgruppen festzustellen sind. Die Ergebnisse deuten einen Anstieg der Blut-Hirn-Schranken-Permeabilität mit einem relativ hohen Wert der Leistungsdichte an, wobei die Erhöhung der Durchlässigkeit mehr dem Spitzenwert der Leistungsdichte als dem Mittelwert folgt.

**Merritt et al. (1978)** führen Untersuchungen mit männlichen Sprague-Dawley-Ratten zur Überprüfung der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke unter der Wirkung von Mikrowellen durch. Bei der Exposition kommen 1.3 GHz-Mikrowellen mit kontinuierlicher Welle und einer Leistungsdichte von 0.1, 1, 10 und  $50 \text{ mW/cm}^2$  oder pulsmodierte Wellen mit einer Pulsbreite von  $10 \mu\text{s}$  und alternativ 50 oder 1000 Pulse/s und Spitzenwerten der Leistungsdichte von  $3000 \text{ mW/cm}^2$  bzw. Mittelwerten von bis zu  $20 \text{ mW/cm}^2$  zur Anwendung. In einigen Versuchen wird die mittlere Leistungsdichte bis zu  $75 \text{ mW/cm}^2$  gesteigert. Die Ratten mit einem Gewicht zwischen 150 und 225 g werden jeweils 30 Min. exponiert. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Fluoreszein, Serotonin und Mannitol werde szintigraphisch untersucht, indem diese Substanzen radioaktiv markiert werden. Für eine positive Kontrolle wird die Blut-Hirn-Schranke osmotisch mit Urea geöffnet. Die Aufnahme der Testsubstanzen wird in verschiedenen Regionen des Gehirns, und zwar im Hypothalamus, Striatum, Mittelhirn, Hippocampus; Cerebellum, Medulla und Cortex vorgenommen. Neben der Aufnahme der Konzentration der Testsubstanzen in verschiedenen Bereichen des Gehirns werden ebenfalls die rektale und die Hirntemperatur erfasst. Die einzelnen Untersuchungen werden an Gruppen von bis zu max. 20 Tieren vorgenommen. Für die Bewertung wird die Aufnahme einer Substanz in einzelnen Gehirnregionen nach der Feldexposition mit den Werten ohne Exposition in ein Verhältnis gesetzt (BUI-Faktor). Eine statistisch signifikante Erhöhung der Konzentration von Testsubstanzen ergibt sich für eine hyperthermi-

sche Erwärmung des Tieres auf 43 °C, unter Einwirkung eines starken Feldes mit einer mittleren Leistungsdichte von 75 mW/cm<sup>2</sup> (BUI=4) und nach einer Öffnung der Blut-Hirn-Schranke mit der Lösung Urea (BUI=30). Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Fluoreszein und Mannitol bleibt für die pulsmodulierten 1.3 GHz-Felder mit einem Spitzenwert der Leistungsdichte bis zu 20 mW/cm<sup>2</sup>, und bei einer kontinuierlichen Welle bis zu 50 mW/cm<sup>2</sup> unverändert. Erst bei höheren Flussdichten steigt die Durchlässigkeit für diese beiden Testsubstanzen. Die Durchlässigkeit für Serotonin kann durch die Mikrowellen überhaupt nicht verändert werden. Als Ergebnis wird die Erhöhung der Temperatur des Gehirns als Ursache für die Veränderung der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke angegeben.

**Lin et al. (1982)** untersuchen die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke von Vistar-Ratten unter der Einwirkung von Mikrowellen. Für die Experimente werden erwachsene Ratten im Alter von 70 Tagen mit einem Gewicht zwischen 415 g und 530 g verwendet. Pro Untersuchungsgruppe werden jeweils 16-18 Tiere herangezogen. Die Befeldung erfolgt mit 2.45 GHz, die gepulst moduliert sind, wobei die Pulsbreite 10 µs und die Frequenz 500 Pulse/s betragen. Die Berechnung liefert eine mittlere Leistungsdichte von 1-3.25 W/cm<sup>2</sup>. Dieser Ansatz wird thermographisch überprüft, wobei sich die höchste Absorptionsrate im Thalamus, Hippocampus, baltealen und okzipitalen Cortex ergeben. Das Maximum wird im Cortex gemessen, wo eine SAR von 55 mW/g/1W applizierter Leistungsdichten ermittelt wird. Dies entspricht einer SAR von 0.08 mW/g/mW/cm<sup>2</sup> initialer Leistung. Zur Bewertung der Einflussnahme von Mikrowellen wird den Tieren sofort nach der Exposition ein visueller Marker (Blausäure) injiziert. Aus der Verfärbung der einzelnen Gehirnareale wird auf die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke geschlossen. Die Änderung der Körpertemperatur wird mittels einer direkten Messung der Rektaltemperatur ermittelt. Insgesamt erfolgten 3 unterschiedliche Experimente, bei denen die Leistungsdichte und die Expositionsdauer folgendermaßen variierten:

1. Serie: 3 W/cm<sup>2</sup> variable Einwirkdauer 5-20 Min.
2. Serie: Variation der Leistungsdichte zwischen 1 und 3.5 W/cm<sup>2</sup>, die Expositionsdauer bleibt mit 20 Min. konstant.
3. Serie: Nach einer 10-minütigen Exposition mit 3 W/cm<sup>2</sup> wird die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke 5, 10, 20 und 30 Min. danach untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass nach einer 20-minütigen Exposition mit einer mittleren Leistungsdichte zwischen 0.5 und 2600 mW/cm<sup>2</sup> und einer SAR zwischen 0.04 und 200 mW/g im Gehirn in keinem der normalerweise durch die Blut-Hirn-Schranke geschützten Areale eine Veränderung der Färbung festgestellt werden kann. Erst bei einer Erhöhung der Leistungsdichte bis zu 3000 mW/cm<sup>2</sup> (SAR=240 mW/g) wird eine Verfärbung im Cortex-

Hippocampus und im Mittelhirn beobachtet. Diese externe Exposition lässt das Gehirn auf eine Temperatur über 43 °C ansteigen. Untersuchungen mit der Leistungsdichte von 3000 mW/cm<sup>2</sup> mit unterschiedlichen Untersuchungszeiten zeigen, dass bereits 10-20 Min. nach der Exposition die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke ihre normalen Werte annimmt.

**Goldman et al. (1984)** untersuchen die Rolle der Körpertemperatur und der Mikrowellen-Exposition auf die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke. Die Befeldung erfolgt mit 2.45 GHz-Mikrowellen, gepulst mit einer Pulsbreite von 10 µs bei 500 Pulsen/s. Aus der zugeführten und reflektierten Leistung wird die mittlere Leistungsdichte beim Tier von 3 W/cm<sup>2</sup> errechnet. Diesem Wert entspricht eine SAR von 240 mW/g im Gehirn. Mit diesem Feld wurden Gruppen von 4 bis zu 8 Vistar-Ratten (73-95 Tage alt) 5, 10 oder 20 Min. lang exponiert. In den Kontroll- wie auch in den parallel durchgeführten Feldversuchen wird die Körpertemperatur der Versuchstiere alternativ bei 37 °C oder zwischen 41,5 °C und 42 °C gehalten. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für den Radioisotopen <sup>86</sup>Rb wird szintigraphisch untersucht. Als weitere Beurteilungsgrößen gelten die Körper- und Gehirntemperatur sowie das Herzschlagvolumen. Die statistische Bewertung der jeweils aus 4-8 Tieren gemittelten Werte zeigt, dass die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für den Marker Rb in den Regionen des Gehirns am stärksten ansteigt, die direkt auf dem Pfad der Feldausbreitung liegen, und zwar in dem okzipitalen und parietalen Cortex sowie in dem dorsalen Hippocampus, dem Mittelhirn und den basalen Ganglien. In einer separaten Untersuchung kann gezeigt werden, dass die Durchlässigkeit stark von der Hirntemperatur abhängt. Daraus wird abgeleitet, dass auch hier unter der Wirkung der Felder die beobachtete erhöhte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke primär durch die Erwärmung zu Stande kommt.

**Ward et al. (1985)** vergleichen die Wirkung einer kontinuierlichen Welle und pulsmodulierter Mikrowellen auf die Penetration der Blut-Hirn-Schranke in erwachsenen Ratten. Die Exposition erfolgt mit 1.7 GHz-Mikrowellen, alternativ kontinuierlicher Welle bzw. impulsmoduliert (Pulsbreite 0.5 µs und 1000 Pulsen /s). Die mittlere spezifische Absorptionsrate liegt in beiden Fällen bei 0.1 W/kg, wobei der Spitzenwert 200 W/kg erreicht. In die Untersuchung werden 48 90-Tage-alte CD-Ratten mit einem Gewicht von etwa 350 g einbezogen. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für ein Gemisch von Inulin und Saccharose (Polysaccharid), die radioaktiv markiert sind, erfolgt sofort nach der Exposition bzw. Scheinexposition szintigraphisch. Dabei ermittelt man die Konzentration des Markers in 7 verschiedenen Regionen, und zwar Cerebellum, Medulla, Striatum, Hypothalamus, Hippocampus sowie dem lateralen und frontalen Cortex. In einer zusätzlichen Untersuchung wird die Temperaturveränderung dieser Areale unter der Einwirkung des Feldes vermessen. Die Resultate und ihre statistischen Bewertungen zeigen weder für die Temperatur verschiedener Gehirnnareale noch für die Aufnahme der Testsubstanz statistisch signifikante Unter-

schiede zwischen den feld- und scheinexponierten Tieren.

**Neubauer et al. (1990)** prüfen, inwieweit 2.45 GHz-Mikrowellen die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke bei männlichen Albino-Ratten beeinflussen. Die Mikrowellen sind pulsmoduliert mit 10  $\mu$ s Pulsbreite und 100 Pulsen/s, die mittlere Leistungsdichte beträgt 10 mW/cm<sup>2</sup>, was eine SAR von 2 W/kg ergibt. Die Tiere werden dem Feld 30-120 Min. ausgesetzt. Den männlichen Albino-Ratten mit einem Gewicht zwischen 200 und 300 g wird ein strenger Tagesrhythmus mit 12 Std. Licht und 12 Std. Dunkelheit auferlegt. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke, bzw. die Aufnahme der Substanz Rhodaminferritin (Rh-F) wird fluoroskopisch bestimmt. Durch eine Blockade des tubulären Systems mit dem Pharmakon Colchicin wird das Areal der Wirkungen von Mikrowellen überprüft.

Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für diese Komplexe hängt nach den Resultaten der Untersuchung von der applizierten Leistungsdichte und der Dauer der Exposition ab. Die Leistungsdichte von 5 mW/cm<sup>2</sup> hat bei einer Einwirkung von bis zu 120 Min. keinen Effekt. Dagegen ergeben sich klare Effekte ab 30 Min. Expositionsdauer, wenn die Leistungsdichte der Mikrowellen auf 10 mW/cm<sup>2</sup> erhöht wird. Der Inhibitor der mikrotubularen Funktion Colchin ist im Stande, diese durch die Felder verursachte Durchlässigkeit aufzuheben. Daraus wird abgeleitet, dass auch ein mikrotubuläres System bei der Aufnahme des Rh-F-Komplexes unter der Einwirkung von starken Mikrowellen eine wesentliche Rolle spielen muss. Bei der applizierten SAR ist die Beteiligung einer mikrowelleninduzierten Erwärmung an den beobachteten Effekten wahrscheinlich.

