

Gutachten zum Erkenntnisstand zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks

Autoren:

Dipl.-Ing. Antje Benischke

Dr. rer. nat. Dirk Bunke

Dipl.-Phys. Christian Küppers

Dr. rer. nat. Christine Wassilew-Reul

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	3
3. Bewertungsmaßstäbe für die Auswahl und Bewertung wissenschaftlicher Arbeiten	5
3.1 Frequenzen, Modulierungen und Raten spezifisch absorbierter Energie des Mobilfunks	5
3.2 Bewertungsmaßstab zur Auswahl näher zu bewertender wissenschaftlicher Arbeiten	8
3.3 Maßstab zur Bewertung der wissenschaftlichen Arbeiten	12
3.4 Vorgehen bei der systematischen Auswertung.....	16
4. Bewertung ausgewählter wissenschaftlicher Untersuchungen	23
4.1 Mögliche gesundheitliche Effekte	23
4.2 Bewertung der ausgewählten wissenschaftlichen Untersuchungen und ihrer Aussagekraft.....	24
4.2.1 Bewertung von Untersuchungen hinsichtlich der Auslösung und Förderung von Krebserkrankungen	24
4.2.1.1 Untersuchungen an zellulären Systemen zur Gentoxizität und zur Transformation.....	26
4.2.1.1.1 Untersuchungen zur Gentoxizität	26
4.2.1.1.2 Untersuchungen zur DNA-Synthese und Zellteilungsaktivität.....	29
4.2.1.1.3 Untersuchungen zur Zelltransformation	31
4.2.1.2 Langzeituntersuchungen zur Krebsentstehung an Tieren	33
4.2.1.3 Epidemiologische Untersuchungen an Mobiltelefone nutzenden Personen	36
4.2.2 Bewertung von Untersuchungen zur Gehirnfunktion.....	37
4.2.3 Bewertung von Untersuchungen zum Schlafverhalten	40
4.2.4 Bewertung von Untersuchungen zu kognitiven Fähigkeiten und zum Lernverhalten.....	43
4.2.5 Bewertung von Untersuchungen zur Blut-Hirn-Schranke.....	52
4.2.6 Bewertung von Untersuchungen zum kardiovaskulären System	56
4.2.7 Bewertung von Untersuchungen zur Kalzium-Homöostase	58
4.2.8 Bewertung von Untersuchungen zur Melatoninproduktionsrate.....	62
4.2.9 Bewertung von Untersuchungen an verschiedenen Enzymen.....	66
4.2.10 Bewertung von Untersuchungen hinsichtlich der Beeinflussung von Fortpflanzung und Entwicklung.....	69

5.	Zusammenfassende Bewertung des aktuellen Kenntnisstands zu gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks.....	70
5.1	Vorbemerkungen zur Dokumentation der Untersuchungen.....	70
5.2	Gesicherte Erkenntnisse über gesundheitliche Auswirkungen	71
5.2.1	Auslösung und Förderung von Krebserkrankungen.....	71
5.2.2	Gehirnfunktion.....	71
5.2.3	Schlafverhalten	71
5.2.4	Kognitive Fähigkeiten und Lernverhalten.....	72
5.2.5	Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke	72
5.2.6	Kardiovaskuläres System.....	72
5.2.7	Kalzium-Homöostase	72
5.2.8	Melatoninproduktionsrate	72
5.2.9	Enzymproduktion	73
5.2.10	Fortpflanzung und Entwicklung	73
5.3	Offene Fragen hinsichtlich gesundheitlicher Auswirkungen.....	73
5.3.1	Auslösung und Förderung von Krebserkrankungen.....	73
5.3.1.1	Gentoxizität und Transformation	73
5.3.1.2	Langzeituntersuchungen zur Krebsentstehung an Tieren	74
5.3.1.3	Epidemiologische Untersuchungen zur Krebsentstehung an Menschen.....	75
5.3.2	Gehirnfunktion.....	76
5.3.3	Schlafverhalten	76
5.3.4	Kognitive Fähigkeiten und Lernverhalten.....	77
5.3.5	Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke	77
5.3.6	Kardiovaskuläres System.....	78
5.3.7	Kalzium-Homöostase	78
5.3.8	Melatoninproduktionsrate	79
5.3.9	Enzymproduktion	79
5.3.10	Fortpflanzung und Entwicklung	80
5.4	Gesamtbewertung	80
6.	Bewertung der Grenzwerte der 26. BImSchV und verschiedener empfohlener Grenz- und Vorsorgewerte	83
6.1	Bandbreite verschiedener Empfehlungen von Grenzwerten und Vorsorgewerten	83
6.2	Mögliche Forderungen hinsichtlich der Festlegung von Grenzwerten ...	85
6.3	Bewertung der in Deutschland bestehenden Grenzwertfestlegungen für den Bereich des Mobilfunks.....	86
6.3.1	Festlegung von Vorsorgewerten.....	86
6.3.2	Aufnahme eines Minimierungsgebots in die 26. BImSchV.....	89
6.3.3	Anwendung der Grenzwerte auch auf Mobiltelefone	91

6.3.4	Berücksichtigung des zunehmenden Ausmaßes der Exposition.....	91
6.3.5	Zusätzlicher Schutz besonders sensibler Personen	91
7.	Zusammenfassung	93
	Literaturverzeichnis	95

1. Einleitung

Mögliche gesundheitliche Auswirkungen von elektromagnetischen Feldern nehmen in der öffentlichen Diskussion unter dem Schlagwort „Elektrosmog“ einen zunehmenden Stellenwert ein. Die öffentlichen Diskussionen konzentrierten sich lange auf Felder niedriger Frequenz, wie sie durch Hochspannungsleitungen oder elektrische Geräte im Haushalt (in Deutschland 50 Hz) hervorgerufen werden. Durch die zunehmende Verbreitung des Mobilfunks sind aber auch weit höhere Frequenzen für einen größeren Teil der Bevölkerung relevant geworden, nämlich Frequenzen bis hin zum GHz-Bereich. Neben der Nutzung von Mobiltelefonen wird von vielen Personen der Bevölkerung auch das Wohnen in der Nähe eines Mobilfunksenders als Risiko angesehen, so dass in vielen Fällen auch gerichtliche Auseinandersetzungen um deren Betrieb erfolgen.

Auch in der wissenschaftlichen Forschung wird der nichtionisierenden Strahlung heute große Bedeutung beigemessen. Während sich international bis vor einigen Jahren vor allem diejenigen Gremien mit dieser Strahlung befassten, die im Hinblick auf die ionisierende Strahlung gegründet worden waren, gibt es mittlerweile eigenständige Gremien für die Bewertung nichtionisierender Strahlung, international beispielsweise die International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP).

Es gibt Grenzwerte für die Bestrahlung durch elektromagnetische Felder, die in Deutschland in der 26. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz festgelegt sind. Der Anwendungsbereich dieser Verordnung umfasst aber, bezogen auf den Mobilfunk, nur die Sendeanlagen, nicht dagegen das einzelne Mobiltelefon. Elektrische und magnetische Feldstärke werden durch die Verordnung so begrenzt, dass eine Rate der spezifisch absorbierten Energie von 0,08 W/kg für den Ganzkörper nicht überschritten werden soll. Mit der Grenzwertfestlegung sollen vor allem thermische Effekte ausgeschlossen werden. Neben thermischen Effekten sind aber auch die verschiedensten Arten nichtthermischer Effekte möglich, auch bezeichnet als athermische Effekte. Die öffentlichen Auseinandersetzungen über Risiken durch den Mobilfunk basieren im wesentlichen darauf, dass athermische Effekte vermutet werden.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen von elektromagnetischen Feldern, auch im athermischen Bereich, sind unterschiedlich je nach Art des Feldes und Frequenzbereich. Eine generelle Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus einer bestimmten Art von Feld bzw. Strahlung auf alle Bereiche des Elektrosmogs ist wissenschaftlich nicht begründbar. Auch auf diese Weise besteht in der Öffentlichkeit eine erhebliche Verunsicherung.

Das Öko-Institut e.V. wurde von der DeTeMobil Deutsche Telekom MobilNet GmbH (T-Mobil) mit einem Gutachten beauftragt, das sich mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen hinsichtlich gesundheitlicher Auswirkungen des Mobilfunks befassen soll. Dieses Gutachten wird hiermit vorgelegt.

Das Gutachten ist in sieben Kapitel gegliedert.

In Kapitel 2 werden die Grundzüge der Aufgabenstellung des Gutachtens dargelegt. Dies ist erforderlich, da der Auftrag einen bestimmten Untersuchungsrahmen vorgibt, der zum Verständnis der Vorgehensweise bekannt sein muss.

In Kapitel 3 werden die Bewertungsmaßstäbe dargelegt, mit denen näher zu bewertende wissenschaftliche Arbeiten ausgewählt wurden, und mit denen die ausgewählten Arbeiten bewertet wurden.

In Kapitel 4 erfolgt die Bewertung wissenschaftlicher Arbeiten zu Auswirkungen elektromagnetischer Strahlung. Das Kapitel ist nach verschiedenen Effekten gegliedert, um diese Effekte jeweils im Zusammenhang zu diskutieren.

In Kapitel 5 erfolgt eine zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstands auf der Basis der Ergebnisse des Kapitels 4. Dabei wird zwischen gesicherten Erkenntnissen und offenen Fragen unterschieden.

Eine Bewertung der Grenzwerte der 26. BImSchV und von Empfehlungen zur Grenzwertsetzung erfolgt, auf der Grundlage der Ergebnisse der Kapitel 4 und 5, in Kapitel 6.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse des Gutachtens zusammengefasst.

2. Aufgabenstellung

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist auftragsgemäß eine Literaturrecherche im Hinblick auf vorliegende wissenschaftliche Erkenntnisse zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen elektromagnetischer Felder des Mobilfunks. Diese Literaturrecherche soll sich auf Laboruntersuchungen, Tierversuche und epidemiologische Untersuchungen, erstrecken. Auszuwerten war „wissenschaftliche Literatur“, so dass zunächst zu klären ist, was im Rahmen des vorliegenden Gutachtens darunter verstanden wird.

Hinweise auf die Ansprüche, die an wissenschaftliche Literatur zu stellen waren, finden sich in Kapitel 3.1 zu den Bewertungsmaßstäben. Generell kann die „wissenschaftliche Literatur“ im hier angewandten Sinn wie folgt charakterisiert werden: Es handelt sich um Arbeiten, die auf eigenständigen wissenschaftlichen Untersuchungen der Autoren beruhen. Diese Untersuchungen umfassen die Analyse von bestimmten Effekten, die sowohl über Laborversuche (z.B. Zellbestrahlung), Tierversuche als auch epidemiologische Untersuchungen studiert werden können.

Besonders klar wird die hier getroffene Abgrenzung aus der Definition, welche bestimmten Arten von Literatur nicht auszuwerten waren:

- Nicht detailliert auszuwerten und zu bewerten waren Übersichtsarbeiten, in denen ausschließlich Arbeiten anderer Autoren kommentiert werden. Solche Arbeiten wurden zwar im Rahmen des Gutachtens ebenfalls herangezogen, allerdings nicht inhaltlich, sondern sowohl zur Literaturrecherche als auch zur Erhebung des aktuellen Diskussionsstands. Es war auftragsgemäß eine eigenständige Bewertung auf der Grundlage von Originalarbeiten zu entwickeln.
- Als Übersichtsarbeiten, die nicht detailliert auszuwerten und zu bewerten waren, ergeben sich damit insbesondere allgemeine Publikationen, wie sie von verschiedenen Seiten zur Information der Bevölkerung herausgegeben werden (z.B. von Behörden, Umweltverbänden und Verbraucherschutzorganisationen). Auch im Hinblick auf diese Publikationen ist aber festzustellen, dass sie herangezogen wurden, um – insbesondere auch in der öffentlichen Diskussion - relevante Problemfelder zu erfassen, zu denen dann wissenschaftliche Literatur ausgewertet wurde.
- Zu den nicht detailliert auszuwertenden und zu bewertenden Arbeiten sind schließlich Berichte zu zählen, die sich als Berichte Betroffener charakterisieren lassen, und die an sich keinerlei Anspruch stellen, eine wissenschaftliche Arbeit zu sein. Auch für diese Art von Berichten gilt, dass sie zur Kenntnis genommen wurden, auch wenn sie im vorliegenden Gutachten nicht bewertet werden und nicht zitiert sind.

Nach der Literaturrecherche bestand die nächste Teilaufgabe des Auftrags in der Entwicklung von Bewertungsmaßstäben (siehe Kapitel 3). Mit diesen Bewertungsmaßstäben erfolgte zum einen eine Auswahl detailliert auszuwertenden und zu bewertender Arbeiten und zum anderen die Bewertung dieser Arbeiten. Der Grund für den Auswahl-schritt ist darin zu sehen, dass eine Auswertung und Bewertung sämtlicher international vorliegender wissenschaftlicher Literatur im Rahmen dieses Auftrags ausgeschlossen war. Für die Detailbewertung der ausgewählten Arbeiten wurde ein Formblatt erarbeitet. Die Bewertungskriterien dienten letztendlich dem Ziel, eine Aussage zur Belastbarkeit gefundener Ergebnisse zu erhalten. Zu Details sei auf Kapitel 3.2 verwiesen.

Als dritte Teilaufgabe waren die ausgewählten Arbeiten zu bewerten. Die zu den einzelnen Arbeiten ausgefüllten Formblätter sind aufgrund des Umfang im Gutachten nicht beigelegt, sondern wurden dem Auftraggeber separat als Materialienband übergeben. Die wesentlichen Ergebnisse und die Bewertung der detailliert ausgewerteten Arbeiten sind, geordnet nach einzelnen Effekten, in Kapitel 4 sowie zusammenfassend in Kapitel 5 dokumentiert.

Ein weiterer Auftrag wurde dem Öko-Institut e.V. im Oktober 2000 erteilt, aufgrund dessen eine Bewertung der Grenzwerte der 26. BImSchV und von Empfehlungen zur Grenzwertsetzung auf der Grundlage der Bewertung der wissenschaftlichen Arbeiten als zusätzliches Kapitel im vorliegenden Gutachten eingefügt wurde.

3. Bewertungsmaßstäbe für die Auswahl und Bewertung wissenschaftlicher Arbeiten

Ziel des vorliegenden Gutachtens ist die Erarbeitung des aktuellen Kenntnisstands hinsichtlich möglicher gesundheitlicher Auswirkungen des Mobilfunks auf den Menschen. Eigene Untersuchungen experimenteller oder epidemiologischer Art waren nicht vorzunehmen, sondern der Erkenntnisstand war auf der Basis der vorliegenden wissenschaftlichen Publikationen abzuleiten. Große Bedeutung bei der Vorgehensweise haben daher die Bewertungsmaßstäbe, anhand derer wissenschaftliche Publikationen für eine detailliertere Auswertung auszuwählen waren bzw. anhand derer die Ergebnisse der wissenschaftlichen Publikationen bewertet wurden.

Zunächst wird in Kapitel 3.1 dargelegt, welche Frequenzen, Modulierungen und Raten spezifisch absorbiertes Energie (SAR) im Mobilfunk eine Rolle spielen. Dies sind technische Randbedingungen des Mobilfunks, die insofern einen Bewertungsmaßstab umschreiben, als die technischen Randbedingungen von durchgeführten Experimenten an diesen zu messen sind. Der Bewertungsmaßstab zur Auswahl näher zu bewertender Arbeiten wird in Kapitel 3.2 dargestellt und begründet, der Maßstab zur Bewertung der wissenschaftlichen Arbeiten selbst in Kapitel 3.3. In Kapitel 3.4 wird das Vorgehen bei der systematischen Auswertung der ausgewählten Arbeiten dargestellt.

3.1 Frequenzen, Modulierungen und Raten spezifisch absorbiertes Energie des Mobilfunks

Bei der Bewertung der Geeignetheit von wissenschaftlichen Untersuchungen im Hinblick auf ihre Aussagekraft für den Bereich des Mobilfunks ist die Trägerfrequenz und Modulation (Pulsung) ein wichtiger Faktor, da das Auftreten oder Nichtauftreten untersuchter Effekte von diesen spezifischen Bedingungen abhängig sein kann.

Genutzte Träger- und Pulsfrequenzen in Deutschland und Europa sind in Tabelle 3.1-1 zusammengestellt. Die Angaben sind <Seiler 1997> entnommen, ergänzt um Angaben zur Modulation.

Tabelle 3.1-1: Träger- und Pulsfrequenzen bei verschiedenen Mobilfunksystemen

Netz	Trägerfrequenz	Pulsung
Analoges C-Netz	450-455,74 MHz 460-466,74 MHz	Keine Pulsung
Digitales D-Netz (GSM 900)	890-915 MHz 935-960 MHz	217 Hz
Digitales E-Netz (DCS 1800 (manchmal auch GSM 1800))	1710-1785 MHz 1805-1880 MHz	217 Hz
DECT (schnurlose Telefone mit Reichweite 50-300m)	1880-1900 MHz	100 Hz

Zukünftige Entwicklungen in Deutschland gehen in Richtung des Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) mit Frequenzen im Bereich 1980-2010 MHz und 2170-2200 MHz, jeweils gepulst.

In den USA gibt es analoge Netze mit 800 MHz sowie digitale Netze mit 800 und 1900 MHz. In Japan werden für das analoge Netz ebenfalls 800 MHz genutzt, für die digitalen Netze Frequenzen zwischen 800 und 1900 MHz <Seiler 1997>. Es sei darauf hingewiesen, dass Mikrowellenherde mit einer Frequenz von 2450 MHz betrieben werden. Dies ist der Grund, weshalb bei vielen wissenschaftlichen Untersuchungen gerade diese Frequenz generiert wird.

Als Größe, die bei der Wirkung eines elektromagnetischen Felds von Bedeutung ist, wird die Rate der spezifisch absorbierten Energie (SAR) definiert. Für Mobilfunkbedingungen experimentell gefundene SAR für verschiedene Eindringtiefen sind z.B. in <Ruppe 1999> genannt:

- 2,35 W/kg an der Oberfläche,
- 1,42 W/kg in 0,5 cm Eindringtiefe,
- 0,88 W/kg in 1 cm Eindringtiefe,
- 0,4 W/kg in 2 cm Eindringtiefe,
- 0,2 W/kg in 3,5 cm Eindringtiefe (der Abfall der SAR mit der Eindringtiefe erfolgt danach deutlich flacher).

In <Garn 1999> wurde wissenschaftliche Literatur ausgewertet, die eine Bandbreite von 1,15 bis 10,6 W/kg für die SAR ergab, wobei von sehr unterschiedlichen Randbedin-

gungen auszugehen war. Durch eigene Untersuchungen wird in <Garn 1999> eine SAR von 1,2-1,3 W/kg pro Watt Sendeleistung ermittelt.

Die Sendeleistungen wurden im Laufe der technischen Weiterentwicklung von Mobiltelefonen gegenüber früher üblichen Werten reduziert. So werden in <Garvert 1999> die folgenden Leistungen genannt:

- B-Netze (seit 1994 abgeschaltet): 20 W (Basisstation) und 10 W (Mobilstation),
- C-Netz: 25 W (Basisstation) und 12,5 W (Mobilstation),
- D-Netze: 50 W (Basisstation) und 2 W (Mobilstation),
- E-Netze: 6-15 W (Basisstation) und 0,25-1,0 W (Mobilstation).

Beim D- und E-Netz ist voranstehend die maximale Pulsleistung genannt. Eine maximale Pulsleistung von 1 W entspricht dabei einer mittleren Leistung von 0,125 W.

Die Leistung von Mobilfunksendern führt zu SAR, die mit dem Abstand sehr rasch abnehmen. Nach <Bahr 1999> zeigen Messdaten, dass eine Teilkörper-SAR (gemittelt über 10 g) von 0,1 W/kg bereits in Entfernungen von 0,4 bis 1 m von der Sendeantenne unterschritten wird. Daraus ergibt sich, dass für Personen, die nicht aus beruflichen Gründen Arbeiten an sendenden Antennen vornehmen, die wesentliche Expositionsquelle die Nutzung eines eigenen Mobiltelefons darstellt, sofern ein solches regelmäßig verwendet wird.

Zusammenfassend ist daher festzustellen: Typische SAR-Werte für modernere Mobiltelefone sind im Bereich von maximal 1-2 W/kg (an der Kopfoberfläche) zu erwarten. Sie fallen innerhalb weniger cm Gewebe auf etwa ein Zehntel dieser Werte ab.

Die ICNIRP empfiehlt die folgenden Basisgrenzwerte für die SAR:

- berufliche Exposition (100 kHz-10 GHz):
 - 0,4 W/kg für den Ganzkörper (gemittelt über 6 Minuten),
 - 10 W/kg lokal für Kopf und Rumpf (gemittelt über 6 Minuten und 10 g),
 - 20 W/kg lokal für Glieder (gemittelt über 6 Minuten und 10 g),
- nicht berufliche Exposition (100 kHz-10 GHz):
 - 0,08 W/kg für den Ganzkörper (gemittelt über 6 Minuten),
 - 2 W/kg lokal für Kopf und Rumpf (gemittelt über 6 Minuten und 10 g),
 - 4 W/kg lokal für Glieder (gemittelt über 6 Minuten und 10 g) <Matthes 1999>.

3.2 Bewertungsmaßstab zur Auswahl näher zu bewertender wissenschaftlicher Arbeiten

Zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks liegt international eine Vielzahl von Untersuchungen vor, aus denen im Rahmen des vorliegenden Gutachtens Arbeiten für eine detaillierte Auswertung und Bewertung auszuwählen waren.

Wissenschaftliche Arbeiten zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen elektromagnetischer Felder werden durch das Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (FEMU) an der RWTH Aachen gesammelt, katalogisiert sowie in ausgewählten Fällen in knapper Form bewertet. Die FEMU-Datenbank steht über das Internet zur Verfügung, wobei auch – soweit vorhanden – Abstracts der einzelnen Arbeiten abgefragt werden können. Bei der Auswahl der aufgenommenen Arbeiten werden durch die FEMU-Datenbank nur solche Veröffentlichungen berücksichtigt, die einer Qualitätskontrolle, z.B. durch peer review oder durch die Annahmeprozedur bei einer Fachzeitschrift, unterzogen worden sind. Im vorliegenden Gutachten wurde für den Pool primär berücksichtigter Arbeiten gegenüber der FEMU-Datenbank ein etwas weiterer Rahmen festgelegt, der über die Aufnahme ausschließlich von im oben genannten Sinne qualitätsgesicherten Arbeiten hinausgeht. Es wurden zunächst alle Arbeiten berücksichtigt, die der nachfolgend dargestellten Definition einer wissenschaftlichen Arbeit genügen.

Kennzeichen einer hier berücksichtigten „wissenschaftlichen Arbeit zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen“ sind:

- Es handelt sich um eine epidemiologische Untersuchung, bei der gesundheitlichen Effekten am Menschen durch Vergleich eines besonders exponierten Personenkollektivs mit einem Referenzkollektiv nachgegangen wird. Unter einer „epidemiologischen Untersuchung“ ist hier eine Untersuchung zu verstehen, die in der Regel von ausgewiesenen Epidemiologen durchgeführt wird. Im allgemeinen fallen beispielsweise keine Beobachtungen in einzelnen Arztpraxen unter diese Klassifizierung, da in solchen Fällen oft kein geeignetes Vergleichskollektiv existiert.
- Es handelt sich um Laboruntersuchungen (in vivo sowie in vitro). Solche Untersuchungen können nicht von Laien durchgeführt werden, sondern erfolgen durch dazu grundsätzlich qualifizierte Wissenschaftler. Es wird daher davon ausgegangen, dass diese Arbeiten – soweit sie die weiteren nachfolgend genannten Kriterien erfüllen - berücksichtigt werden müssen.
- Der untersuchte Effekt muss in weiterem Sinne als „mögliche gesundheitliche Auswirkung beim Menschen“ gelten können. Durch den Begriff „möglich“ wird

angezeigt, dass ein Übertragungsschritt – beispielsweise bei einer Übertragung von Versuchen an Tieren auf den Menschen oder bei der Übertragung von biologischen Effekten auf gesundheitliche Auswirkungen (siehe auch Kapitel 4.1) – notwendig bleiben kann, ohne dass dieser Schritt durch die Untersuchungen der Arbeit selbst erfolgt. Unter „gesundheitlichen Auswirkungen“ sollen nur solche Effekte verstanden werden, die als mögliche direkte Beeinträchtigung der Gesundheit in Folge der elektromagnetischen Strahlung anzusehen sind. Unter diese Effekte fallen dann beispielsweise keine Unfallrisiken durch Benutzung von Mobiltelefonen im Straßenverkehr – da es sich um eine indirekte Beeinträchtigung handelt – und keine Beeinträchtigungen des Landschaftsbilds durch Mobilfunksendeanlagen.

- Es wird Bezug auf einen Frequenzbereich genommen, der für den Mobilfunk relevant ist, d.h. auf einen Frequenzbereich zwischen etwa 800 und 2000 MHz. Damit soll nicht ausgeschlossen werden, auch Arbeiten im Bereich angrenzender Frequenzen zu berücksichtigen, beispielsweise des C-Netzes oder Mikrowellen. Bei sehr eingeschränkter Anzahl an Arbeiten zu einem bestimmten Effekt, wurden auch Arbeiten im Bereich extrem niedriger Frequenzen herangezogen, wobei die Frequenzfrage bei der Bewertung zu beachten war.
- Die Pulsung spielt bei der Bewertung der ausgewählten Arbeiten eine Rolle, wird aber nicht zur Einschränkung des Kollektivs ausgewerteter Arbeiten herangezogen, da der Einfluss der Pulsung auf die Frage der Auswirkungen bei vielen möglichen Effekten wissenschaftlich nicht als abschließend geklärt gelten kann.

Nach diesem Bewertungsmaßstab sind hier nicht zu berücksichtigende Arbeiten wie folgt charakterisiert:

- Arbeiten, in denen keine originären eigenen Untersuchungen dargestellt werden, sondern Arbeiten anderer Autoren in ihren Ergebnissen verglichen oder bewertet werden.
- Arbeiten, die als Berichte von oder über Betroffene und deren Krankheitsbilder anzusehen sind, und in denen keine Expositions-Wirkungs-Beziehung untersucht wird sowie keine epidemiologische Betrachtung angestellt wird. Hierunter fallen auch Arbeiten, die Krankheitsbilder alleine durch einen Vergleich mit Grenz- oder Richtwerten der Ursache Mobilfunk zuschreiben. Der Grund des Ausschlusses liegt darin, dass sich aus solchen Arbeiten die Frage nach der wissenschaftlicher Absicherung der Möglichkeit oder Unmöglichkeit einer gesundheitlichen Auswirkung nicht beantworten lässt. Da der Umfang auszuwertender Arbeiten im Rahmen des

vorliegenden Gutachtens begrenzt war, musste auf die systematische Einbeziehung solcher Arbeiten verzichtet werden.

- Umgekehrt waren auch solche Arbeiten nicht zu berücksichtigen, die alleine aufgrund der Einhaltung von Grenzwerten ohne weitere Untersuchung gesundheitliche Effekte ausschließen.

Es ist anzumerken, dass auch Arbeiten, die nach dem vorangehend genannten Bewertungsmaßstab bei der Ableitung des aktuellen Erkenntnisstands nicht zu berücksichtigen waren, im Rahmen des vorliegenden Gutachtens teilweise dennoch ausgewertet wurden. Dies geschah insbesondere dann, wenn es dem Überblick über publizierte oder auch noch nicht publizierte Untersuchungen, die dann gegebenenfalls im einzelnen weiter zu betrachten waren, diene. Auch Arbeiten, in denen Krankheitsbilder beschrieben werden, wurden herangezogen, um das Kollektiv möglicher Effekte zu erfassen. Des Weiteren wurden teils auch Literaturzitate in detaillierter ausgewerteten Arbeiten im Rahmen der Bewertung dieser Arbeiten herangezogen, ohne dass dabei die oben genannten Voraussetzungen erfüllt sein mussten.

Aus den anhand des vorangehend dargestellten Bewertungsmaßstabs zusammengestellten Arbeiten waren Arbeiten für eine detaillierte Auswertung und Bewertung auszuwählen. Die Zahl der insgesamt auswertbaren Arbeiten ergab sich im wesentlichen aus dem Umfang der erfolgten Beauftragung.