**Salford et al. (1994)** untersuchen die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke ohne und unter Einwirkung von 915 MHz-Mikrowellen an Ratten. In der jeweils 2-stündigen Exposition werden alternativ eine kontinuierliche Welle oder eine pulsmodulierte Welle mit einer Pulsbreite von 0.57 ms und einer Wiederholrate von 8, 16 und 200 Pulse/s bzw. einer Pulsbreite von 4 ms und einer Wiederholrate von 50 Pulsen/s appliziert. Die spezifische Absorptionsrate variiert zwischen 0.016 und 5 W/kg. Die Experimente werden mit 106 männlichen und 140 weiblichen Fischer 344-Ratten mit einem Gewicht zwischen 119 und 555 g durchgeführt. Für die Exposition werden Gruppen mit 21-28 Tieren, für die Kontrolle eine Gruppe mit 57 Tieren gebildet. 20 Min. und 2 Std. nach der Exposition wird die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Albumin und Fibrinogen immuno-histochemisch ermittelt. In der Bewertung wird die Anzahl der Tiere mit dem Extravasat in den Testsubstanzen, gemessen an der Anzahl der in der Gruppe untersuchten Tiere, sowie ein Verhältnis dieser Zahlen zwischen feldexponierten und Kontrolltieren (OR), angegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass nur Albumin, nicht aber Fibrinogen die Blut-Hirn-Schranke durchdringen kann. In den Kontrolltieren ist nur in 5 von 62 Fällen eine Extravasation des Albumins feststellbar. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke wird unter der Feldeinwirkung 3.1 bis 5 mal (OR=3.1-5) gegenüber den Kontrollversuchen angehoben. Dabei



scheint der OR-Wert in dem Bereich der SAR zwischen 0.016 und 4 W/kg keinen funktionellen Zusammenhang zu haben. Erst bei SAR-Werten oberhalb von 4 W/kg zeigt sich mit  $OR=6$  ein deutlicher Anstieg.

Eine höhere Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für kleine Moleküle des Albumin mit  $kD=69000$  als für Fibrinogen mit  $kD=400000$  ist wegen der unterschiedlichen Molekülgröße verständlich. Die erhöhte mittlere Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für bereits sehr niedrige SAR-Werte könnte auch aus einem Artefakt durch die z.T. sehr niedrigen Anzahl der Versuchstiere (2 pro Feldeinstellung) resultieren. Der deutliche Anstieg der Häufigkeit der Albumin-Durchlässigkeit bei SAR-Werten oberhalb von 4 W/kg lässt sich auf thermische Wirkung zurückführen.

**Fritze et al. (1997a)** präsentieren eine Untersuchung der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke von Ratten unter der Einwirkung von 900 MHz-Mikrowellen. Die 900 MHz-Welle weist entweder eine GSM-Modulation ( $SAR=0.3$  oder  $1.5$  W/kg) auf oder sie ist ohne Modulation ( $SAR=7.5$  W/kg). Die Untersuchung wird an Vistar-Ratten mit einem Gewicht zwischen 250 g und 300 g durchgeführt, wobei jeweils Gruppen von 20 Tieren exponiert und 2 x 20 Tiere als negative Kontrolle herangezogen werden. Die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Albumin wird mit einer immuno-histochemischen und histologischen Methode in 5 verschiedenen Ebenen des Gehirns durchgeführt. Die positive Kontrolle wird bei 2 Tieren durch eine Kälteverletzung der Blut-Hirn-Schranke eingeleitet. Bei den feldexponierten Tieren erfolgt die Untersuchung der Permeabilität bei 10 Tieren sofort und bei 10 Tieren 7 Tage nach der Exposition.

Bei freilaufenden Tieren zeigt sich eine erhöhte Durchlässigkeit bei 1 von 10 Tieren, und zwar nur in einer Ebene. In 2 der 10 Tiere der scheinexponierten Gruppe werden in 3 Ebenen sofort nach der Untersuchung Defekte der Penetration ermittelt. 7 Tage danach zeigt nur eins von 10 Tieren in einer Ebene des Gehirns eine erhöhte Penetration. Die SAR von 0.3 und 1.5 W/kg ergibt in 5 Tieren insgesamt 7 bzw. 6 Extravasationen sofort nach der Exposition, wobei 7 Tage danach eine deutliche Reduktion auf 2 bzw. 0 Extravasationen zu beobachten ist. Die SAR von 7.5 W/kg führt in 5 Tieren insgesamt zu 14 Extravasationen in 5 verschiedenen Ebenen des Gehirns sofort nach der Exposition, wobei diese Zahlen 7 Tage danach auf ein Tier und eine Extravasation reduziert werden.

Bereits die Scheinexposition führt, wahrscheinlich durch Stresseinwirkung, zu einer Erhöhung der Extravasationen von Albumin. Die Penetration der Blut-Hirn-Schranke wird bei der Exposition mit einer SAR von 0.3 und 1.5 W/kg weiter schwach erhöht. Eine statistisch signifikante Erhöhung der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke für Albumin wird aber erst bei einer SAR von 7.5 W/kg verzeichnet.

**Diskussion:**

Die Blut-Hirn-Schranke ist eine hochspezialisierte und spezifische Barriere, deren Durchlässigkeit für verschiedene Stoffe wahrscheinlich durch Protein-Rezeptoren wie Zonulin oder ZO-2 gesteuert wird. Auch für kleine Moleküle ist die Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke sehr unterschiedlich, und sie zeigt beim Menschen sehr große interindividuelle Schwankungen. Krankheiten wie Multiple Sklerose, Hirntumore, Meningitis, Alzheimer oder HIV-Infektionen beeinträchtigen die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke.

Die vorgestellten Untersuchungen zur Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke werden durchweg an Ratten durchgeführt. Inwieweit diese Verhältnisse auf den Menschen übertragbar sind, ist unklar. Bereits bei Kontrolltieren wird eine sehr unterschiedliche Durchlässigkeit für kleine Moleküle beobachtet. Einwirkungen, wie z. B. Stress, haben offensichtlich auch einen Einfluss auf die Penetrationsrate. Eine Reihe von Autoren zeigen auch bei sehr kleinen Leistungsdichten bzw. niedrigen SAR-Werten eine 2- bis 3-fach erhöhte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke. Die größten Veränderungen werden sofort nach der Exposition beobachtet, mit der Zeit nimmt die Zahl der Extravasationen stark ab und ist mit den Verhältnissen bei Kontrolltieren vergleichbar. Erst bei SAR-Werten oberhalb von 5 W/kg, die bereits eine schwache Erwärmung im Körper verursachen, kann in gesicherten Untersuchungen wiederholt eine statistisch signifikante Erhöhung der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke beobachtet werden. Unter Berücksichtigung der großen extra- und intraindividuellen Schwankungen der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke einerseits und der in einigen Studien für eine statistische Aussage ausreichende Anzahl von Versuchstieren pro Expositionsgruppe andererseits scheint die thermische Wirkung der Mikrowellen der primäre Faktor für die beobachteten Erhöhungen der Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke zu sein. Derart starke Felder werden in den für den Menschen frei zugänglichen Bereichen nicht aufgebaut.

## 8.8 Neuroendokrines System und Hormone

Das neuroendokrine System stellt im menschlichen Körper die Zentrale zur Steuerung des Stoffwechsels, der Regelung des inneren Milieus (z. B. Kreislauf, pH-Wert, Wasser- und Energiehaushalt, Körpertemperatur, etc.) und der Reifungs- und Fortpflanzungsmechanismen des Organismus dar. Darüber hinaus leitet das neuroendokrine System die Antworten des Organismus auf seine Umwelteinflüsse ein, wobei in die Entscheidung Reize aus der Umwelt, psychisch-emotionale Faktoren und Rückkopplungsmechanismen aus dem Körper integriert werden.

Die Informationsübertragung im neuroendokrinen System erfolgt relativ langsam mit Hormonen. Auf Befehle der höheren Zentren des ZNS werden diese Botenstoffe entweder in spezialisierten Zellen des Hippocampus (neuroendokrine Zelle) oder in anderen vom Zentralnervensystem gesteuerten Zellen und Drüsen produziert und in das Blut ausgeschüttet. Über den Blutkreislauf erreichen diese "second messenger" alle Zellen und Organe des Körpers.

Die meisten Neuronen setzen dagegen in ihren Endigungen Übertragungssubstanzen oder Transmitter (z. B. Acetylcholin, Adrenalin, u.a.) frei, die nur die kurzen Strecken des synaptischen Spaltes überwinden und auf diese Weise die Membranspannung der benachbarten Zelle beeinflussen. Die vielfältigen vitalen Aufgaben des neuroendokrinen Systems machen klar, dass eine wie auch immer geartete Beeinflussung des Systems schwerwiegende Folgen für den Organismus nach sich ziehen würde. Deshalb ist es auch verständlich, dass

die Forschung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit sich bereits von Anfang an mit der Frage einer eventuellen Einflussnahme elektromagnetischer Felder auf das neuroendokrine System auseinandergesetzt hat. Allerdings haften vielen Untersuchungen, aus heutiger Sicht betrachtet, methodische Mängel an, die die Arbeiten rudimentär erscheinen lassen. Einige dieser Arbeiten sollen wegen ihrer Einmaligkeit an dieser Stelle trotzdem aufgeführt werden.

**Sanders et al. (1985)** berichten über Untersuchungen des Energiemetabolismus im Hirn unter der Einwirkung von 591 MHz-Feldern. In die Untersuchung werden männliche Sprague-Dawley-Ratten mit einem Gewicht zwischen 175 und 225 g einbezogen. Die Befeldung erfolgt mit einer kontinuierlichen amplitudenmodulierten oder gepulsten Welle. Die sinusförmige Amplitudenmodulation wird mit Frequenzen zwischen 16 Hz und 24 Hz vorgenommen. Die mittlere Leistungsdichte wird auf 10 oder 20 mW/cm<sup>2</sup> eingestellt. Bei der gepulsten Welle mit alternativ 250 oder 500 Pulsen/s bei einer Pulsbreite von 5 µs bewegt sich die angewandte Leistungsdichte zwischen 0.5 und 13 mW/cm<sup>2</sup> als Mittelwert. Für alle Fälle wird eine spezifische Absorptionsrate von 0.181 W/kg/mW/cm<sup>2</sup> mittlerer Leistungsdichte angegeben. Für die Beurteilung des Feldeinflusses wird sofort nach der 5-minütigen Exposition die NADH-Fluoreszenz, die Adenosin-, Triphosphat- (ATP) und Creatin-Phosphate (CP)-Konzentration im Gehirn ermittelt. Direkt nach der Exposition wird auch die Hirntemperatur gemessen. Alle Daten von schein- und exponierten Tieren werden statistisch verglichen.

Die Resultate zeigen, dass die applizierten Felder keine thermische Wirkung ausüben, da die gemessene Temperatur 0.1-0.4°C unter der Versuchstemperatur liegt. Die amplitudenmodulierte Welle mit einer Sinusfrequenz zwischen 16 Hz und 24 Hz zeigt eine modulationsfrequenzabhängige Antwort mit einem Maximum zwischen 16 Hz und 20 Hz. Im Vergleich zur Konzentration vor Beginn der Exposition ergibt sich bei 10 mW/cm<sup>2</sup> eine etwa 5%-ige und bei 20 mW/cm<sup>2</sup> eine 10%-ige Erhöhung. Dagegen zeigen sich in der ATP- und CP-Konzentration herabsenkende Einflüsse der Feldeinwirkung. Zwischen der kontinuierlichen puls- und sinusmodulierten Welle bestehen keine signifikanten Differenzen. Da die Körpertemperatur sich während der Exposition nicht verändert hat, wird aus den beobachteten Veränderungen auf besondere Interaktionsmechanismen zwischen dem Feld und dem Hirnmetabolismus geschlossen.