Die Kriterien für die Auswahl der einzelnen detaillierter auszuwertenden Arbeiten sind die folgenden:

- Es wurde eine Reihe verschiedener möglicher Effekte unterschieden, die alle möglichst durch mehrere ausgewählte Arbeiten beleuchtet werden sollten, soweit möglich auch verschiedener Art (z.B. Zellversuche und Tierversuche). Insofern war bei häufig untersuchten Effekten stärker zu selektieren als unter den Arbeiten zu weniger häufig untersuchten Effekten, insbesondere auch hinsichtlich der berücksichtigten Frequenzen und des Alters von Arbeiten. Als Gruppen von möglichen Effekten in diesem Sinne gelten:
 - Auslösung und Förderung von Krebserkrankungen,
 - Einflüsse auf die Gehirnfunktion,
 - Einflüsse auf das Schlafverhalten,
 - Einflüsse auf kognitive Fähigkeiten und Lernverhalten,
 - Auswirkungen auf die Blut-Hirn-Schranke,

- Einflüsse auf das kardiovaskuläre System,
 - Auswirkungen auf die Kalziumhomöostase,
 - Hemmung der nächtlichen Melatoninproduktionsrate,
 - Veränderungen an Produktionsraten von Enzymen,
 - Beeinflussung von Fortpflanzung und Entwicklung.
- Als zweites Kriterium zur Auswahl der detaillierter ausgewerteten und bewerteten Arbeiten waren qualitative Anforderungen zu stellen, um die detaillierten Auswertungen möglichst auf solche Arbeiten zu begrenzen, die eine relativ hohe Aussagekraft aufweisen. Es musste daher in dieser Phase bereits auf Maßstäbe der inhaltlichen Bewertung der Arbeiten, wie sie in Kapitel 3.3 näher ausgeführt werden, zurückgegriffen werden. Die Auswahl erfolgte unter folgenden Gesichtspunkten:
 - Eine Arbeit ist für die detaillierte Auswertung besonders geeignet, wenn sie relativ umfangreich und nachvollziehbar in Vorgehensweise und Ergebnissen dokumentiert worden ist.
 - Eine Arbeit ist für die detaillierte Auswertung besonders geeignet, wenn sie – zunächst alleine aus Sicht ihrer Autoren – zu einem eindeutigen Ergebnis führt, einen Effekt also eindeutig bejaht oder verneint.
 - Eine Arbeit ist für die detaillierte Auswertung besonders geeignet, wenn sie sich direkt auf Auswirkungen – vor allem gesundheitlicher Art - auf den Menschen bezieht.
 - Eine Arbeit ist für die detaillierte Auswertung besonders geeignet, wenn sie einen in der wissenschaftlichen und öffentlichen Diskussion herausragenden Stellenwert einnimmt (erkennbar an der Häufigkeit der Zitierung, Intensität der Auseinandersetzung mit den Ergebnissen etc.).

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Kriterien nicht als absoluter Maßstab zu sehen sind, sondern sich die jeweilige Anforderungshöhe an der Zahl der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeiten orientieren musste. Es waren nicht alle Arbeiten auszuwählen, die den Anforderungen genügten, sondern eine bestimmte Anzahl, die den Anforderungen am besten entsprach.

Bei mehreren Arbeiten zum gleichen Effekt wurden die jüngsten Arbeiten bei der Auswahl bevorzugt, wenn diese auf die früheren Arbeiten in Versuchsansatz oder Diskussion zurückgriffen. Bei begrenzter Zahl ausgewertete Arbeiten konnte so ein breiterer Stand des Wissens abgedeckt werden.

3.3 Maßstab zur Bewertung der wissenschaftlichen Arbeiten

In Kapitel 3.2 wurde dargelegt, mittels welcher Kriterien die detailliert auszuwertenden Arbeiten ausgewählt wurden. Nachfolgend wird der Maßstab zur Bewertung dieser ausgewählten Arbeiten dargestellt. Die Bewertung der Arbeiten schließt sich an deren systematische Auswertung an, deren Vorgehensweise in Kapitel 3.4 beschrieben wird.

Dokumentation der Arbeit

Grundvoraussetzung für die Möglichkeit der Bewertung einer wissenschaftlichen Arbeit ist die Dokumentation von deren wesentlichen Bestandteilen. Hierzu zählen:

- Dokumentation der Versuchsbedingungen
 - Charakteristika der Felder (Frequenzen, Pulsung, Stärke etc.),
 - Beschreibung des zeitlichen Verlaufs eines Versuchs (Expositionsdauer, Wiederholungsfrequenzen etc.),
 - Beschreibung exponierter Lebewesen oder Zellen bzw. des exponierten Kollektivs,
 - Angaben zur Zahl exponierter Lebewesen, Zellen oder Personen,
 - Angaben zu technischen Randbedingungen (z.B. Standardtests bzw. Abweichungen von solchen).
- Dokumentation der Ergebnisse
 - Die Ergebnisse sollten vollständig dokumentiert sein. Insbesondere sollten nicht nur Ergebnisse von einer Teilmenge an durchgeführten Experimenten dargestellt werden (beispielsweise nur solche mit einer bestimmten Art von Befund).
 - Die Ergebnisse sollten nachvollziehbar dokumentiert sein. Dazu müssen ausreichende Angaben über die Ableitung Ergebnisse vorhanden sein, beispielsweise Angaben zu angewendeten Statistischen Verfahren.

Durchführung der Arbeit

Für die Bewertung einer wissenschaftlichen Arbeit ist die Frage nach deren korrekter und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechender Vorgehensweise von großer Bedeutung. Es kann aber nicht erwartet werden, dass eine lückenlose Kontrolle und Bewertung durch Dritte möglich ist. So wäre offenkundig bei einer fehlerhaften, weil anders als beschrieben durchgeführten Untersuchung, dieses Defizit nicht erkennbar. Im Hinblick auf die im Sinne „so durchgeführt wie in der Publikation dokumentiert“ korrekte Vorgehensweise kann daher keine Überprüfung vorgenommen werden.

Die Bewertung der Durchführung erstreckt sich somit auf die Frage, ob die Durchführung in der dokumentierten Weise als zweckmäßig und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend angesehen werden kann.

- Zweckmäßigkeit der Durchführung

Da das Ziel der ausgewerteten Arbeiten die Untersuchung möglicher Effekte speziell des Mobilfunks ist, sind solche Arbeiten als zweckmäßig in ihrer Durchführung anzusehen, die

- realistischen Expositionsbedingungen des Mobilfunks nahe kommen oder als darauf übertragbar anzusehen sind,
- andere möglicherweise gleichartig wirkende Einflüsse so weit als möglich ausschließen,
- als sensitiv erwartete Bereiche ansprechen,
- tatsächliche gesundheitliche Auswirkungen (in Abgrenzung zu bloßen biologi-

Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Arbeit

Der Grad der Absicherung der Ergebnisse einer Arbeit hängt wesentlich von der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ab. Dabei sind drei Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Reproduzierbarkeit sollte möglichst im Rahmen der Arbeit selbst überprüft werden.
- Hilfsweise kann die Reproduzierbarkeit anhand anderer Untersuchungen (auch an anderen Einrichtungen oder mit leicht variierten Versuchs- oder Expositionsbedingungen) beurteilt werden.
- Nicht nur das Identifizieren eines Effekts sollte reproduzierbar sein, sondern auch das Nicht-Identifizieren. Das bedeutet, dass auch ein nach einmaligem Versuch negatives Ergebnis in der gleichen Weise hinterfragt werden muss wie ein nach einmaligem Versuch positives Ergebnis („positiv“ heißt hier, dass ein Effekt festgestellt wird).

Kompatibilität mit Ergebnissen anderer Arbeiten

Sofern sich Ergebnisse verschiedener Arbeiten widersprechen, ohne dass dies aufgrund der Randbedingungen erklärbar ist (dies wäre dann ein vermeintlicher Widerspruch) oder aufgrund von Defiziten in der Durchführung verstanden werden kann, ist eine abschließende Bewertung ausgeschlossen. Wichtiger Aspekt bei der Bewertung der wissenschaftlichen Arbeiten ist daher die Prüfung, ob es Widersprüche bzw. Analogien verglichen mit den Ergebnissen anderer Arbeiten gibt.

Wird Kompatibilität festgestellt, so wird die Aussagekraft des Ergebnisses gesteigert. Im anderen Fall ist die Ursache zu klären; gelingt dies nicht eindeutig, so ist die Aussagekraft des Ergebnisses stark vermindert.

Diskussion der Ergebnisse innerhalb der Arbeit

Eine Arbeit ist als besonders geeignet für die detailliertere Auswertung anzusehen, wenn sie über eine Beschreibung von Phänomenen hinaus auch Wirkungszusammenhänge und Versuchsergebnisse früherer Arbeiten der gleichen Arbeitsgruppe oder anderer Einrichtungen diskutiert. Als besonders geeignet können Arbeiten gelten,

- in denen nicht nur ein biologischer Effekt dargestellt oder eine phänomenologische Betrachtungsweise gewählt wird, sondern Aussagen über einen biologischen Wirkungs-Mechanismus getroffen werden,

- in denen adverse Effekte definiert und das Potential für einen adversen gesundheitlichen Effekt diskutiert werden, oder systematisch nach neuen adversen Effekten gesucht wird,
- in denen Dosis-Wirkungsbeziehungen aufgestellt werden,
- in denen Fragen der Linearität von Zusammenhängen oder Resonanzphänomenen diskutiert werden,
- in denen Wirkungsendpunkte, deren eineindeutige Festlegbarkeit und vollständige Bekanntheit bzw. Lücken im Wissen diskutiert werden,
- in denen die genetische Variabilität und die genetische Prädisposition diskutiert werden.

Grad der Absicherung der Ergebnisse der Arbeit

Kommt eine Untersuchung zu einem eindeutigen Ergebnis – ein eindeutiges Ergebnis war wichtiges Kriterium bei der Auswahl der detaillierter ausgewerteten Arbeiten – so stellt sich in der Gesamtbewertung die Frage der Absicherung des Ergebnisses. Diese Frage beantwortet sich anhand der bereits dargestellten untergeordneten Kriterien:

- Die Wahl von Randbedingungen, die denen der Einwirkung von Feldern des Mobilfunks möglichst weitgehend entsprechen, andere Störfaktoren aber möglichst weitgehend ausschließen, führt zu relativ abgesicherten Ergebnissen.
- Der Grad der Absicherung wächst mit der statistischen Aussagekraft der Ergebnisse, die wiederum von der Zahl untersuchter Zellen, Tiere oder Menschen abhängt.
- Eine dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Vorgehensweise führt ebenfalls zu relativ abgesicherten Ergebnissen.
- Die Untersuchung einer Reproduzierbarkeit der Ergebnisse dient direkt deren Absicherung. Fehlende Reproduzierbarkeit führt daher zu wenig abgesicherten Ergebnissen.
- Ergeben sich nicht erklärbare Inkompatibilitäten mit anderen Untersuchungsergebnissen, so steht die Absicherung in Frage.

Übertragbarkeit auf den Menschen

Nach der Darstellung der Ergebnisse und der Bewertung der Absicherung dieser Ergebnisse von Einzelarbeiten in Kapitel 4.2 hat es sich bei bestimmten Effekten als notwendig erwiesen, eine zusammenfassende Bewertung anzuschließen. Die Notwendigkeit bestand dann, wenn die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen ein sehr inhomogenes

Bild ergaben. Wichtig war dann die Frage, wie die Übertragbarkeit auf den Menschen zu bewerten ist.

Zur Bewertung wurden die folgenden Kriterien angewandt:

- Die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Tierversuchen auf den Menschen ist im allgemeinen als weitgehend gegeben anzusehen, sofern bestimmte Randbedingungen erfüllt sind:
 - Die Expositionsbedingungen müssen für den Mobilfunk charakteristisch sein.
 - Beim Menschen darf keine deutlich geringere SAR, z.B. in einem bestimmten Organ, unter Bedingungen der Nutzung von Mobiltelefonen resultieren, als in den Versuchen. Ansonsten stellt sich die Frage der ausreichenden Intensität der Exposition zur Erreichung des gleichen Effekts (qualitativ und quantitativ) beim Menschen.
- Ergebnisse von Laborversuchen mit Zellen lassen sich nur bedingt auf den Menschen übertragen. Es ist stets zusätzlich der Frage nachzugehen, welchen gesundheitlichen Effekt eine entsprechende Zellreaktion auf den Menschen haben könnte.

3.4 Vorgehen bei der systematischen Auswertung

Die systematische Auswertung der Einzelarbeiten erfolgte anhand eines Formblatts. Dieses Formblatt umfasste eine deskriptive Auswertung (Teil 1 des Formblatts) und einen bewertenden Teil (Teil 2 des Formblatts).

Unterpunkte des deskriptiven Teils waren:

- Bibliographische Daten, die im wesentlichen Autoren und Fundstelle darstellen.
- Feldparameter, die neben Angaben zu Frequenz, Feldstärke bzw. spezifischer Absorbierter Leistung und Zeitangaben zur Exposition auch die Art der Quelle umfassen.
- Die Ziele der Untersuchung.
- Die untersuchten Objekte mit genauerer Beschreibung charakteristischer Merkmale und der Anzahl. Unterschieden wurde in separaten Blöcken des Formblatts nach Bestrahlung von Menschen, Bestrahlung von Tierkollektiven, Bestrahlung von Präparaten und Bestrahlung von Zellen oder Organen. Die Unterpunkte waren jeweils der Art der Untersuchung angepasst.
- Die Versuchsbedingungen, wobei eine separate Beschreibung des Ablaufs für die Ziel- und Kontrollgruppe vorgenommen wurde.

- Nennung des ausgewerteten Parameters und Beschreibung des Verfahrens zur Bestimmung dieses Parameters.
- Angaben zur statistischen Analyse, die sowohl Versuchszahlen bzw. Zahlen von Individuen als auch die Art der statistischen Analyse umfassten.
- Eine Darstellung der Ergebnisse, unterschieden nach der signifikanten Erkennung oder Nichterkennung von Effekten und gegebenenfalls unterschiedlichen Versuchsbedingungen.

Der bewertende Teil des Formblatts war in folgende Blöcke untergliedert:

- Die Bewertung der Dokumentation der Arbeit hinsichtlich einzelner Aspekte der Versuchsbedingungen, die für die Bewertung der Qualität der Arbeit und ihrer Ergebnisse relevant sind, sowie hinsichtlich der Darstellung der Ergebnisse.
- Die Bewertung der Zweckmäßigkeit der Durchführung, zugeschnitten auf die Aufgabenstellung des vorliegenden Gutachtens, also Effekte von Feldern des Mobilfunks. Hierunter wurden beispielsweise Fragen der Übertragbarkeit auf realistische Expositionen des Mobilfunks, der Ausschluss gleichartig wirkender anderer Einflüsse und der ausreichenden Zahl von Versuchsobjekten subsumiert.
- Breiten Raum nahmen ebenfalls Kriterien ein, die mit der Diskussion der Ergebnisse innerhalb der Arbeit in Zusammenhang stehen und insbesondere Fragen von Wirkungsmechanismen und Endpunkten betrafen.
- Die Bewertung der Einhaltung des Stands von Wissenschaft und Technik bei der Durchführung der Untersuchungen, untergliedert nach verschiedenen Aspekten.
- Die Bewertung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, insbesondere innerhalb der Untersuchung selbst, sowie der Absicherung der Ergebnisse.
- Die Kompatibilität mit anderen Ergebnissen innerhalb der Arbeit und mit früheren eigenen Untersuchungen oder Untersuchungen anderer Personen.
- Die Bewertung der in der Arbeit getroffenen Aussagen hinsichtlich ihrer Belastbarkeit. Besondere Schwachstellen wurden gegebenenfalls festgehalten und gegebenenfalls Möglichkeiten einer weiteren Überprüfung genannt.
- Schließlich eine knappe zusammenfassende Bewertung der Arbeit mit den wesentlichen positiven und negativen Aspekten. Diese diente dann auch zur Darstellung des Ergebnisses in Kapitel 4.2 des vorliegenden Gutachtens.

Das Formblatt ist nachfolgend wiedergegeben.

Abbildung 3.4-1: Formblatt für die Auswertung und –bewertung ausgewählter Arbeiten

<h2>1. Deskriptive Auswertung</h2>	
<h3>1.1 Bibliographische Daten</h3>	
Titel	
Autor	
Publikationstyp	
Zeitschriftentitel	
Band	
Nummer	
Seiten	
Jahr	
<h3>1.2 Feldparameter</h3>	
Feldtyp	
Frequenz (Mindest-)	
Zeitabhängigkeit	
Feldstärke	
Expositionshäufigkeit/-dauer	
Felderzeugende Quelle	
<h3>1.3 Untersuchung</h3>	
<h4>1.3.1 Ziele der Untersuchung</h4>	
Physiologische Effekte	
Pathologische Effekte	
Organe	
Zellen	
Blut-Transport	
<h4>1.3.2 Untersuchte Objekte: <i>In vivo/in situ</i> – Menschen unter Bestrahlung/Kontrolle</h4>	
Geschlecht	
Alter	
Auswahlkriterien	
Anzahl	

1.3.3 Untersuchte Objekte: In vivo/in situ – Tiere unter Bestrahlung/Kontrolle

Tiere	
Art/Stamm/Rasse	
Alter (Mindest-)	
Geschlecht	
Gewicht (Mindest-)	
Andere Auswahlkriterien	
Anzahl	

1.3.4 Untersuchte Objekte: In vivo/in situ – Präparate unter Bestrahlung/Kontrolle

Beschreibung	
Anzahl	

1.3.5 Untersuchte Objekte: In vivo – Zellen/Organe bei Messung

Organe	
Zellen	
Anzahl	

1.3.6 Versuchsbedingungen

Gruppenbezeichnung	
Zielgruppe: Versuchsbedingungen (zeitlicher Verlauf, Randbedingungen für Exposition und Messung/Analyse, Probenaufbereitung, Parallelmessungen, Wiederholungen u.ä.)	
Kontrollgruppe: Versuchsbedingungen (zeitlicher Verlauf, Randbedingungen für Exposition und Messung/Analyse, Probenaufbereitung, Parallelmessungen, Wiederholungen u.ä.)	

1.3.7 Messmethoden: Parameter und Verfahren

Parameter	
Verfahren	

1.3.8 Statistische Analyse

Anzahl der Untersuchungen (Kontrollgruppe)	
Anzahl der Untersuchungen (Zielgruppe)	
Mittelwertbildung	
Standardabweichung	
Statistische Methoden	

1.3.9 Ergebnisse

Keine Effekte beobachtet bei	
Für Feldparameter/Gruppe	
Effekte beobachtet bei	
Für Feldparameter/Gruppe	

2. Bewertung

2.1 Bewertung der Dokumentation der Arbeit

2.1.1 Bewertung der Dokumentation der Versuchsbedingungen

Charakteristika der Felder (Frequenzen, Pulsung, Stärke etc.)	
Beschreibung des zeitlichen Verlaufs eines Versuchs (Expositionsdauer, Wiederholungsfrequenzen etc.)	
Beschreibung exponierter Lebewesen oder Zellen bzw. des exponierten Kollektivs	
Angaben zur Zahl exponierter Lebewesen, Zellen oder Personen	
Angaben zu technischen Randbedingungen (z.B. Testverfahren)	

2.1.2 Bewertung der Dokumentation der Ergebnisse

Ergebnisse vollständig dokumentiert? (nicht nur willkürliche Auswahl)	
Ergebnisse nachvollziehbar dokumentiert?	

2.2 Bewertung der Durchführung der Arbeit

2.2.1 Bewertung der Zweckmäßigkeit der Durchführung

Kommen die Bedingungen den realistischen Expositionsbedingungen des Mobilfunks nahe oder sind sie als darauf übertragbar anzusehen?	
---	--

2.2.2 Bewertung des Umgangs mit Wissenslücken

Wird bei der Art der Untersuchung erwartet, Wirkungen festzustellen?	
Wird der Begriff „adverser Effekt“ definiert? Wird systematisch nach neuen adversen Effekten gesucht? Wie wird definiert, was ein realer Effekt ist?	
Sind möglicherweise gleichartig wirkende Einflüsse so weit als möglich auszuschließen? Sind Wirkungsendpunkte uneindeutig festlegbar? Gelten sie als vollständig bekannt oder unklar?	
Wird eine phänomenologische Betrachtungsweise gewählt?	
Wird eine Aussage über einen biologischen Effekt gemacht? Wie wird die biologische Signifikanz des Effektes bewertet?	
Wird in der Arbeit darauf eingegangen, wie eine Ableitung von einem biologischen Effekt/ Mechanismus auf die zu erwartenden Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (Wirkungsendpunkt) erfolgen kann?	
Werden gesundheitliche Beeinträchtigungen/Auswirkungen beobachtet, abgeleitet oder ausgeschlossen?	
Werden neue Mechanismen identifiziert oder postuliert?	
Werden Dosis-Wirkungsbeziehungen aufgestellt? Wird von linearen Zusammenhängen ausgegangen oder werden Resonanzphänomene betrachtet?	
Wird die Möglichkeit einer genetischen Variabilität und Prädisposition beachtet?	

2.2.3 Bewertung der Einhaltung des Stands von Wissenschaft und Technik bei der Durchführung

bei der technischen Durchführung von Laborversuchen	
bei der Analysetechnik	
bei der Durchführung von Kontrollversuchen bzw. der Auswahl von Vergleichskollektiven	
bei den statistischen Verfahren	

2.3 Bewertung der Reproduzierbarkeit und Absicherung der Ergebnisse der Arbeit

Wurde die Reproduzierbarkeit im Rahmen der Arbeit selbst überprüft?	
Falls nein: Kann die Reproduzierbarkeit anhand anderer Untersuchungen (auch an anderen Einrichtungen oder mit leicht variierten Versuchs- oder Expositionsbedingungen) beurteilt werden?	
Wurde bei Nicht-Identifizieren eines Effekts auch dies auf Reproduzierbarkeit überprüft?	
War im Hinblick auf die in der Regel erforderliche statistische Auswertung der Ergebnisse eine ausreichende Zahl an Versuchsobjekten involviert?	
Sind die Versuchsbedingungen und der Versuchsablauf positiv zu bewerten?	

2.4 Bewertung der Kompatibilität mit Ergebnissen anderer Arbeiten

Gibt es kompatible Arbeiten?	
Gibt es nicht-kompatible Arbeiten, ohne dass dies anhand anderer Randbedingungen erklärbar wäre?	

2.5 Bewertung der Aussagen

Können die gemachten Aussagen als wissenschaftlich belastbare Ergebnisse bewertet werden?	
Welche Schwachstellen lassen sich im Hinblick auf die Belastbarkeit identifizieren?	
Welche zusätzlichen Untersuchungen sollten zur Absicherung der Aussagen erfolgen?	

2.6 Zusammenfassende Bewertung der Arbeit

--

4. Bewertung ausgewählter wissenschaftlicher Untersuchungen

In Kapitel 4 werden die ausgewählten wissenschaftlichen Arbeiten gegliedert nach Effekten bewertet. In Kapitel 4.1 werden zunächst mögliche gesundheitliche Effekte vorgestellt. Dabei wird auch die Problematik des Schlusses von beobachteten biologischen Effekten auf gesundheitliche Auswirkungen diskutiert. Die Bewertung der einzelnen Arbeiten erfolgt in Kapitel 4.2.

4.1 Mögliche gesundheitliche Effekte

Elektromagnetische Strahlung kann biologische Systeme auf sehr unterschiedliche Art und Weise beeinflussen. In der Literatur werden entsprechend unterschiedliche biologische Effekte beschrieben. Diese biologischen Effekte (z.B. Änderungen der Aktivität bestimmter Enzymsysteme wie der Ornithin-Decarboxylase, Änderungen der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke u.a.) werden in den einzelnen Studien als wirkungsbezogene Endpunkte bezeichnet. So nennen Chou et al. in ihrer sorgfältig geplanten und durchgeführten Untersuchung zur Auswirkung langandauernder, niedrigdosierter Bestrahlung von Ratten 155 Einzelparameter, die untersucht wurden und solche Endpunkte darstellen <Chou 1992, Table 1, S. 472>. Diese Einzelparameter sind dort gruppiert worden in fünfzehn Kategorien, u.a. Verhalten, Immunsystem, Blutzusammensetzung, Stoffwechsel, Histopathologie, Urinanalyse.

Bei den biologischen Effekten wird bei einigen Arbeiten diskutiert, inwieweit es sich tatsächlich um einen adversen, d.h. schädigenden Einfluss handelt, und ob bzw. in welchem Umfang die in den Testsystemen gefundenen Effekte auf den Menschen übertragen werden können. Bei der Mehrzahl der Arbeiten wird außerdem versucht, den Zusammenhang zwischen angewandter Strahlung und dem gefundenem biologischen Effekt anhand von Wirkungsmechanismen zu erklären. So wird z.B. in der Studie von Litovitz <Litovitz 1993> versucht, die in experimentellen Arbeiten gefundenen Zusammenhänge zwischen dem Wechsel von Modulationsfrequenzen und Steigerungen der Ornithin-Decarboxylase-Aktivität anhand des Begriffes der Kohärenzzeit zu erklären.

Gefundene biologische Effekte können nicht mit gesundheitlichen Auswirkungen gleichgesetzt werden. Die meisten der ausgewerteten wissenschaftlichen Arbeiten diskutieren aber keine gesundheitlichen Auswirkungen, sondern alleine die Signifikanz gefundener Ergebnisse im Kontext mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen. Es ist in der Tat im allgemeinen auch sehr problematisch, den Schluss von biologischen Effekten

auf gesundheitliche Auswirkungen am Menschen zu ziehen, da Wirkungsmechanismen oft unbekannt sind oder darüber nur Vermutungen bestehen.

Oft widersprechen sich Untersuchungsergebnisse auch, indem von einer Forschergruppe Effekte nachgewiesen werden können, von einer anderen dagegen signifikant kein Effekt gefunden wird. Da die Arbeiten verschiedener Forschergruppen nie unter völlig identischen Randbedingungen erfolgen, lässt sich in solchen Fällen oft schwer entscheiden, worin die Ursache zu sehen ist. Solche sich widersprechenden Ergebnisse können nicht nach Mehrheitsverhältnissen beurteilt werden, indem ein Effekt verneint wird, wenn er überwiegend nicht gefunden wurde, in Einzelfällen aber schon. Es ergibt sich dann, dass offenkundige Unklarheiten bestehen, die als solche zu bewerten sind.

Die Vielzahl der in der Literatur beschriebenen biologischen Effekte wird für die hier vorgelegte Studie folgendermaßen strukturiert:

- Auslösung und Förderung von Krebserkrankungen,
- Einflüsse auf die Gehirnfunktion,
- Einflüsse auf das Schlafverhalten,
- Einflüsse auf kognitive Fähigkeiten und Lernverhalten,
- Auswirkungen auf die Blut-Hirn-Schranke,
- Einflüsse auf das kardiovaskuläre System,
- Auswirkungen auf die Kalziumhomöostase,
- Hemmung der nächtlichen Melatoninproduktionsrate,
- Veränderungen an Produktionsraten von Enzymen,
- Beeinflussung von Fortpflanzung und Entwicklung.

4.2 Bewertung der ausgewählten wissenschaftlichen Untersuchungen und ihrer Aussagekraft

4.2.1 Bewertung von Untersuchungen hinsichtlich der Auslösung und Förderung von Krebserkrankungen

Die Entstehung von Krebs wird heute als mehrstufiges und multifaktorielles Geschehen verstanden. Entsprechend vielfältig sind die möglichen Einwirkungspunkte von krebs-erzeugenden bzw. krebsfördernden Noxen. Die Situation wird auch dadurch komplexer, dass zelluläre Reparatursysteme zur Verfügung stehen, die einmal gesetzte Schädigungen der Erbsubstanz wieder reparieren können.

Normale Körperzellen wandeln sich nach den bisher vorliegenden Erfahrungen nie unvermittelt in maligne (böartige) Zellen um. Sie entwickeln sich zu malignen Zellen in einem mehrstufigen Prozess, der über mehrere Jahre andauern kann. Bei der Krebsentstehung wird entsprechend zwischen den Stufen der Initiation, der Promotion und der Progression unterschieden:

- Als Initiation wird eine Veränderung von Zellen bezeichnet, die durch vollständige oder unvollständige Kanzerogene hervorgerufen wird. Die Initiation ist eine persistente Veränderung einer Zelle, die auf Tochterzellen vererbt werden kann. Initiation ist die Voraussetzung für die Krebsentstehung. Sie geschieht in vielen Fällen durch Veränderungen der Erbinformation. Hierbei kann es sich auf der Ebene der DNA um Mutationen, auf der Ebene der Chromosomen z.B. um Chromosomenaberrationen handeln. Gentoxische Karzinogene sind additiv wirksam. Als weitere Möglichkeit der Initiation wird eine epigenetische Beeinflussung z.B. der Regulationsmuster von Genen diskutiert.
- Tumorpromotion ist definiert als Prozess, der nach vorheriger Initiation die Entstehung eines Tumors verstärkt oder beschleunigt. Erforderlich ist ein längerer Zeitraum der Einwirkung.
- Durch Initiation und Promotion entstehen zunächst gutartige Geschwulste. Ihre Umwandlung in böartig wuchernde Tumore wird als Progression bezeichnet. Böartige Tumoren zeichnen sich durch ein nicht-gehemmtes Zellwachstum und die Fähigkeit zur Metastasenbildung aus (siehe auch <Schulte-Hermann 1994, S. 148f>).