Die cholinergische Aktivität unter der Einwirkung der Mikrowellen wird sehr detailliert von **Lai et al.** untersucht und in vielen Publikationen präsentiert. Die cholinergische Aktivität bezieht sich auf die Speicherung und Freisetzung von Acetylcholin in allen präganglionären vegetativen Nervenendigungen, allen parasympathischen und einigen sympathischen sowie postganglionären Nervenendigungen sowie an etlichen Synapsen des ZNS.

**Lai et al. (1987)** untersuchen die natriumabhängige hochaffinite Cholinaufnahme in verschiedenen Arealen des Gehirns (Striatum, Frontalkortex, Hippocampus, Hypothalamus) an Ratten unter der Einwirkung von Mikrowellen. Für die Befeldung werden 2.45 GHz-Felder aus einem zylindrischen Wellenleiter jeweils 45 Min. lang appliziert. Alternativ wird eine kontinuierliche oder gepulste Welle (Pulsbreite 2  $\mu$ s, 500 Pulse/s) verwendet. Die spezifische Absorptionsrate erreicht in allen Expositionsfällen 0.6 W/kg. Die männlichen Sprague-Dawley-Ratten (Gewicht 250-300 g) werden unter kontrollierten Ess- und Umweltbedingungen gehalten. In einer separaten Versuchsreihe werden die Tiere mit den narkotischen Antagonisten Naloxon oder Naltrexon (1 mg/kg) vorbehandelt. Sofort nach der Exposition oder Scheinexposition werden die Tiere getötet und die Konzentration des Cholins in Striatum, Hippocampus und Hypothalamus szintigraphisch ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass gepulste Mikrowellen die Cholin-Konzentration im Hippocampus und im frontalen Cortex herabsetzen. Dagegen kann kein signifikanter Effekt im Hypothalamus und Striatum festgestellt werden. Die Vorbehandlung der Tiere mit Narkose-Antagonisten (Naloxon oder Naltrexon) hebt den Effekt der Mikrowellen auf die Cholin-Aufnahme im Hippocampus auf. Diese Wirkung der Narkose-Antagonisten kann im frontalen Cortex nicht festgestellt werden. Die Daten legen den Schluss nahe, dass Mikrowellen mit der angewandten Leistungsdichte unabhängig von der Modulation die cholinerge Funktion des Gehirns beeinflussen.

In nachfolgender Studie (**Lai et al., 1989**) werden die vorangegangenen Untersuchungen in gepulsten Mikrowellen verfeinert. In der jeweils 45-minütigen Exposition werden 2.45 GHz-Mikrowellen gepulst moduliert mit 2  $\mu$ s Pulsbreite und 500 Pulsen/s appliziert. Die mittlere Leistungsdichte variiert in einzelnen Experimenten derart, dass eine SAR zwischen 0.3 und 1.2 W/kg erreicht wird. Ansonsten sind die Versuchsbedingungen identisch mit der vorangegangenen Versuchsreihe.

Die statistische Bewertung und der Vergleich der exponierten und scheinexponierten Tieren zeigen eine Senkung der Cholinaufnahme im frontalen Cortex und Hippocampus oberhalb einer SAR von 0.45 W/kg und einer Absenkung der Cholin-Aufnahme ins Striatum oberhalb einer SAR von 0.75 W/kg.

Der Einfluss von Mikrowellen auf die Acetylcholinesterase unter der Einwirkung von Mikrowellen wird bei **Millar et al. (1984)** in in-vitro-Untersuchungen geprüft. Die Frequenz des Feldes variiert zwischen 2.3 und 2.7 GHz, die impulsmodulierte Welle mit einer Pulsbreite von 16.7  $\mu$ s und 30 Pulsen/s ergibt eine SAR zwischen 32 und 42 W/kg. Die Acetylcholinesterase ist präpariert vom Elektroflax des Rochenfisches. Die Enzymaktivität wurde ontometrisch ermittelt. Die Resultate der Aktivität der exponierten und der nichtexponierten Proben wird verglichen. Dabei ergibt die statistische Bewertung keinen signifikanten Effekt der applizierten Felder auf die Acetylcholinesterase. Aus dem Resultat wird abgeleitet, dass die in anderen Arbeiten beobachtete Veränderung der Acetylcholinesterase im Zentralner-

vensystem nicht auf die Modifikation der Acetylcholinesterasenstruktur und enzymatische Aktivität zurückgeführt werden kann.

**Lai et al. (1991)** untersuchen die Wirkung von Mikrowellen auf zentrale cholinergische Rezeptoren in Ratten. Aufbauend auf den vorherigen Untersuchungen, in denen ein Einfluss der gepulsten Mikrowellen auf das Cholinssystem ermittelt wurde, wird hier die Beeinflussung des muscarinischen Rezeptors (postganglionärer cholinergischer Rezeptor) untersucht. Die Ratten werden nach den gleichen Prinzipien wie in anderen Untersuchungen von Lai ausgesucht und behandelt. Für die 20- oder 45-minütige Exposition werden 2.45 GHz-Felder, pulsmoduliert mit einem Impuls von 2  $\mu$ s Pulsbreite und bestehend aus 500 Pulsen/s, verwendet. Die mittlere Leistungsdichte der zirkularpolarisierten Wellen beträgt 1 mW/cm<sup>2</sup>, woraus kalorimetrisch die SAR von 0.6 W/kg ermittelt wird. Die Konzentration des muscarinisch-cholinergischen Rezeptors wird 24 Std. nach der Exposition im frontalen Cortex und Hippocampus szintigraphisch ermittelt. In einer Zusatzuntersuchung werden die Tiere in einer Gruppe mit dem narkotischen Antagonisten Naltrexon vorbehandelt. Die Exposition sowie auch die Vorbehandlungen werden an bis zu 10 nachfolgenden Tagen wiederholt.

Die wiederholte Exposition der Ratten führt zu einer biphasischen Änderung der Konzentration des muscarinisch-cholinergischen Rezeptors im Zentralnervensystem. Nach 10 Befeldungen mit je 45 Min. ergibt sich eine erhöhte Rezeptorkonzentration im Hippocampus. Eine 10-malige Wiederholung mit je 20. Min. Exposition führt dagegen zu einer verringerten Konzentration des Rezeptors im Frontalkortex und Hippocampus. Die Einflussnahme von Mikrowellen wird mit Naltrexon aufgehoben. Von diesen Resultaten wird abgeleitet, dass endogene Opiate eine wichtige Rolle bei der Beeinflussung des zentralen cholinergischen Systems durch Mikrowellen spielen müssen.

Zur Überprüfung eigener Hypothesen führen **Lai et al. (1992)** Untersuchungen mit Opiat-Rezeptoren unter der Einwirkung von gepulsten Mikrowellen durch. Eine 2.45 GHz-Welle, impulsmoduliert mit 2  $\mu$ s Pulsbreite und bestehend aus 500 Pulsen/s, weist eine mittlere Leistungsdichte von 1 mW/cm<sup>2</sup> auf. Der Spitzenwert der Leistungsdichte erreicht 1 W/cm<sup>2</sup>. Ratten aus der Standard-Behandlung erfahren vor der Exposition Injektionen mit spezifischen Antagonisten der  $\mu$ -,  $\delta$ - und  $\kappa$ -Opiat-Rezeptoren im lateralen Cerebroventrikel. Sofort nach der 45-minütigen Exposition wird die natriumabhängige profine Cholinaufnahme im Frontalkortex und Hippocampus szintigraphisch untersucht.

Die statistische Bewertung der Resultate zeigt, dass alle applizierten Antagonisten der Opiat-Rezeptoren die mikrowelleninduzierte Veränderung der cholinergischen Aktivität im Hippocampus beeinflussen können. Dagegen ist der Feldeinfluss im frontalen Cortex keinem Einfluss der Opiat-Rezeptor-Antagonisten ausgesetzt. Hieraus wird abgeleitet, dass der Mikrowelleneinfluss auf den Cortex nicht über endogene Opiate vermittelt wird.

In einer weiteren Verfeinerung untersuchen **Lai et al. (1992)** die Effekte von Mikrowellen auf benzodiazepine Rezeptoren im Gehirn von Ratten. Für die Befeldung werden 2.45 GHz-Felder, pulsmoduliert mit 2  $\mu$ s Pulsbreite und bestehend aus 500 Pulsen/s bei einer Leistungsdichte im Bereich des Kopfes von 1 mW/cm<sup>2</sup> und einer mittleren Ganzkörper-SAR von 0.6 W/kg verwendet. Bei Ratten, die standardmäßig in Gruppen ausgesucht und vorbereitet werden, beträgt die Exposition 45 Min. und sie wird 1 mal oder 10 mal wiederholt. Die Konzentration und Affinität des Benzodiazepine-Rezeptors im Zentralcortex, Hippocampus und Cerebrum wird nuklearmedizinisch untersucht. Dieser Rezeptor wird im Gehirn für die Vermittlung von Gefühls, Stress und Ermüdung verantwortlich gemacht. Sofort nach der Exposition wird eine statistisch signifikante Erhöhung des Rezeptors im Cortex, aber nicht im Hippocampus und Cerebrum beobachtet. Die Affinität des Rezeptors wird durch Feldeinfluss in keiner Gehirnregion beeinflusst. Eine wiederholte Exposition durch Mikrowellen ergibt ebenfalls keine statistische Abweichung der Rezeptorkonzentration zwischen den exponierten und scheinexponierten Tieren im Cortex sofort nach der Exposition. Von diesen Ergebnissen wird abgeleitet, dass die angewandten Mikrowellen den Benzodiazepine-Rezeptor im Gehirn nicht beeinflussen können.

**Mann et al. (1998)** untersuchen die Wirkung von GSM-Mikrowellen auf das neuroendokrine System. 22 gesunde männliche Probanden im Alter zwischen 18 und 37 Jahren werden für diese Untersuchung ausgesucht. Sie leiden unter keiner Schlafstörung, sind Nichtraucher und nehmen keine Drogen. Alkoholkonsum ist vor und während der Untersuchung verboten. Drei aufeinanderfolgende Nächte verbringen diese Probanden im Schlaflabor unter definierten Bedingungen. Vor, während und nach dem Schlaf können den Probanden über ein Katheter Blutproben entnommen werden. Die Blutproben werden sofort zentrifugiert und unter -25°C gespeichert. Alle Proben eines Probanden werden auf einmal analysiert. Dabei wird die Serumkonzentration von 4 Hormonen ermittelt, die unterschiedliche Assoziationen durch zirkadianen und Schlaf-Wach-Rhythmus aufweisen sollen. Dies sind das Wachstumshormon (GH), Kortisol, das Luteinisierende Hormon (LH) und Melatonin.

In der Expositionsphase wird ein 900 MHz-GSM-Feld über eine Antenne, die in einer Distanz von 40 cm vom Kopf des Probanden aufgestellt ist, appliziert. Die mittlere Leistungsdichte im Bereich des Kopfes beträgt 20  $\mu$ W/cm<sup>2</sup>. Während der gesamten Untersuchungsphase zwischen 23.00 Uhr und 7.00 Uhr morgens werden die Probanden im Schlaf alternativ einem Feld ausgesetzt oder als Placebo ohne Feldeinwirkung beobachtet.