Einzelne chemische Stoffe, ionisierende Strahlung und UV-Strahlung sowie Viren sind Beispiele karzinogen wirkender Noxen. Tumore können auch durch das Zusammenwirken chemischer und physikalischer Faktoren entstehen.

In den Veröffentlichungen zur Frage des Zusammenhangs zwischen elektromagnetischer Strahlung und der Auslösung bzw. Förderung von Krebs sind unterschiedliche Ansätze verfolgt worden. Im Folgenden werden die Einzelarbeiten in mehrere Gruppen eingeteilt:

- Untersuchungen an zellulären Systemen zur Gentoxizität und zur Transformation,
- Langzeituntersuchungen zur Krebsentstehung an Tieren,
- epidemiologische Untersuchungen bei der Benutzung von Mobiltelefonen.

4.2.1.1 Untersuchungen an zellulären Systemen zur Gentoxizität und zur Transformation

4.2.1.1.1 Untersuchungen zur Gentoxizität

Bei der Einwirkung gentoxischer Noxen auf Zellen oder Organismen können unterschiedliche Schäden entstehen:

- Genmutationen sind lichtmikroskopisch nicht sichtbare Veränderungen der DNA (Basenveränderungen, Deletionen oder Insertionen).
- Chromosomenmutationen sind lichtmikroskopisch sichtbare, strukturelle Veränderungen (Aberrationen) der Chromosomen (Stückverluste, Verdopplungen, Verdrehungen, Verschiebungen).
- Genommutationen betreffen einzelne Chromosomen und führen zu Veränderungen des Chromosomensatzes.

Als Hinweis auf gentoxische Wirkungen dienen auch Effekte an der DNA, die einer Mutation vorausgehen oder sie begleiten können. Hierzu zählen:

- Induzierte DNA-Einzelstrang- oder Doppelstrangbrüche.
- Der Schwesterchromatidenaustausch, der auftritt, wenn geschädigte Chromosomen repariert und repliziert werden.
- Ein vermehrtes Auftreten von Mikrokernen in Zellen, die durch die Einwirkung von Noxen entstehen, die entweder Chromosomen direkt brechen (klastogene Wirkung) oder den Spindelapparat in seiner Funktion stören <Fahrig 1994>.

Mögliche Zusammenhänge zwischen der Exposition mit elektromagnetischer Strahlung und den oben genannten gentoxischen Wirkungen sind in vielen Arbeiten experimentell untersucht worden. Im Folgenden wird auf die Untersuchungen eingegangen, in denen mit den Parametern

- DNA-Einzelstrang- und -doppelstrangbrüche,
- Chromosomenaberrationen,
- Schwesterchromatidaustausch und
- Mikrokernbildung

gearbeitet wurde. Die vorliegenden Arbeiten zur Beeinflussung der Genexpression durch elektromagnetische Strahlung (<Ivaschuk 1997>, <Goswami 1999> u.a.) sind erst kürzlich zusammenfassend an anderer Stelle dargestellt worden (<IEPGMP 2000>).

Die Arbeitsgruppe von Lai publizierte 1995 Untersuchungen zu DNA-Einzelstrangbrüchen bei Ratten, die einmalig für zwei Stunden gepulster und nicht-gepulster elekt-

romagnetischer Strahlung von 2.450 MHz ausgesetzt wurden. Die SAR betrug bei diesen Experimenten 0,6 W/kg und 1,2 W/kg. Gehirnzellen der Tiere wurden unmittelbar und vier Stunden nach der Exposition auf DNA-Einzelstrangbrüche hin untersucht <Lai 1995>.

Es fand sich in <Lai 1995> ein statistisch signifikanter, dosisabhängiger Anstieg der DNA-Schäden.

In einer Folgearbeit untersuchte dieselbe Arbeitsgruppe DNA-Einzel- und -Doppelstrangbrüche in Gehirnzellen von Ratten nach Bestrahlung mit elektromagnetischer Strahlung von 2.450 MHz (gepulst mit 500 Hz bzw. un gepulst, SAR: 1,2 W/kg).

Sowohl gepulste als auch un gepulste Strahlung führte zu signifikant erhöhtem Auftreten von DNA-Einzelstrang- und -Doppelstrangbrüchen <Lai 1996b>.

Die Arbeitsgruppe von Malyapa publizierte 1997 in zwei Artikeln Ergebnisse zur Untersuchung der eventuellen DNA-Schädigung von Fibroblasten- und Glioblastomazellen durch elektromagnetische Strahlung von

- 835,62 MHz, FMCW-moduliert,
- 847,74 MHz, CDMA-moduliert und
- 2.450 MHz,

jeweils mit einer SAR von 0,6 W/kg, 0,7 W/kg und 1,9 W/kg. Die DNA-Schädigung wurde im alkalischen Kometenassay (nach Olive) bestimmt.

Es wurden keine Unterschiede in der Häufigkeit der DNA-Schäden zwischen exponierten Zellen und Kontrollen gefunden <Malyapa 1997a, Malyapa 1997b>.

Phillips und seine Arbeitsgruppe untersuchten den Einfluss von iDen-modulierten Feldern (813,56 MHz) und TDMA-modulierten Feldern (836,55 MHz) auf lymphoblastoide Zellen bei unterschiedlichen Feldstärken und Expositionszeiten.

Abhängig von den beiden letztgenannten Parametern und von dem Pulstyp wurden sowohl Rückgänge als auch Zunahmen bei den DNA-Schädigungen gefunden, die statistisch signifikant waren <Phillips 1998>.

Garaj-Vrhvac und seine Arbeitsgruppe berichteten 1999 über Mikronukleuszahlen und mitotische Aktivität in peripheren Lymphozyten bei Arbeitern an Radiostationen.

Sie fanden eine Zunahme der Zahl der Mikronuklei. Bei der Mitose-Aktivität fiel die starke Streuung der Verteilung der Zellen über die einzelnen Mitosestadien auf <Garaj-Vrhvac 1999>. Eine Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wäre wünschenswert.

Balode publizierte 1996 Ergebnisse zum Einfluss der elektromagnetischen Strahlung von Radiosendern auf die DNA von Rindern, die in der Nähe der Sendestation gehalten wurden. Der Mikronukleus-Test wurde mit Erythrozyten dieser Tiere durchgeführt.

Die Erythrozyten der exponierten Tiere zeigten eine höhere Zahl an Mikronuklei. Sowohl in der exponierten Gruppe als auch in der Kontrollgruppe war die durchschnittliche Häufigkeit des Auftretens von Mikronuklei gering <Balode 1996>.

Die Arbeitsgruppe von Maes publizierte mehrfach zur Thematik der DNA-Schädigung durch elektromagnetische Strahlung. Sie untersuchte Lymphozyten aus Blutproben von Spendern, die für 30-120 Minuten mit einem elektromagnetischen Feld von 2.450 MHz, gepulst mit 50 Hz, bestrahlt wurden.

Bei der Zellkinetik und dem Schwesterchromatidaustausch fanden sich keine Unterschiede zur Kontrollgruppe. Die bestrahlten Lymphozyten zeigten eine signifikante Zunahme der Chromosomenaberrationen und der Mikronukleuszahlen <Maes 1993>.

In einer Folgearbeit untersuchten Maes et al. <Maes 1995> Blutproben von Arbeitern, die mit der Wartung einer Basisstation betraut waren. Außerdem wurden in vitro Blutproben für zwei Stunden der 945 MHz-GSM-Strahlung der Station ausgesetzt.

Es wurde bei den bestrahlten Blutproben eine Zunahme der DNA-Schädigungen gefunden. Bei den Blutproben der exponierten Arbeiter wurden die folgenden Effekte festgestellt:

- eine Abnahme der Gaps und Isogaps,
- eine Zunahme der Chromatidenbrüche,
- eine Zunahme der azentrischen Fragmente, und
- eine Zunahme der Chromosomenbrüche.

Die Aussagen der Studie sind aufgrund unklarer Kontrollen und fehlender Statistik aber nur bedingt belastbar <Maes 1995>.

1997 publizierte die Arbeitsgruppe von Maes Untersuchungen zur DNA-Schädigung durch elektromagnetische Strahlung von 935,2 MHz <Maes 1997>. Es wurden an Blutproben drei unterschiedliche zytogenetische Endpunkte untersucht:

- Chromosomen-Aberration,
- Schwesterchromatidaustausch, und
- DNA-Einzelstrangbrüche.

Beim Test auf Schwesterchromatidaustausch wurde außerdem der Einfluss von Mitomycin C untersucht.

Chromosomenaberrations-Test und DNA-Einzelstrangbruchanalyse zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede. Im Schwesterchromatidaustausch-Test zeigten sich bei den Blutproben von drei von vier Spendern bei Strahlenexposition statistisch signifikant leicht erhöhte Zahlen <Maes 1997>.

Die Vielzahl der experimentellen Arbeiten, die zur Frage gentoxischer Schädigungen elektromagnetischer Strahlen durchgeführt wurde, ergibt insgesamt kein einheitliches Bild. Sowohl bei den durchgeführten Untersuchungen zu DNA-Einzel- und Doppelstrangbrüchen, als auch zu Chromosomenaberrationen, Schwesterchromatidaustausch und Mikronukleusbildung stehen Arbeiten, in denen ein Zusammenhang zwischen Erhöhungen der Raten und elektromagnetischer Strahlung gefunden wurde, neben Veröffentlichungen, die ebenfalls wissenschaftlich belastbar keine Zusammenhänge gezeigt haben (siehe z.B. die Publikationen <Lai 1995, Lai 1996b bzw. Malyapa 1997a, Malyapa 1997b>). Auf der Basis des derzeitigen Kenntnisstands kann lediglich festgestellt werden, dass es durch Strahlungen im mobilfunkrelevanten Frequenz- und Feldstärkebereich in einzelnen Testsystemen zu Schädigungen der DNA kommt, in anderen Testsystemen nicht.

4.2.1.1.2 Untersuchungen zur DNA-Synthese und Zellteilungsaktivität

Hinweise auf den Übergang von einer normalen Zelle zu einer transformierten, bösartigen Zelle können sich aus dem Auftreten veränderter DNA-Syntheseraten und aus Änderungen in der Zellteilungsaktivität ergeben. Beide Parameter sind in einer Reihe von Arbeiten mit elektromagnetischer Strahlung aus dem Mobiltelefon-Frequenzbereich untersucht worden. Diese Untersuchungen zu Änderungen physiologischer Parameter werden ergänzt durch Studien zur Aktivität des Enzyms Ornithin-Decarboxylase (ODC). Zellen, die sich im Prozess der Tumorentstehung befinden, weisen eine erhöhte ODC-Aktivität auf, kurz bevor sie aus dem Normalzustand in den Zustand der unge-

hemmten Vermehrung übergehen. Die Steigerung der enzymatischen Aktivität dieses Enzyms wird daher als Hinweis auf eine tumorpromovierende Wirkung einer Noxe gewertet und experimentell überprüft.

Stagg et al. untersuchten den Einfluss TDMA-modulierter 836,55 MHz-Strahlung unterschiedlicher Feldstärken auf die Zellvermehrung und die DNA-Synthese von zwei Zelllinien (primäre und transformierte Gliazellen von Ratten) <Stagg 1997>.

Für alle Feldstärken fanden sich keine Effekte auf die Zellvermehrung. Eine spezifische Absorptionsrate von 5,9 mW/kg führte zu einer statistisch signifikanten, 20-40%igen Zunahme der DNA-Synthese. Weder niedrigere noch höhere Feldstärken zeigten diesen Effekt <Stagg 1997>.

Die Arbeitsgruppe von Kwee und Raskmark berichtete über Auswirkungen von GSM-gepulster 960 MHz-Strahlung auf die Zellteilungsrate von transformierten menschlichen Amnion-Epithelzellen <Kwee 1998>. Die spezifischen Absorptionsraten betragen 0,021 mW/kg, 0,21 mW/kg und 2,1 mW/kg.

Die exponierten Zellen zeigten bei allen drei spezifischen Absorptionsraten einen Rückgang des Zellwachstums, der lediglich bei 0,21 mW/kg keinen linearen Zusammenhang mit der Bestrahlungszeit erkennen ließ <Kwee 1998>.

Litovitz und seine Arbeitsgruppe untersuchten den Einfluss der sogenannten „Kohärenzzeit“ auf die biologische Wirksamkeit elektromagnetischer Strahlung <Litovitz 1993>. Mäusefibroblasten wurden elektromagnetischer Strahlung von 915 MHz ausgesetzt, die mit 55, 60 und 65 Hz moduliert war. Die Modulationsfrequenz wurde in unterschiedlich langen Zeiträumen konstant gehalten und dann gewechselt (jeweils von 55 auf 65 Hz). Als Kohärenzzeit wurde hierbei das Zeitintervall bezeichnet, innerhalb dessen die Frequenz, die Phase und die Amplitude des Feldes konstant waren. Die SAR bei diesen Experimenten betrug 2,5 W/kg.

Kohärenzzeiten von 5 Sekunden und mehr führten zu einer Erhöhung der Ornithin-Decarboxylase-Aktivität, ab 10 Sekunden zu einer Verdoppelung <Litovitz 1993>.

Byus und seine Arbeitsgruppe bestrahlten drei Zelllinien mit elektromagnetischer Strahlung von 450 MHz, 16 Hz amplituden-moduliert <Byus 1998>. Die Feldstärke betrug 1,0 mW/cm². Die Arbeitsgruppe untersuchte die Ornithin-Decarboxylase(ODC)-

Aktivität und die DNA-Synthese. Eingesetzt wurden Reuber H35-Hepatomzellen, Ovarialzellen von Hamstern und menschliche 294T-Melanomzellen.

Bei der DNA-Synthese wurden keine Effekte durch Bestrahlung gefunden. Die Bestrahlung führte zu einer etwa 50%igen Steigerung der ODC-Aktivität in allen drei Zelllinien <Byus 1998>.

Bei den Untersuchungen zur DNA-Synthese und zur Zellteilungsaktivität belegen die Arbeiten von Stagg et al. <Stagg 1997> und Kwee et al. <Kwee 1998>, dass es zu Beeinflussungen (bei Gliazellen von Ratten und bei menschlichen Amnion-Epithelzellen) kommt, die in anderen Testsystemen (z.B. Hefe, <Gos 1997>) nicht gefunden wurden. Einige Publikationen zur Ornithin-Decarboxylase zeigen, dass durch elektromagnetische Strahlungen im für den Mobilfunk typischen Frequenzbereich die Enzymaktivitäten ansteigen. Dies kann als Hinweis auf eine tumorpromovierende Wirkung in den eingesetzten Testsystemen gewertet werden. Eine promovierende Wirkung zeigte sich auch in Studien, in denen zusätzlich zur elektromagnetischen Strahlung mit Tumorinitiatoren wie Benzo-a-pyren gearbeitet wurde.

4.2.1.1.3 Untersuchungen zur Zelltransformation

In mehreren Arbeiten ist direkt untersucht worden, ob bei Exposition mit elektromagnetischer Strahlung ein erhöhtes Auftreten transformierter Zellen beobachtet werden kann. Hierbei ist in Einzelfällen mit besonderen Initiations-Promotions-Modellsystemen gearbeitet worden.

Die Arbeitsgruppe von Balcer-Kubiczek berichtete über Untersuchungen zur Wirkung eines gepulsten 2.450 MHz-Feldes auf die Überlebens- und die Transformationsrate von Mäusefibroblasten, die mit dem Tumorinitiator Benzo-a-pyren behandelt wurden <Balcer-Kubiczek 1985>. Zusätzlich wurden Bestrahlungen mit Röntgenstrahlen vorgenommen sowie Behandlungen mit TPA (Tetradecanoylphorbolacetat). TPA fördert Tumorstilnwachstum ohne selber zytotoxisch oder tumorinitiiierend zu sein.

Ohne zusätzliche Behandlung mit TPA wurden keine Effekte gefunden. Bei Behandlung mit TPA führt die EMF-Exposition zu einer statistisch signifikanten, 3,5-fachen Zunahme der Transformationshäufigkeit. 2.450 MHz-Strahlung induzierte im Experiment latente Transformationschäden, vergleichbar mit den Ergebnissen für Röntgenstrahlung <Balcer-Kubiczek 1985>.

Balcer-Kubiczek et al. untersuchten in einer späteren Arbeit ebenfalls eine eventuelle promovierende Wirkung von elektromagnetischer Strahlung von 2.450 MHz (Pulsung 120 Hz) <Balcer-Kubiczek 1991>. Aktiv wachsende Zellkulturen wurden über 24 Stunden elektromagnetischen Feldern von unterschiedlicher Feldstärke und paralleler oder nachgeschalteter Röntgenstrahlung ausgesetzt. Die Werte der SAR betragen 0,1 W/kg, 1 W/kg und 4,4 W/kg. Es wurde mit und ohne Promoter-Behandlung durch Zugabe von TPA gearbeitet.

In der Untersuchung führte die gleichzeitige Anwendung von elektromagnetischen Feldern und TPA zu signifikanten Erhöhungen der Rate der neoplastischen Zelltransformation. Erhöhungen fanden sich im SAR-Bereich von 0,1 bis 4,4 W/kg. Die hohen Feldstärken entsprachen in ihren Effekten Röntgenstrahlung von 1,5 Gy <Balcer-Kubiczek 1991>.

In der Arbeit von Cain et al. wurde ein interessanter Co-Kulturansatz als Initiations-Promotionsmodell vorgestellt <Cain 1997>. Nicht genetisch veränderte Fibroblasten unterdrückten in diesem System das Wachstum mutierter Fibroblasten. Durch Zugabe von TPA als Promotor konnten die mutierten Zellen diese Hemmung überwinden und Kolonien bilden. In der Studie wurde untersucht, ob elektromagnetische Strahlung von 836,55 MHz (TDMA-Modulation) ähnlich wie TPA als Promotor wirkt und auch zur Koloniebildung führt.

Bei der Zahl, der Dichte und der Fläche der Kolonien wurden keine Unterschiede zwischen exponierten und scheinexponierten Zellen gefunden <Cain 1997>.

Die hier vorgestellten experimentellen Untersuchungen an zellulären Systemen zur Genotoxizität und zur Zelltransformation durch elektromagnetische Strahlung ergeben in ihrer Gesamtheit ein sehr vielschichtiges Bild. Bei den spezifischen Absorptionsraten, die zur Anwendung kamen, wird in den meisten Fällen auch der für Mobilfunk-Anwendungen mögliche Bereich abgedeckt (Größenordnung 1 – 2 W/kg für ein Mobilfunkgerät mit 0,25 W Sendeleistung). Die im Einzelfall gewählten experimentellen Ansätze sind hinsichtlich eingesetzter Organismen, Frequenz- und Feldstärkebereichen sehr unterschiedlich. Dies kann zum Teil erklären, dass in einigen Untersuchungen belastbare Befunde einer genotoxischen Wirkung gefunden wurden, in anderen Untersuchungen dagegen nicht (siehe hierzu auch Kap. 5.2).

4.2.1.2 Langzeituntersuchungen zur Krebsentstehung an Tieren

In unterschiedlichen Ansätzen ist die eventuelle krebserzeugende oder promovierende Wirkung elektromagnetischer Strahlung in Langzeitversuchen mit Tieren untersucht worden. Die im folgenden aufgeführten Arbeiten unterscheiden sich nicht nur im gewählten Frequenzbereich, sondern auch in den eingesetzten Tierstämmen und in der Größe der Untersuchungsgruppen.

Szmigielski und seine Arbeitsgruppe berichteten 1982 über den Einfluss von elektromagnetischer Strahlung auf die Entwicklung von Hautkrebs bei Mäusen <Szmigielski 1982>. Es wurden Experimente mit zwei verschiedenen Mäusestämmen durchgeführt. Bei C₃H/HeA-Mäusen treten spontan häufig Brusttumoren auf. Als zweiter Mäusestamm wurden BALB/c-Mäuse eingesetzt. Bei ihnen tritt bei Behandlung mit 3,4-Benzopyren (BP) in hohem Umfang Hautkrebs auf. Insgesamt wurden 280 Tiere exponiert und 160 Tiere dienten als Kontrollen. Die Feldstärke in den Experimenten betrug 5 und 15 mW/cm².

Es wurde in verschiedenen Versuchsgruppen eine beschleunigte Tumorentwicklung gefunden:

- EMF-exponierte C₃H/HeA-Mäuse entwickelten schneller Tumoren als die Kontrollen.
- BALB/c-Mäuse entwickelten bei Bestrahlung rascher Hauttumoren unter BP-Induktion.
- Vergleichbare Beschleunigungen fanden sich bei Mäusen, die parallel mit BP und EMF exponiert waren.
- Die Widerstandskraft gegen Tumorneubildung sank bei EMF-exponierten Mäusen.

Mäuse, die chronischem Stress ausgesetzt waren, zeigten ähnliche Effekte wie EMF-belastete Mäuse <Szmigielski 1982>.

Die Arbeitsgruppe von Santini publizierte 1988 Untersuchungen zur Entwicklung von Hautkrebs bei C57 BL/6J-Mäusen <Santini 1988>. Den Mäusen wurden B16-Melanomzellen implantiert. Die Bestrahlung wurde mit 2.450 MHz mit und ohne Pulsung vorgenommen. Der Wert der SAR betrug 1,2 mW/kg.

Es wurden keine Unterschiede bei der Tumorentwicklung gefunden, die Tierzahl in den Einzelgruppen war mit 15 Tieren allerdings auch klein.

In einer sehr gut durchgeführten Studie untersuchte die Arbeitsgruppe von Chou 1992 den Einfluss gepulster elektromagnetischer Strahlung von 2.450 MHz auf die Gesamtheit der Organsysteme von Ratten <Chou 1992>. Es wurden 155 Parameter erfasst.

Es wurden keine Auswirkungen auf das Immunsystem, die Vitalität und das Verhalten gefunden. Bei der exponierten Gruppe traten aber statistisch signifikant um 4-fach häufiger spontane Tumoren auf. Sie hatten keine Auswirkung auf die Lebensdauer der Tiere <Chou 1992>.

In einer Studie der Arbeitsgruppe von Salford wurden Glioma-Krebszellen in Ratten implantiert und untersucht, ob die Bestrahlung der Tiere mit 915 MHz die Tumorentwicklung beeinflusst <Salford 1993>. Es wurden unterschiedliche Puls-Bedingungen untersucht.

Bei allen Tieren entwickelten sich Tumore. Es wurden aber keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen bestrahlten Tieren und Kontrollen gefunden. Durch die Bildung vieler Gruppen war allerdings die Tierzahl pro Gruppe zu klein geworden, um seltene Effekte statistisch signifikant nachweisen zu können <Salford 1993>.

Die Arbeitsgruppe von Wu untersuchte den Einfluss nicht-gepulster EM-Strahlung von 2.450 MHz auf die Entstehung von Dickdarmkrebs bei Mäusen, die parallel mit dem Tumorigen Dimethylhydrazin behandelt wurden. Der Wert der SAR betrug bei diesen Experimenten 10–12 W/kg.

Die bestrahlten Tiere wiesen keine erhöhten Tumorzahlen auf. Die Anwendung von TPA führte zu dem erwarteten Anstieg der Tumorzahlen <Wu 1994>.

Die Arbeitsgruppe von Repacholi berichtete über den Einfluss elektromagnetischer Strahlung (GSM-moduliert, 900 MHz) auf die Tumorentwicklung bei E μ -Pimtransgenen Mäusen (pp G 64) <Repacholi 1997>. Dieser Mäusestamm zeigt aufgrund eines aktivierten Onkogens eine stark erhöhte Tendenz zur Ausbildung bösartiger Lymphomtumoren. Es erfolgte eine 18-monatige Exposition bei einer SAR von 0,13–1,4 W/kg. Die Versuchsgruppe und die Kontrollgruppe umfassten jeweils 100 Tiere.

Es wurde ein statistisch signifikantes, 2,4-fach erhöhtes Risiko gefunden, Lymphome zu entwickeln <Repacholi 1997>.

Die Arbeitsgruppe von Toler publizierte Ergebnisse einer Langzeitstudie mit virusinfizierten C₃H/HeJ-Mäusen <Toler 1997>. Es wurde ein EM-Feld von 435 MHz einge-

setzt. Der Wert der SAR betrug 0,32 W/kg. Die maximale Bestrahlungsdauer betrug 21 Monate. Die Versuchsgruppe umfasste 200 Tiere, die Kontrollgruppe ebenfalls 200 Tiere.

Weder bei den Gewebeneubildungen noch bei der Überlebenszeit der Mäuse gab es statistisch signifikante Unterschiede zwischen der exponierten Gruppe und der Kontrollgruppe <Toler 1997>.

Die Arbeitsgruppe von Frei untersuchte, ob durch die Bestrahlung mit elektromagnetischer Strahlung von 2.450 MHz bei Mäusen mit hoher Spontantumorraten für Brustkrebs (C₃H/HeJ-Mäuse) gehäuft Tumore auftraten. Es wurden zwei spezifische Absorptionsraten untersucht (0,3 und 1,0 W/kg). Die Tiere wurden 18 Monate bestrahlt.

Es fanden sich keine erhöhten Brusttumorraten <Frei 1998a, Frei 1998b>.

Adey et al. untersuchten das Auftreten von spontanen und von N-Ethyl-N-Nitrosoharnstoff-induzierten Gehirntumoren bei Ratten, die mit elektromagnetischer Strahlung von 836 MHz, bei SAR von 1,0 bis 1,6 W/kg, bestrahlt wurden. N-Ethyl-N-Nitrosoharnstoff induziert transplacentale Tumoren im Zentralnervensystem. Es wurden schwangere Ratten und ihre Nachkommen bestrahlt und untersucht. Die Untersuchung umfasste 120 Tiere in zwei Zielgruppen und 120 Tiere in zwei Kontrollgruppen.

Bei den für Fischer 344-Ratten typischen, endogenen Tumoren wurde keine Zunahme in bestrahlten Tieren gefunden <Adey 1999>.

In der Gesamtheit betrachtet, ergeben die vorliegenden Langzeituntersuchungen an Tieren zur Krebsentstehung kein einheitliches Bild. Dies kann im Einzelfall auf die Unterschiedlichkeit der eingesetzten Tierstämme, der Versuchsbedingungen, speziell aber auch auf die Gruppengröße zurückzuführen sein. Festzuhalten bleibt, dass es sowohl bei experimentell prädisponierten Tierstämmen als auch bei nicht genetisch beeinflussten Tierstämmen neben Arbeiten, in denen keine Effekte gefunden wurden, einzelne experimentelle Untersuchungen gibt, in denen gehäuft Tumoren auftraten.

In den vorgestellten Untersuchungen wurden Frequenz- und Feldstärkebereiche eingesetzt, die für den Mobilfunkbereich relevant sind (siehe hierzu auch Kap.5.2, offene Fragen).

4.2.1.3 Epidemiologische Untersuchungen an Mobiltelefone nutzenden Personen

Epidemiologische Untersuchungen ermöglichen es, Muster im Auftreten von Krankheiten zu erkennen. Diese Muster können mit möglichen Ursachen in Verbindung gebracht und die Zusammenhänge quantifiziert werden. Epidemiologische Studien können zwar keine Kausalzusammenhänge beweisen – sie können aber Hinweise auf mögliche Kausalzusammenhänge geben, die dann durch experimentelle Ansätze überprüft werden müssen.

Bei epidemiologischen Studien zur Thematik Mobilfunknutzung und Krankheitshäufigkeiten gibt es eine Reihe grundsätzlicher Schwierigkeiten. Zum einen ist die Bevölkerung heute aufgrund des häufigen und steigenden Einsatzes elektrischer Geräte überall nieder- und hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung unterschiedlicher Herkunft ausgesetzt. Dies erschwert es zum einen, die genaue Exposition des Untersuchungskollektivs quantitativ zu erfassen und einzelne Belastungssegmente spezifisch der Nutzung von Mobilfunkgeräten zuzuordnen. Zum anderen ist es praktisch nicht mehr möglich, ein unbelastetes Vergleichskollektiv zu finden.

Hinzu kommt, dass sich Krebserkrankungen in vielen Fällen mit einer Latenzzeit von einem oder mehreren Jahrzehnten manifestieren. Hier sind entsprechend lange Untersuchungszeiträume erforderlich, in denen aber zum einen keine konstanten Expositionsbedingungen vorlagen. Zum anderen gibt es eine flächendeckende Anwendung von Mobiltelefonen noch nicht über Jahrzehnte.

Zu beachten ist außerdem, dass zur Erfassung eines geringen, zusätzlichen Risikos von Gesundheitsschäden durch elektromagnetische Strahlung eine extrem große Personen-Gruppe untersucht werden muss (siehe hierzu auch <Flesch-Janys 1989>).