Die Ergebnisse zeigen bei den Parametern GH, Kortisol, und Melatonin ihre typischen nächtlichen Verläufe. Im Vergleich zu verschiedenen Zeitpunkten ergeben sich temporär durchaus signifikante Unterschiede zwischen der Placebo- und feldexponierten Gruppe. So z. B. ist der Melatonin-Pegel unter der Befeldung um 3.00 Uhr morgens statistisch signifikant um fast 100 % höher als bei der Placebo-Versuchsperson. Betrachtet man im Mittel-

wert über die ganze Nacht hinweg die gesamte Ausbeute der einzelnen Hormone, so ergibt sich keine statistisch signifikante Unterscheidung der Ausbeute zwischen den placebo- und feldexponierten Probanden. Die Ergebnisse deuten an, dass beim Menschen relativ schwache GSM-Mikrowellen keine ausgeprägte Beeinflussung der nächtlichen Hormonsekretion verursachen.

**Braune et al (1998)** führen Untersuchungen mit Probanden unter der Wirkung von 900 MHz-GSM-Feldern durch. 7 gesunde Männer und 3 Frauen im Alter zwischen 26 und 36 Jahren unterziehen sich einseitig blinden Untersuchungen, wobei ein betriebenes oder ausgeschaltetes Handy auf der rechten Seite des Kopfes in Normalposition gehalten wird. Das marktübliche Handy wird mit 2 W betrieben. Zur Überprüfung der Wirkung von GSM-Handys werden Blutdruck, Herzfrequenz, kapillare Perfusion und subjektives Wohlbefinden aufgenommen. Im Versuchsablauf wechseln sich Phasen mit Placebo- und Feldexposition von jeweils 25 Min. Dauer ab. Die Untersuchungen werden 5-mal an verschiedenen Tagen wiederholt. Nach 35-minütiger Exposition werden Parameterwerte im Ruhezustand, im liegenden Zustand und als Antwort auf Aufrichtung über 60 Min., nach einer tiefen Atmung mit 6 Atmungszyklen/Min. und das Valsalva-Manöver mit 40 mm Hg-expiratorischem Druck gemessen. Der Valsalva-Versuch dient der Überprüfung der Herzfunktion, bei der ein Patient nach einer tiefen Inspiration bei geschlossenem Mund und zugehaltener Nase einen Überdruck im Nasen-Rachen-Raum erzeugt.

Die statistische Bewertung zeigt keinen Einfluss des Feldes auf subjektive Parameter. Unter der Wirkung von Mikrowellen sind der systolische und diastolische Blutdruck im Ruhezustand signifikanter höher als in der vergleichbaren Placebo-Position. Der Blutdruck nach 30 bzw. 60 Sek. im aufrechten Zustand ist signifikant höher unter Feldexposition, ohne eine signifikante Differenz in der Ruheamplitude. Beim Valsalva-Manöver ist der Unterschied im Blutdruck während der Ruhephase signifikant niedriger während Phase 1, und signifikant höher während Phase 2 unter der Exposition, während die absoluten Blutdruckwerte keine signifikante Differenz mehr aufzeigen. Die Autoren leiten von der Exposition der rechten Hemisphäre mit Handy-Feldern über 35 Min. Dauer eine erhöhte sympathetische Efferenzaktivität ab, die den Ruhedruck um 5-10 mm Hg (ca. 5 %) anhebt. Die über Baroreflex vermittelte Regulation des Blutdrucks wird nicht beeinflusst.

### **Diskussion:**

Die herangezogene Literatur zeigt exemplarisch die Breite und Komplexität der Untersuchungen des neuroendokrinen Systems. Viele physiologische Vorgänge werden noch nicht verstanden, zur Erklärung von beobachteten Veränderungen werden oft eigene Hypothesen herangezogen. Trotz einer vielfachen Verkopplung verschiedener Steuerungsmechanismen und -systeme im ZNS sind mit den heutigen Untersuchungsmethoden nur isolierte Kreise, häufig auch nur indirekt, zugänglich. Auf dieser Grundlage stellt sich die Frage nach der

Wertigkeit der präsentierten Ergebnisse. Die beobachteten Effekte sind schwach und sie werden mit relativ starken Feldern erzielt. Daher kann eine thermische Beteiligung nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die Konsequenz dieser geringen Veränderung für das Tier und vor allem für den Menschen ist noch völlig ungeklärt. Darüber hinaus werden solch starke Felder von keiner Mobilfunkanlage im Alltag erzeugt.

Andererseits zeigen die Untersuchungen, dass mit dezidierten biologisch/medizinischen Methoden ein detailliertes Wissen gewonnen werden kann. Insbesondere die pharmakologische Methode der Ausschaltung verschiedener Rezeptorensysteme im ZNS öffnen einen exzellenten Weg zur Verfolgung der Wirkungsmechanismen eines eindeutig nachgewiesenen Effektes. In diesem Punkt sind allerdings gewisse Defizite vorhanden, da die speziellen Untersuchungen von einzelnen Forschergruppen publiziert und repliziert wurden, was dem wissenschaftlichen Anspruch für einen belegten Effekt nicht genügt. Diese verfeinerten Methoden sollten da angesetzt werden, wo Wirkungen der Mikrowellen auf z. B. kognitive Funktionen des ZNS oder auf den Schlaf eindeutig nachgewiesen wurden.



## 9. Sinnesrezeptoren im Feld der Mobilfunkanlagen

Die stärksten Mobilfunkfelder werden im Körper von den in der Nähe des Kopfes betriebenen Handys (siehe Abschnitt 2) aufgebaut. Demnach wird der Kopf und in ihm das Gehirn, der Seh- Hör- und Gleichgewichtsapparat einseitig mit den stärksten Feldstärken der Mobilfunkfelder durchsetzt. Dabei gehören die Hör- und Sehorgane zu den empfindlichsten und wichtigsten Sinnesrezeptoren des Menschen, wobei das Auge sogar auf die Wahrnehmung eines schmalen Spektrums der elektromagnetischen Wellen im sichtbaren Spektrum spezialisiert ist. Diese Tatsache, zusammen mit weiteren Gesichtspunkten, wie z. B. der relativ geringen Durchblutung des Auges und einer folgerichtigen Anfälligkeit gegenüber einer übermäßigen Erwärmung, machen die Betrachtung einer eventuellen Beeinträchtigung dieser Organe durch die Mikrowellen der Mobilfunkanlagen unumgänglich.

Beide Sinnessysteme sind nachweislich im Stande, bestimmte elektromagnetische Felder auch nichtadäquat wahrzunehmen. Niederfrequente elektromagnetische Felder lassen ab einer bestimmten Flussdichte an der Peripherie des Sehfeldes Flickereffekte entstehen, die als Phosphene bezeichnet werden. Dieses Phänomen ist bisher nur für sehr niedrige Frequenzen belegt. Die Linsentrübung, auch als Katarakt bezeichnet, wird z. T. mit einer übermäßigen Wärmeentwicklung im Auge in Verbindung gebracht. Schließlich können starke hochfrequente Felder akustische Wahrnehmungen erzeugen. Es stellt sich also die Frage, inwieweit die Mobilfunkfelder, insbesondere die von Handys im Kopf aufgebauten Felder, in irgendeiner Weise einen oder beide Sinnesapparate beeinflussen oder sogar schädigen könnten.

**Guy et al (1980)** untersuchen die kataraktogenen Langzeiteffekte von Mikrowellen an Kaninchen. Zur Exposition werden 2.45 GHz-Mikrowellen mit einer Leistungsdichte von 10 mW/cm<sup>2</sup> (maximale SAR=17 W/kg) 23 Std./Tag, 180 Tage lang appliziert. Die Befeldung erfolgt durch eine Hornantenne aus einem Abstand von 1 m. Je 4 männliche New-Zealand-Kaninchen werden exponiert und zur Kontrolle herangezogen. Die Augen der exponierten Tiere zeigen keine Veränderungen. Ebenfalls keine Auffälligkeiten sind in Parametern wie Körpergewicht, Rektaltemperatur, Hämatokrit, Hämoglobin und Blutkoagulation zu finden. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen schein- und exponierten Tieren finden sich in Albumin, Kalzium und in der Myeloid/Erythroid-Rate im sternalen Knochenmark.

**Kues et al. (1985)** exponieren Augen von anästhesierten Affen mit Mikrowellen zur Ermittlung einer eventuellen Schädigung. Die Befeldung der Augen wird alternativ mit 2.45 GHz-Feldern als kontinuierliche Welle oder gepulst (10 µs Pulsbreite, 100 Pulse/s) vorgenommen. In der jeweils 4-stündigen Exposition wird alternativ eine mittlere Leistungsdichte zwischen 5 und 30 mW/cm<sup>2</sup> bei der kontinuierlichen Welle appliziert, was einer SAR

zwischen 5.3 und 7.8 W/kg entspricht. Die mittlere Leistungsdichte der pulsmodulierten Welle wird alternativ auf 5, 10 oder 15 mW/cm<sup>2</sup> eingestellt, wobei die normierte SAR 0.26 W/kg pro mW/cm<sup>2</sup> Leistungsdichte beträgt. Die Mikrowellen werden über einen Koaxial-Wellenleiter appliziert, wobei die Öffnung 10 cm vom Gesicht entfernt angeordnet ist. Die Anzahl der Expositionen pro Tier variiert zwischen 1 und 56 Sitzungen, wobei zwischen den einzelnen Sitzungen mindestens 1 Tag, in den meisten Fällen 1 Woche liegt. Für die Untersuchung werden 15 *Macaca-tascularis*-Affen herangezogen. Zur Beurteilung der Feldwirkung werden die Augen 16-48 Std. nach der Exposition mikroskopisch sowie histologisch untersucht. Aufgezeichnet wird die Anzahl der Anomalitäten im kornealen Endothelium. Die Ergebnisse zeigen, dass beide, die kontinuierliche wie die gepulste Welle, Anomalitäten in der obersten Schicht des Auges hervorrufen können. Die Häufigkeit der Anomalitäten nimmt vor allem mit der Leistungsdichte und weniger mit der Anzahl der Expositionen zu. Gepulste Mikrowellen mit einer mittleren Leistung von 10 mW/cm<sup>2</sup> produzieren etwa die gleiche Anzahl von Defekten wie die kontinuierliche Welle mit einer Leistungsdichte zwischen 20 und 30 mW/cm<sup>2</sup>.

Die Schwelle der Kataraktbildung durch Mikrowellen wird in Tierexperimenten mit Neuseeland-Kaninchen bei **Foster et al. (1986)** untersucht. Die 2.45 GHz-Welle, impulsmoduliert mit 1 kHz, wird jeweils in das linke Auge appliziert. Die initiale Leistung wird so verändert, dass alternativ eine absorbierte Leistung zwischen 3 und 8 W und eine spezifische Leistungsdichte zwischen 10 und 20 W/kg im Kopf der Tiere aufgebaut wird.

Insgesamt werden 135 Kaninchen 1 mal bis 7 mal je 30. Min. lang exponiert. Als Kontrolle dient das rechte Auge. Die Durchlässigkeit der Linse beider Augen wird optisch untersucht. Zusätzlich wird bei den Tieren die rektale Temperatur erfasst. Die Erfassung der Rektaltemperatur zeigt einen durchschnittlichen Anstieg um 1°C, wenn die absorbierte Leistung von 4 W auf 8 W erhöht wird. Die Häufigkeit der Undurchlässigkeit der Linse steigt von 0 % bei 5.5 W absorbierter Leistung auf 100 % bei 6 W. Dies ist unabhängig von der Anzahl der Expositionen. Aus den statistisch gut gesicherten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Kataraktbildung oberhalb einer SAR von 14 W/kg ansetzt.

**Kues et al. (1992)** führen Untersuchungen der Einflussnahme von Mikrowellen auf die Häufigkeit von Läsionen im Auge von Affen durch. Für die Untersuchung werden erwachsene Rhesus-Affen im Alter zwischen 4 und 18 Jahren mit einem Gewicht zwischen 4 und 7 kg herangezogen. Mittels eines Wellenleiters werden aus einer Entfernung von 10 cm 2.45 GHz-Felder impulsmoduliert mit 10 µs Pulsbreite und 100 Pulsen/s, jeweils 4 Std./Tag an 3 aufeinanderfolgenden Tagen exponiert. Alternativ wird eine Leistungsdichte von 0, 5, 10 und 15 mW/cm<sup>2</sup> appliziert, was einer SAR von 0, 1.3, 2.6 und 3.9 W/kg entspricht. In einer separaten Gruppen werden die schein-und exponierten Tiere zusätzlich mit den ophthalmologischen Medikamenten Timolol oder Pilocarpin vorbehandelt. Zur Beurteilung der

Feldwirkung wird sofort nach der Exposition die vaskuläre Permeabilität der Iris auf Fluorescein sowie auf die Häufigkeit der Läsionen in der Cornea untersucht. Der statistische Vergleich der Resultate zwischen schein- und exponierten Tieren zeigt, dass ab einer Leistungsdichte von  $10 \text{ mW/cm}^2$  die Häufigkeit der cornealen endotheliosen Läsionen sowie die Permeabilität der Iris zunimmt. Die Schwelle für die Schädigung sinkt nach der Vorbehandlung mit den Medikamenten Timolol oder Pilocarpin sogar unter eine Leistungsdichte von  $1 \text{ mW/cm}^2$ . Für eine 4-stündige Exposition mit  $20 \text{ mW/cm}^2$  wird eine Temperaturerhöhung im Auge von  $0.77 \text{ }^\circ\text{C}$  ermittelt. Dies bedeutet, dass die in der Untersuchung angewandten Mikrowellen nicht allein über eine thermische Wirkung die beobachteten Defekte verursachen können.

**Lu et al. (2000)** führen Untersuchungen an Affen zur Überprüfung der Wirkung von gepulsten Mikrowellen im Auge durch. Die Augen werden mit einer  $1.25 \text{ GHz}$ -Welle gepulst mit einer Pulsbreite von  $5.59 \text{ } \mu\text{s}$ , bestehend aus  $0.59$ ,  $1.18$  und  $2.79$  Pulsen/s exponiert. Der Spitzenwert der SAR erreicht  $1.3 \text{ mW/kg}$  mittlerer SAR, in der Retina bewegt er sich zwischen  $4.3$  und  $20 \text{ W/kg}$ . Zur Beurteilung einer eventuellen Beeinträchtigung des Auges wird nach der Exposition mikroskopisch die Anzahl der Defekte ausgezählt. Darüber hinaus erfolgt eine Aufzeichnung des Elektroventrikulogramms zur Bewertung der retinalen Summenpotentiale. Die 4-stündige Exposition wird an drei Tagen/Woche, 3 Wochen lang, wiederholt. Die Ergebnisse zeigen keine Läsionen der retinalen Struktur. Die elektrische Antwort der retinalen Zellen ist bei höheren SAR-Werten leicht erhöht.

Die Natur akustischer Wahrnehmungen in gepulsten Mikrowellen wurde bereits in den 70-er und 80-er Jahren erforscht. Durch eine fokale Erwärmung im Gehirn entsteht eine thermoplastische Welle, die sich im Kopf als akustische Welle bis zum Innenohr ausbreitet und die Hör-Rezeptoren anregt. Hier ist die Frage zu stellen, inwieweit Felder der Mobilfunkanlagen derartige Effekte hervorrufen können.

**Seaman et al. (1987)** führen Untersuchungen an Katzen zur Überprüfung der akustischen Wahrnehmung in Mikrowellen durch. Es werden  $915 \text{ MHz}$ -Felder impulsmoduliert mit einer Wiederholfrequenz von  $931 \text{ Hz}$  bis  $25.5 \text{ kHz}$  angewandt. Von den erwachsenen und narkotisierten Katzen mit einem Gewicht zwischen  $2$  und  $4.4 \text{ kg}$  werden mit Mikroelektroden dorsal cochleare elektrische Antwortpotentiale aufgenommen. Für einfache und doppelte Mikrowellen-Impulse mit verschiedener Pulsbreite und Interpulsabständen zeigt sich, dass die spezifische Absorptionsrate für die Erzeugung von akustischen Wahrnehmungen unter  $6 \text{ mW/g}$  liegt. Dies entspricht einer spezifischen Absorptionsrate von  $0.5 \text{ } \mu\text{J/g}$  für kurze Impulse zwischen  $10 \text{ } \mu\text{s}$  und  $240 \text{ } \mu\text{s}$ . Die Stärke der Antwort ist proportional zur Pulsenergie.

**Chou et al. (1985)** ermitteln die Quelle der akustischen Antworten als Folge von gepulsten Mikrowellen in Ratten. Bei 10 erwachsenen Ratten mit einem Gewicht zwischen 340 g und 480 g werden im anästhesierten Zustand durch Mikrowellen induzierte akustisch evozierte Potentiale abgeleitet. Die applizierte 2.45-GHz Welle, pulsmoduliert mit einer Pulsbreite von 1, 2, 5 und 10  $\mu\text{s}$  und bestehend aus 10 Pulsen/s, kann in der Amplitude im breiten Bereich verändert werden. Die initiale Energiedichte für die Auslösung von akustisch evozierten Potentialen liegt zwischen 1.5 und 3  $\mu\text{J}/\text{cm}^3$ , was einem Spitzenwert der Leistungsdichte eines einzelnen Impulses von 0.3-3  $\text{W}/\text{cm}^2$  entspricht. Die Amplitude der evozierten Potentiale nimmt mit dem weiteren Anstieg der Energiedichte fast linear zu.

### **Diskussion:**

Die von Handys im Kopf aufgebaute Leistungsdichte liegt maximal bei ca. 1  $\text{W}/\text{cm}^2$  (siehe Abschnitt 2). Mit diesen maximalen Leistungsdichten kann etwa in der motorischen und sensorischen Großhirnrinde einer Hirnhälfte gerechnet werden. Im Bereich der Augen treten wegen des Abstandes zur Antenne wesentlich schwächere Leistungsdichten im Bereich unter 0.2  $\text{mW}/\text{cm}^2$  auf (siehe Abschnitt 2). In der Literatur wird gezeigt, dass Mikrowellen unterschiedliche Defekte und Läsionen oder sogar eine Trübung des Auges verursachen können. Relativ übereinstimmend ergibt sich, dass die Schwelle für eventuelle Schädigungen oberhalb von 10  $\text{mW}/\text{cm}^2$  beim gesunden Auge liegt. Obwohl diese Untersuchungen aus ethischen Gründen nur in Tierexperimenten vorgenommen werden können, spricht nichts gegen eine Übertragbarkeit dieser Resultate auf das menschliche Auge, vorausgesetzt, die ermittelten Leistungsdichten und SAR-Werte wurden verlässlich ermittelt. Danach dürften auch unter ungünstigsten Verhältnissen die Felder der 2 W-Handys keine Gefährdung für das Auge darstellen. Umso mehr gilt diese Feststellung für die wesentlich schwächeren Felder der Basisstationen.

Unter der Beeinflussung von Medikamenten, die in das Auge appliziert werden, hat sich nach einem Bericht eine deutliche Herabsenkung der Schwelle bis unter 1  $\text{mW}/\text{cm}^2$  ergeben. Die Richtigkeit dieser Meldung muss in Wiederholung überprüft werden. Bei Bestätigung müssen eventuelle Konsequenzen und Gegenmaßnahmen für betroffene Patienten ausgearbeitet werden.

Für die Induktion von Hörwahrnehmungen durch impulsmodulierte Mikrowellen müssen einzelne Schwingungspakete eine bestimmte Pulsbreite und minimale energiedichte aufweisen. Die Pulsbreite der GSM-Schwingungspakete beträgt 3.69  $\mu\text{s}$  und liegt damit im relevanten Intervall.

Die Wahrscheinlichkeit einer akustischen Wahrnehmung der von Handys gesendeten Mikrowellen ist aber sehr gering, da die Energiedichte einzelner Impulse mindestens um einen Faktor 1000 unter den ermittelten Schwellen liegt. Eine akustische Wahrnehmung der Felder von Basisstationen ist gänzlich ausgeschlossen, da deren Stärke mindestens 6 Zehnerpotenzen unter der Schwelle liegt.

## 10 Einfluss der Mobilfunkfelder auf elektronische Implantate

Die in den Körper eindringenden Felder der Mobilfunkanlagen koppeln sich in die Elektronik der im Körper implantierten Aggregate wie Herzschrittmacher, Herzdefibrillator, Nerven- und Muskelstimulatoren oder Cochlea-Implantate. Die Elektronik dieser Implantate ist meist für die Verarbeitung niederfrequenter elektrischer Signale ausgelegt. Mikrowellen werden in der Elektronik mit einer niedrigen Güte gleichgerichtet. Dies kommt einer Demodulation gleich, eine niederfrequente Umhüllende wird weiter verstärkt und verarbeitet. Durch eine derartige Interferenz kann es zur Beeinflussung der Funktion von Implantaten kommen, was im Falle des Herzschrittmachers oder des implantierten Defibrillators lebensgefährlich sein könnte. Deshalb wird der Problematik der Störung von Herzschrittmacher-Systemen in der Literatur ein hoher Stellenwert zugerechnet. Im Vordergrund des Interesses stehen selbstverständlich Handys, die im Körper die stärksten Felder aufbauen können.

**Nowak et al. (1996)** führen Untersuchungen mit 31 Patienten (17 männliche und 14 weibliche) mit implantierten Herzschrittmachern durch. 30 unterschiedliche Herzschrittmachertypen (12 Intermedics-, 10 Medtronic- und 9 Vitatron-) sind bei diesen Patienten implantiert. Für die Störüberprüfung werden alle Herzschrittmacher auf eine unipolare Stimulation geschaltet, wobei die niedrigste Empfindungsschwelle des jeweiligen Herzschrittmachers mit Werten zwischen 0.1 und 0.25 mV für die atriale Stimulation und 1 mV für Ventrikel eingestellt wird. Zur Exposition kommt ein handelsübliches GSM-D-Netz-Handy PPU 902 der Fa. Orbitel, das mit voller Leistung von 2 W betrieben wird. Das Handy wird an der Thorax-Oberfläche so angebracht, dass die Antenne die Haut der rechten sternalen Grenze berührt. Die Distanz zwischen der Antenne und dem Stecker des Herzschrittmachers beträgt mindestens 5 cm. Das Handy wird bei der Überprüfung der Störung des Herzschrittmachers alternativ im Einschalt-, Sprech- oder Hörmodus betrieben. Eine Funktionsüberprüfung des Herzschrittmachers wird kontinuierlich mittels der EKG-Aufnahme vorgenommen. Das Handy-Feld verursacht bei keinem Patienten eine Funktionsstörung.