Es gibt derzeit nur wenige epidemiologische Studien, in denen ein möglicher Zusammenhang zwischen der Benutzung von Mobiltelefonen und der Entstehung von Krebs untersucht wurde. Die in ihnen gefundenen Ergebnisse besitzen lediglich Hinweisscha-
rakter.

Hardell et al. untersuchten in einer retrospektiven epidemiologischen Studie, ob bei Patienten mit Gehirntumoren aus Schweden ein Zusammenhang zwischen Mobiltelefonnutzung und dem Auftreten von Gehirntumoren gefunden werden konnte <Hardell 1999a>. Es wurden in dieser Untersuchung Tumor-Induktionsperioden von mindestens 1, 5 und 10 Jahren angenommen.

Beim GSM-System fanden sich keine Hinweise. Bei NMT-Modulation wurde eine Zunahme des Risikos für Gehirntumore im temporalen und occipitalen Bereich gefunden, die aber nicht statistisch signifikant war <Hardell 1999a>.

Hardell et al. publizierten außerdem eine Einzelfallstudie <Hardell 1999b>. Es handelt sich hier um die Beschreibung einer Patientin, bei der ein bösartiger Gefäßtumor (Angiosarkom) im Schädeldeckbereich gefunden wurde. Die Frau benutzte seit 10 Jahren ein schnurloses Telefon und zusätzlich seit 5 Jahren ein Mobiltelefon.

Es konnte nicht ausgeschlossen werden, dass andere Ursachen als die Telefonnutzung die Entstehung des Angiosarkoms bewirkt haben <Hardell 1999b>.

Rothmann et al. berichten von einer epidemiologischen Kohortenstudie <Rothmann 1996>. Für ein Jahr wurden die Todeszahlen für mehr als 250.000 Personen ermittelt sowie alters- und geschlechtsspezifisch analysiert.

Die Sterblichkeitsraten von Personen, die Mobiltelefone nutzten und Personen, die tragbare Telefone nutzten, waren nicht signifikant verschieden. Bedauerlicherweise konnte bei sehr vielen Personen der genutzte Telefontyp nicht geklärt werden <Rothmann 1996>.

Die bisher durchgeführten epidemiologischen Studien besitzen lediglich Vorstudien-Charakter und erlauben keine abschließenden Aussagen über eventuelle gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen. Die vorgelegten Arbeiten lassen lediglich den Schluss zu, dass es keine Hinweise auf massive Gesundheitsschäden gibt.

4.2.2 Bewertung von Untersuchungen zur Gehirnfunktion

Die Funktion des menschlichen Gehirns kann mit Hilfe eines Elektroenzephalogramms (EEG) – der Analyse des zeitlichen Ablaufes von Hirnstromänderungen - untersucht werden. Die EEG-Ableitung ist in der Neurophysiologie wie in der klinischen Neurologie für die Untersuchung von Funktionsstörungen des Gehirns als Standardmethode eingeführt. Das EEG selbst besteht in dem von den Nervenzellen des Gehirns ausgehenden, von der Kopfoberfläche ableitbaren elektrischen Wechselfeld.

Das lebende Gehirn zeigt im EEG eine fortlaufende rhythmische Eigentätigkeit. Je nach Frequenz und Größe der beobachteten Potentialschwankungen unterscheidet man Alpha-, Beta-, Delta- und Thetawellen.

- Alphawellen treten im inaktiven Wachzustand, bei Ruhe und Entspannung auf. Dieser Zustand wird als Vigilanz bezeichnet. Alphawellen haben eine Frequenz zwischen ca. 7,5 und 12,5 Hz
- Betawellen treten im Frequenzbereich von ca. 12,5 bis 30 Hz auf. Ganz allgemein lässt sich beobachten, dass eine Erhöhung des Erregungsniveaus im Gehirn mit einer Zunahme der Frequenz und einer Abnahme der Amplitude des EEGs verbunden ist.
- Beim Übergang vom Wachzustand zum Schlaf sinkt die Frequenz der EEG-Wellen in den Theta- und Deltabereich ab. Die Deltawellen haben eine Frequenz von ca. 0,5 bis 3,5 Hz, die Thetawellen von ca. 3,5 bis 7,5 Hz. Die Amplitude nimmt mit abnehmender Frequenz zu.

Reiser et al. <Reiser 1995> untersuchten die zeitliche Veränderung der Gehirnaktivität (EEG) durch die Benutzung eines mobilen Telefons mit einem elektromagnetischen Feld der Frequenz 902 MHz, einer Modulationsfrequenz von 217 Hz und einer maximalen Ausgangsleistung von 8 W (D1-Mobiltelefon 324). Die EEG wurden über die Gruppe der 36 Probanden gemittelt. Die Probanden wurden dem elektromagnetischen Feld für eine Dauer von 15 Minuten ausgesetzt.

Es wurde ein Anstieg der gemittelten EEG Aktivität in den Frequenzbändern alpha2, beta1 und beta2 nach etwa 15 Minuten nach der Exposition gefunden.

Röschke et al. <Röschke 1995> untersuchten die EEGs von 30 Probanden, die dem Feld eines digitalen Mobiltelefons (900 MHz, 271 Hz Pulsung) für eine Dauer von 3,5 Minuten ausgesetzt wurden.

Die Autoren fanden keinen Unterschied in der Spektraldichte bei Probanden die einem Feld ausgesetzt waren, im Vergleich zu Probanden, die keinem Feld ausgesetzt waren. Die Autoren wiesen aber darauf hin, dass dieser Aussage nur unter bestimmten Einschränkungen gültig ist. So würden mögliche Veränderungen der Gehirnfunktion nur teilweise durch ein EEG reflektiert werden. Die Studie wurde mit gesunden jungen Freiwilligen durchgeführt, während für ältere Menschen oder für Menschen mit einer geistigen Behinderung nach <Röschke 1995> die Untersuchungen zu anderen Ergebnissen kommen können. Darum wäre es der Meinung der Autoren nach notwendig, die Untersuchungen auch auf andere Personengruppen auszudehnen.

Im Rahmen der Arbeit <von Klitzing 1995> wird der Einfluss niederfrequent gepulster elektromagnetischer Felder auf das menschliche EEG untersucht. Dabei wurden Fre-

quenzen von 150 MHz mit einer Pulsung von 217 Hz verwendet. Die 17 Probanden wurden dreimal einer 15 Minuten andauernden Exposition ausgesetzt.

Die Arbeit fand in einem schmalen Frequenzband um ca. 10 Hz einen Resonanzeffekt im EEG, die in <von Klitzing 1995> als eine Aktivierung oder Generierung eines EEG-Signals im Gehirn durch das äußere Feld interpretiert wird, als eine Interferenz zwischen der externen periodischen Anregung und einem biologischen „Zeitgeber“. Von Klitzing stellte die Hypothese auf, dass interzelluläre Kommunikationspfade, die auf Aktivitäten an der Membran basieren, durch Magnetfelder gestört werden, die mit konstanten Sequenzen von niedrigen Frequenzen gepulst werden.

Die Arbeit <von Klitzing 1995> ist sehr kurz gehalten, so dass einige für die Beurteilung der Arbeit notwendigen Parameter nicht dokumentiert wurden. Da es sich bei dieser Arbeit um eine der Arbeiten handelt, bei der ein biologischer Effekt durch ein externes Feld gefunden wurde, wäre eine ausführliche Dokumentation sowohl des Versuchsablaufes wie auch der Auswertung von großer Bedeutung für die Diskussion. Dies wäre eine Grundvoraussetzung, um die Reproduzierbarkeit des gefundenen Effektes durch andere Forschungsgruppen überprüfen zu können.

In <Gehlen 1996> wurde der Einfluss eines elektromagnetischen Wechselfeldes auf die Funktion des menschlichen Gehirns untersucht. Das Feld wurde von einem Mobiltelefon - D-Netz-Mobile-Station von Motorola – erzeugt, mit einer Frequenz von 914,2 MHz und einer Ausgangsleistung von 8 Watt.

Die Autoren machten die Aussage, dass die Mittelwerte der nach Frequenzbändern getrennt berechneten mittleren Leistungen in einer multivarianten Varianzanalyse keine statistisch signifikanten Unterschiede zeigten. Die Autoren gingen davon aus, dass keine biologisch relevanten Einflüsse eines von einem Mobiltelefon erzeugten elektromagnetischen Felds auf das Elektroenzephalogramm des Menschen zu erfassen sind.

Aus den hier untersuchten Arbeiten zur Gehirnfunktion lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die gefundenen Ergebnisse lassen sich nicht zu einem einheitlichen Bild zusammenfügen. Einige Arbeitsgruppen finden Effekte, andere Arbeitsgruppen dagegen nicht.
- Die Untersuchungen wurden nur an gesunden Erwachsenen durchgeführt. Eine Aussage über andere Personengruppen kann aufgrund der bislang durchgeführten Untersuchungen nicht belastbar abgeleitet werden.

4.2.3 Bewertung von Untersuchungen zum Schlafverhalten

Der Schlaf dient dem Menschen als Ausgleich zum Wachsein. Schlaf wird als ein komplexer biologischer Prozess beschrieben, der von zentralen Nervensystem gesteuert wird. Man unterscheidet zwischen dem orthodoxen Schlaf (Non-REM-Schlaf) und dem paradoxen oder REM-Schlaf. Aus dem Wachzustand gleitet man zunächst in den orthodoxen Schlaf, der in unterschiedliche Stadien bis hin zum Tiefschlaf untergliedert ist. Nach der ersten Tiefschlafphase wechseln sich über die Nacht hinweg orthodoxer Schlaf und REM-Schlaf mehrmals ab.

Der Mensch benötigt einen gesunden Schlaf, um Stoffwechsel- und Immunfunktionen aufrecht zu erhalten und Informationen Gehirn richtig zu verarbeiten. Insbesondere dem REM-Schlaf wird eine wichtige Rolle bei der Verknüpfung und Verarbeitung neuer Erfahrungen im Gehirn zugemessen. Veränderungen des REM-Schlafes kann zu Störungen der Gedächtnisfunktion und von Lernprozessen führen.

Die Schlafqualität lässt sich mit Elektroenzephalographie (EEG), Elektrookulographie (EOG), Elektromyographie (EMG) und anderen Techniken differenzieren. Die wichtigste Charakterisierung liefert dabei das Elektroenzephalogramm. Während die Funktion der unterschiedliche Frequenzbänder des EEG im Wachzustand noch wenig verstanden sind, sind die unterschiedlichen EEG-Frequenzmuster während des Schlafes gut charakterisiert. Diese Muster zeigen bei gesunden Menschen einen typischen Verlauf und werden zur Unterscheidung der unterschiedlichen Schlafphasen herangezogen, die in der Nacht durchlaufen werden. Veränderungen des Schlafs lassen sich also im Schlaf-EEG erkennen und charakterisieren.

Der Einfluss elektromagnetischer Felder auf den menschlichen Schlaf wurde bislang in drei wichtigen Studien untersucht. Dabei zeigten sich (wie auch bei Untersuchungen des Wach-EEG) sehr unterschiedliche Ergebnisse.

Eine der ersten Studien zum Zusammenhang zwischen gepulsten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern des digitalen Mobilfunks und des menschlichen Schlafes wurden von Mann und Röschke 1996 <Mann 1996> an der Universität in Mainz durchgeführt. In einem Schlaflabor wurden 14 Versuchspersonen einer mit 217 Hz gepulsten 900 MHz Mobilfunkstrahlung ausgesetzt. Die maximale Sendeleistung des handelsüblichen Mobiltelefons betrug 8 W, die durchschnittliche Leistungsdichte in 40 cm Abstand wurde mit ca. 0,5 W/m² angegeben. Von drei aufeinanderfolgenden Nächten wurde die erste als Adaptionnacht genutzt und in den darauffolgenden unter Exposition bzw. Scheinexposition Polysomnographieaufzeichnungen (u.a. EEG) durchgeführt. Außerdem wurde nach der zweiten und dritten Nacht die subjektiv empfundene Schlafqualität und

das Wohlbefinden der Versuchspersonen durch Fragebögen ermittelt. Das Mobiltelefon war in ca. 40 cm Entfernung in Kopfhöhe angebracht und in der Expositionsnacht 8 Stunden in Dauerbetrieb. Über die spezifische Absorptionsrate wurden keine Angaben gemacht.

Es wurde eine verkürzte Einschlafzeit, eine signifikante Verringerung des REM-Schlafes sowie eine Intensivierung der EEG-Signale im REM-Schlaf festgestellt. Keine Effekte zeigten sich bei der empfundenen Schlafqualität. Mögliche Schwachstelle dieser Arbeit ist die relativ geringe Anzahl an Versuchspersonen, die die Belastbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Obwohl hier ein handelsübliches Mobiltelefon verwendet wurde und die Ergebnisse auf die alltägliche Benutzung solcher Geräte gut übertragbar sind, ist die Vergleichbarkeit mit anderen Studien durch die fehlenden Angaben zur Dosimetrie eingeschränkt.

Eine Wiederholungsstudie von <Mann 1996> wurde an der gleichen Universität durchgeführt <Wagner 1998>. In einem etwas modifizierten Schlaflabor wurden dabei 24 Versuchspersonen bei mit 217 Hz gepulster 900 MHz Mobilfunkstrahlung untersucht. Die Leistungsdichte am Kopf der Probanden betrug ca. 0,2 W/m², die SAR wurde mit 0,3 W/kg, maximal 0,6 W/kg im Kopf/Nackebereich der Personen angegeben. Bei dieser Studie wurde u.a. ein anderer Antennentyp (zirkular polarisierend), der nicht typisch für ein Mobiltelefon ist, und eine geringere Leistungsdichte verwendet.

Aus <Wagner 1998> resultierten zwar ähnliche Tendenzen wie aus der Arbeit <Mann 1996>, jedoch keine signifikanten Ergebnisse. Durch die höhere Anzahl Versuchspersonen und die bessere Dosimetrie sind die Ergebnisse dieser Studie zwar belastbar, durch die veränderten Versuchsbedingungen jedoch nicht für den Mobilfunk zu verallgemeinern. Es wurde vermutet, dass die lokale Leistungsdichte in <Mann 1996> durch die Versuchsbedingungen größer war und daher zu deutlicheren Ergebnissen geführt hat.

Borbély et al. veröffentlichten 1999 eine Arbeit der Universität Zürich zu den Auswirkungen intermittierender EMF auf den menschlichen Schlaf <Borbély 1999>. In der Untersuchung wurde ein 900 MHz-GSM-Signal simuliert, die SAR war auf 1 W/kg (gemittelt über 10 g) begrenzt. Die relative Einschaltdauer war mit 87,5 % höher als bei handelsüblichen Mobiltelefonen (12,5 %). Im Unterscheid zu den anderen Studien erfolgte keine Dauerexposition, sondern ein intermittierender Betrieb (15 Minuten ein, 15 Minuten aus).