**Irnich et al. (1996)** führen Untersuchungen der Störbeeinflussung von 231 unterschiedlichen Herzschrittmacher-Modellen von 20 Herstellern in einem stark vereinfachten Modell durch. Das Herzschrittmacher-System mit Aggregat und Elektrode wird dabei in eine Kochsalzlösung eingetaucht, wobei die Handy-Antenne bis auf 10 mm an die Herzschrittmacher-Elektrode angenähert werden kann. Das 900 MHz-D-Netz-Feld wird mit einer Leistung von 2 W appliziert. Über die Aufnahme der Stimulationsfrequenz wird untersucht, inwieweit die Herzschrittmacher in Abhängigkeit von Leistung und Abstand der Handy-Antenne gestört werden können. Die während der Untersuchung eingestellte Empfindlichkeit der

einzelnen Herzschrittmacher wird nur pauschal mit einem Mittelwert von  $2.15 \text{ mV} \pm 0.7 \text{ mV}$  (Minimum  $0.34 \text{ mV}$ , Maximum  $5.8 \text{ mV}$ ) und für den atrialen Kanal mit  $1.08 \text{ mV} \pm 0.46 \text{ mV}$  (Minimum  $0.05 \text{ mV}$ , Maximum  $2.47 \text{ mV}$ ) angegeben. Bei dem minimalen Abstand des 2 W-Handys von der Schrittmacher-Elektrode werden 34 % der untersuchten Herzschrittmacher auf verschiedene Weise gestört. Aus diesen Resultaten wird eine Empfehlung für die Patienten abgeleitet, und zwar, dass der Abstand zwischen dem Handy und dem Herzschrittmacher mindestens 20 cm und bei portablen Handys mindestens 15 cm betragen soll.

**Barbaro et al. (1995)** ziehen 101 Herzschrittmacher-Patienten zur Untersuchung von Störbeeinflussungen durch Handys heran. Bei den Patienten sind insgesamt 39 unterschiedliche unipolare und 4 bipolare Herzschrittmacher von 11 unterschiedlichen Firmen implantiert. Im Störtest werden herkömmliche GSM-900 MHz-Handys (Dynatac und Micro) mit ausziehbarer Antenne und 2 W Leistung angewandt. Die Handys mit ausgezogener Antenne werden derart plaziert, dass die Antenne den Brustkorb oberhalb der Implantationslage auf der rechten subpektoralen Seite berührt. Unter der Kontrolle eines Computers wird das Handy alternativ in 3 Zustände (Einschalten, Wählen für 3-6 Sek. und Ausschalten) versetzt. Um zu erkennen, inwieweit der Herzschrittmacher durch Störung auf asynchronen Modus umschaltet, wird die Frequenz des Herzschrittmachers 20 Pulse/Min. unter den Rhythmus des Patienten programmiert. Gleichzeitig wird auch die jeweilige eingestellte Empfindlichkeit des Herzschrittmachers abgefragt und dokumentiert. Zur kontinuierlichen Überwachung der Herzschrittmacherfunktion erfolgt eine EKG-Aufnahme.

In 26 von 101 (26 %) implantierten Herzschrittmachern ergibt sich eine Interferenz mit den Handys. Eine Pulsinhibition wird in 10 von 101 Fällen, eine ventrikuläre Triggerung in 9 von 46 untersuchten Schrittmachern beobachtet. 4 von 52 Aggregaten schalten auf asynchronen Betrieb um. Wenn die Herzschrittmacher auf die niedrigste Empfindlichkeit programmiert werden, bleibt die Störung bis zu einem Abstand von 10 cm zwischen dem Schrittmacher und dem Handy bestehen. Bei der Standard-Einstellung der Empfindlichkeit für Ventrikel und Atrium mit Schwellen von 4 bzw.  $2.5 \text{ mV}$  muss die Handy-Antenne den Körper direkt berühren, damit es zu einer Störung kommt.

**Hofgärtner et al. (1996)** führen Untersuchungen an 104 Herzschrittmacher-Patienten (54 männlich, 50 weiblich, Durchschnittsalter 75.8 Jahre) mit 58 unterschiedlichen Herzschrittmachertypen (43 Einkammer-, 15 Zweikammer-Systeme) durch. Getestet wird die Störbeeinflussung dieser Herzschrittmacher unter anderem durch D-1-portable Geräte mit 8 W sowie D-1-Handys mit 2 W Leistung. Zu Beginn der Untersuchung werden die Herzschrittmacher auf unipolaren Betrieb und maximale Empfindlichkeit eingestellt. In diesem Zustand wird die Lage des portablen Gerätes bzw. des Handys gesucht, die zur größten Störbeeinflussung führt. Im weiteren Untersuchungsverlauf dienen die Empfindlichkeit des Herzschrittmachers sowie der Abstand zwischen Herzschrittmacher und Handy als weitere Variable. Während der gesamten Untersuchung wird die Funktion des Herzschrittmachers mit einer kontinuierlichen EKG-Aufnahme dokumentiert.

Unter ungünstigsten Bedingungen (höchste Empfindlichkeit, Handy liegt am Brustkorb in ungünstigster Lage) verursachen die 8 W-D-Portablen bei 27 der Herzschrittmachermodelle (46.8 %) eine Störung. In diesem Testzustand lässt sich ein Herzschrittmacher sogar bei einem Abstand von 120 cm durch einen 8 W-Portablen in einen Stöorzustand versetzen. Bei den Tests mit 2 W-D-Handys werden nur 13 Herzschrittmacher (22.4 %) gestört.

Eine typische Empfindlichkeits-Einstellung auf 2.5 mV führt nur bei 19 % der Herzschrittmacher zu einer Störung. Die durchschnittliche maximale Entfernung zwischen dem Herzschrittmacher und dem Handy, die noch eine Störung einleitet, liegt bei unipolaren Herzschrittmachern bei 10.7 cm und bei bipolaren bei 6.5 cm. Aus den Ergebnissen wird eine Empfehlung für Herzschrittmacherpatienten abgeleitet, und zwar, das Handy, wenn überhaupt,

- i) in größtmöglicher Entfernung vom Herzschrittmacher zu tragen und zu benutzen,
- j) die Wahrnehmungsfunktion des Herzschrittmachers auf bipolaren Betrieb schalten und
- k) die Empfindlichkeit möglichst niedrig einstellen zu lassen.

**Wilke et al. (1996)** testen das Verhalten von implantierten Herzschrittmachern unter der Einwirkung von D-Netz- und 2 W-Handys (Ericsson) bei 50 Herzschrittmacher-Patienten. Insgesamt liegen 24 Einkammer- und 21 Zweikammer-Herzschrittmacher vor. Das Alter der Patienten (24 weiblich, 26 männlich) liegt zwischen 48 und 87 Jahren. Unter den Herzschrittmachern befinden sich 27 bipolare und 27 unipolare Systeme, insgesamt 21 unterschiedliche Herzschrittmacher-Modelle von 7 verschiedenen Herstellern. Zusätzlich werden 2 implantierte Defibrillatoren von 2 verschiedenen Firmen getestet. Während der Untersuchung führen die Patienten ein Gespräch mit dem GSM-D-Netz-Handy. Während der gesamten Untersuchung sind die Patienten über die EKG-Aufnahme überwacht. Nur bei 2 von 50 Patienten zeigen sich intermittierende Inhibitionen der Herzschrittmacher während der Manipulation mit dem Handy. Die Defibrillatoren werden durch die Felder der Handys in keiner Phase gestört.

### **Diskussion:**

Alle Untersuchungen zeigen übereinstimmend, dass die implantierten Herzschrittmacher auch durch die 2 W-D-Netz-Handys gestört werden können. Unter experimentellen Bedingungen steigt die Häufigkeit der Störfälle mit der Empfindlichkeit der Herzschrittmacher und mit der Verringerung des Abstandes zwischen dem Herzschrittmacher und dem Handy an. Bei einigen Herzschrittmachern führt die Umschaltung von unipolarem auf

bipolaren Betrieb zur Verringerung der Störanfälligkeit, dies lässt sich jedoch nicht pauschal auf alle Herzschrittmachertypen übertragen. Bei der Einstellung der maximalen Empfindlichkeit der Herzschrittmacher kommen es in 40 % der Fälle zu einer Störung durch das Handy. Dies entspricht der "Worst Case"-Situation, in der Praxis muss für eine normale Funktionalität des Herzschrittmachers eine niedrigere Empfindlichkeit eingestellt werden. Unter praktischen Bedingungen kann bei weniger als ca. 10 % der Herzschrittmacher-Patienten mit einer Störung gerechnet werden, wenn das Handy in der Brusttasche oder in der unmittelbaren Nähe des Herzschrittmacher-Aggregats getragen und benutzt wird.

Inwieweit Herzschrittmacher mit Defibrillatoren durch die Felder der D-Netz-Handys gestört werden können, lässt sich aus den bisher vorgelegten Studien mit der Überprüfung von 2 Handy-Typen nicht abschließend beantworten. Zwar liegen weitere, meist US-Studien vor, denen Untersuchungen mit analogen oder nicht GSM-modulierten Handys zugrunde liegen. Die Ergebnisse dieser Studien sind jedoch nicht auf das europaweite Mobilfunk-System übertragbar.

Wie das Störverhalten vieler Herzschrittmacher-Fabrikate zeigt, ist es heutzutage durchaus möglich, störsichere Herzschrittmacher herzustellen, die unter Alltagsbedingungen durch die 2 W-Handys im D-Netz nicht beeinflusst werden. Bisher wurden Ärzte und Patienten jedoch kaum darüber informiert, dass eine Reihe getesteter und nachweislich störungsarmer Herzschrittmacher bereits angeboten werden. Für einen weiteren Ausbau des GSM-Mobilfunksystems im D-Netz sind derartige Schritte, auch aus juristischer Sicht, dringend angezeigt.



## 11. Literaturverzeichnis

### 11.1 Literaturverzeichnis zu Kap. 3

Brose J., Lindenmeier H., Hopf J. (1994): Feldstärkeverteilung im Kfz-Innenraum, hervorgerufen durch die bordeigene Funktelefonanlage. Kleinheubacher Berichte, Band 37, ISSN 0343-5725

Dimbylow P.J., Mann S.M. (1994): SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. Phys. Med. Biol. 39 (1994), 1537-1553

Ergebnisse "Bundesweite EMVU-Meßaktion 1996/97" (1997). Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post; <http://regtp.de>

Gandhi O.P., Lazzi G., Tinniswood A., Yu Q.S. (1999): Comparison of numerical and experimental methods for determination of SAR and radiation patterns of handheld wireless telephones. Bioelectromagnetics, Suppl. 4, 93-101

Gandhi, O.P., Gu Y.G., Chen J.Y., Bassen H.I. (1992): SAR and induced current distributions in a high-resolution anatomically based model of a human for plane-wave exposure 100-915 MHz. Health Physics, 63, 281-290

Hombach V., Meier K, Burkhardt M., Kühn E., Kuster N. (1996): The dependence of EM energy absorption upon human head modeling at 900 MHz. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 44, No. 10, 1865-1873

Kuster N., Schmid T., Meier K. (1993): Studies of absorption in the extreme near field of transmitters. Proc. VDE Meeting, Mannheim

Stuchly S.S., Stuchly M.A., Kraszewski A., Hartsgrove G.W., Spiegel R.J. (1987): RF Energy Deposition in a Heterogeneous Model of Man: Far-Field Exposures. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-34, No. 12, 951-957

Stuchly S.S., Stuchly M.A., Kraszewski A., Hartsgrove G.W. (1986): Energy Deposition in a Model of Man: Frequency Effects. IEEE Transactions on Biomedical Engineering Vol. BME-33, No. 7, 702-711

Tegenfeld C. (1999): Radiation from popular cellular phones. [www.bemi.se/founder/clips/cellularSAR.html](http://www.bemi.se/founder/clips/cellularSAR.html)

Van Leeuwen G.M.J, Lagendijk J.J.W., van Leersum B.J.A.M., Zwamborn A.P.M., Hornsleth S.N., Kotte A.N.T.J. (1999): Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone. Phys Med Biol 44, No. 10, 2367-2379

Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV - (1997)  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn

Wuschek M. (1999): Hochfrequente elektromagnetische Felder in der Umgebung einer Sendeanlage für VEW- und Mobilfunk. Messprotokolle: erstellt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen

## 11.2 Literaturverzeichnis zu Kap. 4-9

Adey WR, Byus CV, Higgins RJ, Jones RA, Kean CJ et al. (2000): Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumors of the central nervous system in Fischer 344 rats chronically exposed to frequency-modulated microwave fields. *Cancer Res* 60(7):1857-1863

Adey WR, Byus CV, Cain CD, Higgins RJ, Jones RA, Kean CJ, Kuster N, MacMurray A, Stagg RB, Zimmerman G, Phillips JL, Haggren W (1999): Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumours in Fischer 344 rats chronically exposed to 836 MHz modulated microwaves. *Radiat Res*, 152, 293

Adey, WR, Bawin, SM (1982): Binding and Release of Brain Calcium by Low-Level Electromagnetic Fields: A Review. *Radio Sci* 17(5S):149S-157S

Barbaro V; Bartolini P, Donato A, Militello C, Altamura G, Ammirati F, Santini M (1995): Do European GSM Mobile cellular phones pose a potential risk to pacemaker patients? *Pacing Clin Electrophysiol* 1995, 18(6): 1218-1224

Beechey CV, Brooker D, Kowalczyk CI, Saunders RD, Searle AG (1986): Cytogenetic effects of microwave irradiation on male germ cells of the mouse. *Int J Radiat Biol*, 50, 909

Borbély AA, Huber R, Graf T, Fuchs B, Gallamm E, Achermann P (1999): Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neuroscience Letters* 275:207-210

Braune S, Wrocklage C, Raczek J, Gailus T, Lucking CH (1998). Resting blood pressure increase during exposure to a radiofrequency electromagnetic field. *Lancet*, 351, 207

Byus CV, Hawel L (1997): Additional considerations about bioeffects. IN *Mobile Communications Safety* (Balzano Q and Lin JC, Eds.) London, Chapman and Hall, p 133

Cain CD, Thomas DL, Adey WR (1997): Focus information of C3H/10T1/2 cells and exposure to a 836.55 MHz modulated radiofrequency field. *Bioelectromagnetics* 18(3):237-243

Carlo GL, Jenrow RS (2000): Scientific Progress - Wireless Phones and Brain Cancer: Current State of Science. *MedGenMed*, July 31

Chagnaud J-L, Moreau J-M, Veyret B (1999): No effect of short-term exposure to GSM-modulated low-power microwaves on benzo(?)pyrene-induced tumours in rat. *Int J Radiat Biol*, 75(10), 1251

Chou CK, Guy AW, Kunz LL, Johnson RB, Crowley JJ, Krupp JH (1992): Long-term, low-level microwave irradiation of rats. *Bioelectromagnetics*, 13, 469

Chou CK, Yee KC, Guy AW (1985): Auditory response in rats exposed to 2.45 MHz electromagnetic fields in a circularly polarized waveguide. *Bioelectromagnetics*, 6, 323

Ciaravino V, Meltz ML, Erwin DN (1991): Absence of a synergistic effect between moderate-power radiofrequency electromagnetic radiation and adriamycin on cell-cycle progression and sister-chromatid exchange. *Bioelectromagnetics*, 12, 289

Cleary SF, Cao G, Liu LM (1996): Effects of isothermal 2450 MHz microwave radiation on the mammalian cell cycle: comparison with effects of isothermal 27 MHz radiofrequency radiation exposure. *Bioelectrochem Bioenerget*, 39, 167

Cleary SF, Liu LM, Merchant RE (1990): Glioma Proliferation Modulated in Vitro by Isothermal Radiofrequency Radiation Exposure. *Radiation Research* 121, 38-45

- D'Andrea JA, Dewitt JR, Gandhi OP, Stensaas S, Lords JL, Neilson HC (1986a): Behavioural and physiological effects of chronic 2450 MHz microwave irradiation of the rat at 0.5 mW/cm<sup>2</sup>. *Bioelectromagnetics*, 7, 45
- D'Andrea JA, Dewitt JR, Emmerson RY, Bailey C, Stensaas S, Gandhi OP (1986b): Intermittent exposure of rats to 2450 MHz microwaves at 2.5 mW/cm<sup>2</sup>. Behavioural and physiological effects. *Bioelectromagnetics*, 7, 315.
- De Seze R, Ayoub J, Peray P, Miro L, Touitou Y (1999): Evaluation in humans of the effects of radiocellular telephones on the circadian patterns of melatonin secretion, a chronobiological rhythm marker. *J Pineal Res* 27 (4), 237-242
- De Seze R, Fabbro Peray P, Miro L (1998): GSM radiocellular telephones do not disturb the secretion of antepituitary hormones in humans. *Bioelectromagnetics* 19(5):271-278
- Dolk H, Shaddick G, Walls P, Grundy C, Thakrar B, Kleinschmidt I, Elliot P (1997b): Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part I. Sutton Coldfield Transmitter. *Am J Epidemiol* 145:1-9
- Dolk H, Elliot P, Shaddick G, Walls P, Thakrar B (1997a): Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part II. All high-power transmitters. *Am J Epidemiol* 145:10-17
- Dutta SK, Subramoniam A, Ghosh B, Parshad R (1984): Microwave radiation induced calcium ion efflux from human neuroblastoma cells in culture. *Bioelectromagnetics*, 5, 71
- Eulitz C, Ullsperger P, Freude G, Elbert T (1998): Mobile phones modulate response patterns of human brain activity. *NeuroReport* 9 (14):3229-3232
- Foster, MR, Ferri, ES, Hagan GJ (1986): Dosimetric Study of Microwave Carcinogenesis. *Bioelectromagnetics*, 7:129-140
- Frei MR, Berger RE, Dusch SJ, Guel V, Jauchem JR, Merritt JH, Stedham MA (1998a): Chronic exposure of cancer-prone mice to low-level 2450 Mhz radiofrequency radiation. *Bioelectromagnetics* 19 (1):20-31
- Frei MR, Jauchem JR, Dusch SJ, Merritt JH, Berger RE, Stedham MA (1998b): Chronic, low-level (1.0 W/kg) exposure of mice prone to mammary cancer to 2450 MHz microwaves. *Radiat Res*, 150, 568
- Freude G, Ullsperger P, Eggert S, Ruppe I (2000): Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials. *Eur J Appl Physiol* 81:18-27
- Freude G, Ullsperger P, Eggert S, Ruppe I (1998): Effects of microwaves emitted by cellular phones on human slow brain potentials. *Bioelectromagnetics*, 19, 384
- Fritze K, Sommer C, Schmitz B, Mies G, Hossman K-A, Kiessling M, Wiesner C (1997 a): Effect of global system for mobile communication (GSM) microwave exposure on blood-brain permeability in rat. *Acta neuropathol*, 94, 465
- Fritze K, Wiessner CG, Kuster N, Sommer C, Gass P, Hermann DM, Kiessling M, Hossman KA (1997): Effect of global system for mobile communication microwave exposure on the genomic response of the rat brain. *Neuroscience* 81 (3):627-639
- Fritzer G, Friege L, Göder R, Pannier G, Wachter J, Aldenhoff J (2000): Kurz- und Langzeitauswirkung elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf die Qualität des menschlichen Schlafes und der hieraus resultierenden Tagesempfindlichkeit. Studie der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Kiel, Schlafmedizinisches Labor
- Garaj-Vrhovac V (1999): Micronucleous assay and lymphocyte mitotic activity in risk as-

assessment of occupational exposure to microwave radiation. *Chemosphere* 39(13):2301-12

Gehlen W, Spittler JF, Calabrese P, Truong MK, Cohrs U, Heidrich M, Reinhard A (1996): Biologisch-zerebrale Effekte in niederfrequent gepulsten Hochfrequenzfeldern. *Edition Wissenschaft* 12 (3):3-27

Goldman H, Lin JC, Murphy S, Lin Mei F (1984): Cerebrovascular Permeability to  $^{86}\text{Rb}$  in the Rat After Exposure to Pulsed Microwaves. *Bioelectromagnetics* 5 (3):323-330

Goswami PC, Albee LD, Parsian AJ, Baty JD, Moros EG, Pickard WF, Roti Roti JL, Hunt CR (1999): Proto-Oncogene mRNA levels and activities of multiple transcription factors in C3H101/2 murine embryonic fibroblasts exposed to 835.62 and 847.74 MHz cellular phone communication frequency radiation. *Radiat Res*, 151, 300

Guy AW, Kramar PO, Harris CA, Chou CK (1980): Long-term 2450-MHz CW microwave irradiation of rabbits: Methodology and evaluation of ocular and physiologic effects. *J microwave power*, 15, 37

Hansson Mild K, Oftedal G, Sandström M, Wilén J, Tynes T, Haugsdal B, Hauger E (1998): Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones. A Swedish-Norwegian epidemiological study. *Arbetslivsrapport 1998:23*. Solna, Sweden, Arbetslivsinstitutet

Hardell L, Nasman A, Pahlson A, Hallquist A (2000): Case-Control Study on Radiology Work, Medical X-ray Investigations, and Use of Cellular Telephones as Risk Factors for Brain Tumors. *MedGenMed*, May 4, 2000

Hardell L, Nasman A, Pahlson A, Hallquist A, Hansson Mild K (1999): Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: A case-control study. *International Journal of Oncology* 15:113-116

Higashikubo R, Culbreath VO, Spitz DR, LaRegina MC, Pickard WF, Straube WL, Moros EG, Roti Roti JL (1999): Radiofrequency electromagnetic fields have no effect on the in vivo proliferation of the 9L brain tumour. *Radiat Res*, 152, 665

Hocking B(1998): Preliminary report: symptoms associated with mobile phone use. *Occup Med London* 48(6):357-360

Hocking B, Gordon IR, Grain ML, Hatfield GE (1996): Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med J Australia* 165:601-605

Hofgärtner F, Müller Th, Sigel F (1996): Können Mobil-Telefone im C- und D-Netz Herzschrittmacher-Patienten gefährden? *Dtsch Med Wochenschr* 121 (20): 646-652

Imaida K, Hagiwara A, Yoshino H, Tamano S, Sano M, Futakuchi M et al. (2000): Inhibitory effects of low doses of melatonin on induction of preneoplastic liver lesions in a medium-term liver bioassay in F344 rats: Relation to the influence of electromagnetic near field exposure. *Cancer Lett* 155 (1):105-114

Imaida K, Taki M, Yamaguchi T, Ito T, Watanabe S, Wake K, Aimoto A, Kamimura Y, Ito N, Shirai T (1998a): Lack of promoting effects of the electromagnetic near-field used for cellular phones (929.2 MHz) on rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay. *Carcinogenesis*, 19, 311

Imaida K, Taki M, Watanabe S-i, Kamimura Y, Ito T, Yamaguchi T, Ito N, Shirai T (1998b): The 1.5 GHz electromagnetic near-field used for cellular phones does not promote rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay. *Jpn J Cancer Res*, 89, 995

Inskip PD, Tarone RE, Hatch EE, Wilcosky TC, Shapiro WR, Selker RG, Fine HA, Black PM,

Loeffler JS, Linet MS (2001): Cellular-Telephone Use and Brain Tumors. *N Engl J Med* 2001; 344:79-86

Irnich W, Batz L, Müller R, Tobisch R (1996): Electromagnetic interference of pacemakers by mobile phones. *Pacing Clin Electrophysiol* 19 (10):1431-1446

Ivaschuk OI, Jones RA, Ishida-Jones T, Haggren W, Adey WR, Phillips JI (1997): Exposure of nerve growth factor-treated PC-12 rat pheochromocytoma cells to a modulated radiofrequency field at 836.55 MHz: effects on c-jun and c-fos expression. *Bioelectromagnetics*, 18, 223

Johansen C, Boice JD, McLaughlin JK, Olsen JH (2001): Cellular Telephones and Cancer - a Nationwide Cohort Study in Denmark. *Journal of the National Cancer Institute*, Vol. 93, No. 3, February 7, 2001

Kittel A, Siklow L, Thuroczy G, Somosy Z (1996): Qualitative enzyme histochemistry and microanalysis reveal changes in ultra-structural distribution of calcium and calcium-activated ATPases after Microwave irradiation of the medial habenula. *Acta Neuropathol*, 92, 362

von Klitzing L (1995): Low-Frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man. *Physica Medica* XI (2):77-80

Koivisto M, Haarala C, Krause CM, Revonsuo A, Laine M, Hämäläinen H (2001): GSM Phone Signal Does Not Produce Subjective Symptoms. *Bioelectromagnetics* 22:212-215

Koivisto M, Revonsuo A, Krause CM, Haarala C, Sillanmäki L, Laine M, Hämäläinen H (2000): Effects of 902 MHz electromagnetic Field emitted by cellular phones on response times in humans. *NeuroReport*, 11, 413

Krause CM, Sillanmäki L, Koivisto M, Häggqvist A, Saarela C, Revonsuo A, Laine M, Hämäläinen H (2000): Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during memory task. *NeuroReport*, 11, 761

Kues HA, Monahan JC (1992a): Microwave-induced changes in the primate eye. *John Hopkins APL Tech Dig*, 13, 244

Kues HA, Monahan JC, D'Anna SA, McLeod DS, Luty GA, Koslov S (1992b): Increased sensitivity of the non-human primate eye to microwaveradiation following ophthalmic drug pretreatment. *Bioelectromagnetics*, 13, 379

Kues HA, Hirst LW, Luty GA, D'Anna SA, Dunkelberger GR (1985): Effects of 2.45-GHz-microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics*, 6, 177

Kwee S, Raskmark P (1998): Changes in cell proliferation due to environmental non-ionizing radiation 2.Microwave radiation. *Bioelectrochem Bioenerg*, 44, 251

Lai H, Singh NP (1996): Single- and double-strand DNA-breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequencyelectromagnetic radiation. *Int J Radiat Biol*, 69, 513

Lai H, Singh NP (1995): Acute low-intensity microwave exposure increases DNA-single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*, 16, 207

Lai H, Horita A, Guy AW (1994): Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics*, 15, 95

Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW (1992): Single vs. repeated microwave exposure: effects on benzodiazepine receptors in the brain of the rat. *Bioelectromagnetics* 13 (1): 57-66

- Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW (1992): Opioid receptor subtypes that mediate a microwave-induced decrease in central cholinergic activity in the rat. *Bioelectromagnetics* 13 (3):237-246
- Lai H, Carino MA, Wen YF, Horita A, Guy AW (1991): Naltrexone Pretreatment Blocks Microwave induced Changes in Central Cholinergic Receptors. *Bioelectromagnetics* 12 (1):27-33
- Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW (1989): Low-Level Microwave Irradiation and Central Cholinergic Activity: A Dose-Response Study. *Bioelectromagnetics* 10 (2): 203- 208
- Lai H, Horita A, Chou CK, Guy AW (1987): Low-level microwave irradiations affect central cholinergic activity in the rat. *J Neurochem* 48 (1):40-45
- Lin JC, Lin MF (1982): Microwave Hyperthermia-Induced Blood-Brain Barrier Alterations. *Radiat Res* 89 (1):77-87
- Litovitz TA, Krause D, Penafiel M, Elson EC, Mullins JM (1993): The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics*, 14, 395
- Lu S-H, Mathur SP, Stuck B, Zwick H, D'Andrea JM, Merritt JH, Luty G, McLeod DS, Johnson M (2000): Effects of high peak power microwaves on the retina of the rhesus monkey. *Bioelectromagnetics*, 21, 1
- Maes A, Collier M, Van Gorp U, Vandoninck S, Verschaeve L (1997): Cytogenetic effects of 935.2-MHz (GSM) microwaves alone and in combination with mitomycin. *Mutat Res* 393 (1-2):151-156
- Maes A, Collier M, Slaets D, Verschaeve L (1996): 954 MHz microwaves enhance the mutagenic properties of mitomycin C. *Eviron Mol Mutagen*, 28, 26
- Maes A, Collier M, Slaets D, Verschaeve L (1995): Cytogenetic effects of microwaves from mobile communication frequencies (954 MHz). *Electro-Magnetobiology*, 14, 91
- Maes A, Verschaeve L, Arroyo A, De Wagter C, Vercruyssen L (1993): In vitro cytogenetic effects of 2450 MHz waves on human peripheral blood lymphocytes. *Bioelectromagnetics*, 14, 495
- Malyapa RS, Ahern EW, Bi C, Straube WL, LaRegina M, Pickard WF, Roti Roti JL (1998): DNA damage in rat brain cells after in vivo exposure to 2450 MHz electromagnetic radiation and various methods of euthanasia. *Radiat Res*, 149, 637
- Manikowska-Czerska E, Czerski P, Leach WM (1985): Effects of 2.45 GHz microwaves on meiotic chromosomes of male CBA/CAY mice. *J Hered*, 76, 71
- Mann K, Wagner P, Brunn G, Hassan F, Hiemke C, Roeschke J (1998): Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on the neuroendocrine system. *Neuroendocrinology* 67 (2):139-144
- Mann K, Roeschke J (1996): Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. *Neuropsychobiology* 33 (1):41-47
- Merritt JH, Shelton WW, Chamness AF (1982): Attempts to alter  $ca-45^{21}$  binding to brain tissue with pulse-modulated microwave energy. *Bioelectromagnetics*, 3, 457
- Merritt JH, Chamness AF, Allen SJ (1978): Studies on blood-brain barrier permeability after microwave-radiation. *Radiat Environ Biophys* 15 (4):367-77
- Mickley GA, Cobb BL, Mason PA, Farrell S (1994): Disruption of a putative working memory task and selective expression of brain c-fos following microwave-induced hyperther-

nia. *Physiol Behav.*, 55, 1029

Millar DB, Christopher JP, Hunter J, Yeandle SS (1984): The effect of exposure of acetylcholinesterase to 2450 MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*, 5, 165

Mitchell CL, McRee DI, Peterson J, Tilson HA (1988): Some behavioral effects of short-term exposure of rats to 2.45 GHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*, 9, 259

Morrissey JJ, Raney S, Heasley E, Rathinavelu P, Dauphnee M, Fallon JH (1999): Iridium exposure increases c-fos expression in the mouse brain only at levels which likely result in tissue heating. *Neuroscience*, 92, 1539

Neubauer C, Phelan AM, Kues HA, Lange DG (1990): Microwave Irradiation of Rats at 2.45 GHz Activates Pinocytotic-Like Uptake of Tracer by Capillary Endothelial Cells of Cerebral Cortex. *Bioelectromagnetics* 11 (4):261-268

Nowak B, Rosocha S, Zellerhoff C, Liebrich A, Himmrich E, Voigtlander T, Meyer J (1996): Is there a risk for interaction between mobile phones and single lead VDD pacemakers? *Pacing Clin Electrophysiol* 19 (10):1447-1450

Oscar KJ, Gruenau SP, Folker MT, Rapoport SI (1981): Local cerebral blood flow after microwave exposure. *Brain Res* 204 (1):220-225

Oscar KJ, Hawkins TD (1977): Microwave alteration of the blood-brain Barrier System of rats. *Brain Res* 126 (2): 281-293

Penafiel LM, Litovitz T, Krause D, Desta A, Mullins JM (1997): Role of modulation on the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity in L929 cells. *Bioelectromagnetics*, 13, 131

Phillips JL, Ivaschuk O, Ishida-Jones T, Jones RA, Campbell-Beachler M, Haggren W (1999): DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 45(1):103-110

Preece AW, Iwi G, Davies-Smith A, Wesnes K, Butlers S, Lim E, Varey A (1999): Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man. *Int J Radiat Biol* 75 (4): 447-456

Reiser H, Dimpfel W, Schober F (1995): The influence of electromagnetic fields on human brain activity. *Eur J Med Res* 1(1):27-32

Repacholi MH, Basten A, Gebiski V, Noonan D, Finnie J, Harris AW (1997): Lymphomas in Eμ-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* 147 (5):631-640

Roschke J, Mann K (1997): No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram. *Bioelectromagnetics*, 18, 172

Rothman KJ, Loughlin JE, Funch DP, Dreyer NA (1996): Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology* 7 (3):303-305

Salford LG, Brun A, Stureson K, Eberhardt JL, Persson BR (1994): Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz. *Microsc Res Tech* 27 (6):535-542

Salford LG, Brun A, Eberhardt JL, Persson BR (1993): Experimental studies of brain tumour development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectrochem Bioener* 30:293-302

Sanders AP, Joines WT, Allis JW (1985): Effects of Continuous-Wave, Pulsed, and Sinu-

soidal-Amplitude-Modulated Microwaves on Brain Energy Metabolism. *Bioelectromagnetics* 6 (1):89-97

Santini R, Honsi M, Deschaux P, Pacheco H (1988): B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. *Bioelectromagnetics*, 9, 105

Sarkar S, Ali S, Behari J (1994): Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. *Mutat Res*, 320, 141

Seaman, RL, Lebovitz, RM (1987): Auditory unit responses to single-pulse and twin-pulse microwave stimuli. *Hearing Research*, 26:105-116

Shelton WW Jr, Merritt JH (1981): In vitro study of microwave effects on calcium efflux in rat brain tissue. *Bioelectromagnetics*, 2, 161

Stagg RB, Thomas WJ, Jones RA, Adey WR (1997): DNA synthesis and cell proliferation in C6 glioma and primary glial cells exposed to a 836.55 MHz modulated radiofrequency field. *Bioelectromagnetics*, 18, 230

Toler JC, Shelton WW, Frei MR, Merritt JH, Stedham MA (1997): Long-term, low-level exposure of mice prone to mammary tumours to 435 MHz radiofrequency radiation. *Radiat Res*, 148, 227

Vijayalaxmi DZ, Frei MR, Dusch SJ, Guel V, Meltz ML, Jauschem JR (1997a): Frequency of micronuclei in the peripheral blood and bone marrow of cancer-prone mice chronically exposed to 2450-MHz radiofrequency radiation. *Radiat.Res*, 147, 495

Wagner P, Roeschke J, Mann K, Hiller W, Frank C (1998): Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: a polysomnographic study using standardized conditions. *Bioelectromagnetics* 19 (3):199-202

Ward TR, Ali JS (1985): Blood-Brain Barrier Permeation in the Rat During Exposure to Low-Power 1.7-GHz Microwaves Radiation. *Bioelectromagnetics* 6 (2):131-143

Wilke A, Grimm W, Funck R, Maisch B (1996): Influence of D-net (European GSM-Standard) cellular phones on pacemaker function in 50 patients with permanent pacemakers. *Pacing Clin Electrophysiol* 19(10):1456-1458

Wu RY, Chiang H, Shao BJ, Li NG, Fu YD (1994): Effects of 2.45 GHz microwave radiation and phorbol ester 12-O-tetradecanoylphorbol-13-acetate on dimethylhydrazine-induced colon cancer in mice. *Bioelectromagnetics*, 15, 531