Die Ergebnisse der mit 24 Versuchspersonen durchgeführten Studie zeigten während des orthodoxen (Non-REM-)Schlafes verstärkte Signale im alpha-Bereich des EEG. Aus den Untersuchungsergebnissen wurde weiterhin geschlossen, dass durch das EMF ein ganze Kette von Effekten ausgelöst wird, die sich unmittelbar, d.h. ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung, auf das Schlaf-EEG auswirkt. In der Untersuchung wurde ein GSM-Signal simuliert, das dem Mobilfunk sehr nahe kommt, jedoch einen deutlich höheren Einschaltzyklus aufwies. Trotzdem sind die Ergebnisse mit geringen Einschränkung auf den Mobilfunk übertragbar.

Bei allen Studien wurde ein Abstand von 30 bzw. 40 cm zwischen der Antenne und dem Kopf der Versuchsperson eingehalten. Dadurch und durch die verwendeten geringen Leistungsdichten waren thermische Effekte weitgehend auszuschließen.

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wurde eine weiteren aktuelle Arbeit ausgewertet, die sich mit dem menschlichen Schlaf im magnetischen Feld des technischen Wechselstroms (60 Hz, magnetische Flussdichte $28,3 \mu\text{T}$) befasst <Graham 1999>. In dieser Untersuchung wurden Gruppen von je 7-9 Versuchspersonen unter drei verschiedenen Versuchsbedingungen (Scheinexposition, intermittierendes magnetisches Feld, kontinuierliches magnetisches Feld) im Schlaflabor untersucht. Das intermittierende Feld wurde dabei über den Betrachtungszeitraum (8 Stunden) viermal für je 1 Stunde zugeschaltet. Innerhalb dieser Zeit wurde das Magnetfeld im 15 Sekunden-Rhythmus zu- und abgeschaltet. Auch für diesen Versuch wurde eine zirkular polarisierende Antenne verwendet. Aufgezeichnet wurden die Parameter EEG, EOG, EKG sowie Atmung und es erfolgte eine Befragung der Versuchspersonen zur Feldwahrnehmung und zum Wohlbefinden.

Die Ergebnisse zeigten für das intermittierende Feld bei sechs von elf Schlafparametern signifikante Veränderungen des EEGs, während zwischen der kontinuierlichen Exposition und der Scheinexposition keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden konnten. Veränderungen zeigten sich in

- einer verringerten Schlafeffizienz,
- einer Erhöhung des Anteiles der Schlafphase II,
- einem verspäteten Beginn des REM-Schlafes, sowie
- einem verminderten Anteil und verminderter Dauer des REM-Schlafes.

Auch das subjektive Wohlbefinden wurde von dieser Gruppe nach der Expositionsnacht schlechter eingeschätzt.

Als mögliche Erklärung wurde in <Graham 1999> eine Modulation der Aktivität der Nervenzellen in der Gehirnrinde sowie die Veränderung der Melatoninproduktion diskutiert. Die genauen Wirkungsmechanismen konnten jedoch nicht geklärt werden. Aufgrund der geringen Personenanzahl pro Gruppe und dem Vorgehen bei der Auswahl der Vergleichsgruppe sind die Ergebnisse nur beschränkt belastbar und wegen der deutlich niedrigeren Frequenz nicht auf den Mobilfunk übertragbar.

Die Erkenntnisse zu Veränderungen des Schlafverhaltens lassen sich aus den vorliegenden Untersuchungen wie folgt zusammenfassen:

- Es wurden drei Arbeiten ausgewertet, die sich in in-vivo-Studien am Menschen mit den Auswirkungen des Mobilfunks auf das Schlafverhalten befassen. Alle drei Arbeiten untersuchten mit 217 Hz gepulste Frequenzen aus dem GSM-900-Standard und sind daher hinsichtlich der Frequenz direkt auf die Mobiltelefonnutzung übertragbar.
- Es wurden in zwei der drei Arbeiten signifikante Veränderungen im EEG der schlafenden Testpersonen, sowie Veränderungen in der Schlafarchitektur festgestellt. Unterschiedlich sind die Ergebnisse hinsichtlich der Schlafphasen, in denen die EEG-Veränderungen ermittelt wurden. Während in <Mann 1996> die REM-Phasen betroffen waren, zeigten sich in <Borbély 1999> EEG-Veränderungen nur in den Non-REM-Phasen.
- Die im intermittierenden 60 Hz-Feld gemachten Beobachtungen zeigen Veränderungen in der REM-Schlafphase und in der Schlafphase II. Diese Ergebnisse sind jedoch nicht ohne weiteres auf den Mobilfunk übertragbar.
- Über die möglichen gesundheitlichen Folgen der gefundenen Effekte und die Wirkungsmechanismen liegen noch keine gesicherten Erkenntnisse vor.

In der praktischen Anwendung ist eine dauerhafte Exposition des schlafenden Menschen insbesondere im elektromagnetischen Feld der DECT-Technik (schnurlose Telefone mit begrenzter Reichweite) zu erwarten. Von besonderer praktischer Relevanz wären die beschriebenen Effekte, wenn sie auch für die in der DECT-Technik verwendeten Frequenzen und Leistungsbereiche reproduziert werden könnten.

4.2.4 Bewertung von Untersuchungen zu kognitiven Fähigkeiten und zum Lernverhalten

In der Diskussion um mögliche gesundheitliche Risiken des Mobilfunks wird immer wieder auch über möglichen Erinnerungsverlust nach der Benutzung von Mobiltelefo-

nen berichtet. Einer der Erklärungsansätze ist, dass es bei der Benutzung von Mobiltelefonen zu Veränderungen der kognitiven Fähigkeiten durch thermische oder nicht-thermische Effekte auf die Proteinproduktion kommt. Daher befassen sich eine Reihe von Untersuchungen mit den Auswirkungen von nichtionisierender Strahlung auf die kognitiven Fähigkeiten.

Kognitive Fähigkeiten erlauben es dem Menschen, Informationen wahrzunehmen und sie zu Erkenntnissen weiterzuverarbeiten. Kognitive Fähigkeiten ermöglichen dem Menschen so das Lernen, d.h. das Speichern und Verarbeiten von Informationen im Gedächtnis und geben ihm damit eine Möglichkeit zur Verhaltensänderung. Auch vorübergehende Defizite der kognitiven Fähigkeiten und der Erinnerung können zu gestörtem Lernverhalten und zu schweren Schädigungen beim Menschen führen.

Die Untersuchungen auf diesem Gebiet gliedern sich in zwei Teilbereiche. Zum einen werden in in-vivo Studien am Menschen eine Reihe von Testverfahren zur Beurteilung von kognitiven Fähigkeiten durchgeführt. Zum anderen wird die Untersuchung des räumlichen Lernverhaltens von Nagetieren in der Wissenschaft als ein geeignetes Modell für die Untersuchung von Kognition und Erinnerung beim Menschen angesehen. Bei diesem Lernverhalten kommt dem räumlichen Gedächtnis (insbesondere der Fähigkeit räumliche Zusammenhänge zu erkennen und zu erinnern sowie in einem Lernprozess zu verwenden) eine wesentliche Funktion zu. Daher erscheint es wichtig, die Auswirkungen von EMF auf das Verhalten von Nagetieren genauer zu untersuchen um dabei Aufschlüsse über die beteiligten neurophysiologischen Mechanismen zu erhalten.

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wurden vier Arbeiten detailliert ausgewertet und bewertet, die Untersuchungen am Menschen beschreiben. Weitere fünf ausgewertete und bewertete Arbeiten befassen sich mit dem oben erwähnten Modell des räumlichen Lernverhaltens von Nagetieren. Es handelt sich bei allen diesen Arbeiten um in-vivo Studien.

Henry Lai et al. <Lai 1994> untersuchten das räumliche Lernverhalten von Ratten in einem 12-armigen Labyrinth nach Exposition durch gepulste Mikrowellen der Frequenz 2450 MHz. Die Versuchstiere wurden über 10 Tage jeweils 45 Minuten einem mit 500 Hz gepulsten Feld (SAR 0,6 W/kg) ausgesetzt und anschließend im Labyrinth bei der Futtersuche beobachtet. Die Aufgabe der Tiere bestand darin, anhand räumlicher Orientierung ein Verhalten zu erlernen, das es ermöglicht, in kürzester Zeit die in den einzelnen Gängen des Labyrinths ausgelegten Futterköder zu erreichen. Das Betreten eines Ganges, in dem kein Köder mehr liegt, wurde dabei als Fehler gewertet.

1989 hatte Lai bei einer ähnlichen Untersuchung Lerndefizite bei Ratten festgestellt und die Hypothese aufgestellt, dass Mikrowellenbestrahlung dazu führt, dass Opiate freigesetzt werden, die den Azetylcholinzyklus in bestimmten, für das räumliche Lernen relevanten, Teilen des Gehirns beeinflussen (Azetylcholin wirkt als Überträgersubstanz u.a. im vegetativen Nervensystem). Daher wurden die Versuche in <Lai 1994> erweitert, um die beteiligten Wirkungsmechanismen genauer zu untersuchen. Unmittelbar vor der Exposition wurden den Versuchstieren Injektionen mit Salzlösung bzw. Salzlösung unter Zusatz von drei verschiedenen Substanzen verabreicht. Bei den Substanzen (Physostigmin, Naloxonhydrochlorid und Naloxonmethiodid) handelte es sich um Stoffe, die den Azetylcholinzyklus bzw. die Wirkung von Opiaten stören können.

Die Ergebnisse aus <Lai 1994> bestätigen, dass das Lernverhalten der Versuchstiere durch die Exposition durch gepulste Mikrowellen negativ beeinflusst wird. Verglichen mit der scheinexponierten Kontrollgruppe traten bei der exponierten Gruppe höhere Fehlerraten auf. Daraus wurde eine negative Beeinflussung des Kurzzeitgedächtnisses abgeleitet. Weiterhin wird gezeigt, dass dieser Effekt durch die Injektion von Physostigmin und Naloxonhydrochlorid blockiert wird, da dann keine erhöhte Fehlerrate zu verzeichnen war. Die Arbeit <Lai 1994> zeigte damit, dass sowohl Azetylcholin als auch endogene Opiate als Überträgersubstanzen am räumlichen Lernverhalten beteiligt sind. Weiter wurde in <Lai 1994> abgeleitet, dass bestimmte Teile des Gehirns (Hippocampus) wesentlich stärker am räumlichen Kurzzeitgedächtnis beteiligt sind, als andere Bereiche.

Die Ergebnisse werden in der Arbeit mit einer Vielzahl vor eigenen Arbeiten und Arbeiten anderer Autoren verglichen und die Kompatibilität der Ergebnisse diskutiert. Dabei wird u.a. erwähnt, dass Defizite im Lernverhalten bei Untersuchungen in 8-armigen Labyrinth nicht festgestellt werden konnten, woraus man schließt, dass die Komplexität der Aufgabe eine Rolle spielt.

Obwohl die Untersuchung von <Lai 1994> nur mit relativ kleinen Versuchstierzahlen pro Gruppe arbeitete (10 x 8 Tiere), werden die Ergebnisse in der Kombination mit den angeführten vergleichbaren Ergebnisse anderer Arbeiten als wissenschaftlich belastbar bewertet.

Die Ergebnisse aus <Lai 1994> wurden einige Jahre später von Wang und Lai aufgegriffen <Wang 2000> und das räumliche Lernverhalten von Ratten nach Mikrowellenbestrahlung in einem Wasserlabyrinth untersucht. Die Tiere wurden eine Stunde in einem zylindrischen Wellenleiter exponiert (2450 MHz, gepulst mit 500 Hz, SAR durchschnittlich 1,2 W/kg) und dann in ein mit eingetrübtem Wasser gefülltes Becken von ca.

2,5 m Durchmesser gegeben, in dem sich an einer Stelle 5 cm unter dem Wasserspiegel eine kleine Plattform von 15 x 20 cm Größe befand. Pro Testlauf wurden die Tiere von vier definierten Stellen in das Becken gegeben und die Zeit bis zum Erreichen der Plattform gemessen. Jedes Tier durchlief je 2 Testläufe an drei aufeinanderfolgenden Tagen. Eine Stunde nach dem letzten Testlauf wurde die Plattform entfernt und die Tiere wieder in das Becken gegeben. In diesem Versuchsdurchgang wurden die Schwimmwege aufgezeichnet und die Zeit gemessen, die sich die Tiere in dem Quadranten aufhielten, in dem zuvor die Plattform angebracht war. Als Kontrollgruppen dienten a) scheinexponierte Tiere und b) Tiere, die direkt aus dem Käfig entnommen wurden.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass die exponierten Tiere länger brauchten um die Plattform zu erreichen. Im letzten Versuchsdurchgang verbrachten sie deutlich weniger Zeit in dem Quadranten als beide Kontrollgruppen. Die Auswertung der Schwimmwege zeigte, dass exponierte Tiere in einem deutlich größeren Bereich nach der Plattform suchten als die Kontrollgruppen, die sich auf den fragliche Quadranten konzentrierten.

Die Wissenschaftler leiteten aus den Beobachtungen Defizite der exponierten Tiere im räumlichen Lernverhalten ab. Sie hielten es für sehr wahrscheinlich, dass durch diese Tiere andere, weniger komplexe, „Lernstrategien“ verwendet wurden. Als Wirkungsmechanismus wurde eine Störung des Azetylcholinzyklus für möglich gehalten. Als weitere Möglichkeit wurde angeführt, dass die Energie der Pulsung sich in einem Bereich bewegte, in dem Chou 1985 akustische Wahrnehmung von gepulster Strahlung beobachtet hat.

Die Belastbarkeit der Ergebnisse wird einerseits durch die geringe Anzahl Versuchstiere pro Gruppe (11-12 Stück) eingeschränkt, andererseits durch vergleichbare Ergebnisse aus <Lai 1994> gestützt. Eine weitere Unsicherheit stellt die mögliche Beteiligung akustischer Effekte dar.

Beide vorangehend dargestellten Arbeiten verwendeten Mikrowellen der Frequenz 2450 MHz, gepulst mit 500 Hz. Diese Frequenzen werden im Mobilfunk derzeit nicht genutzt. Erst zukünftige Übertragungssysteme (UMTS) werden in Frequenzbereichen bis 2200 MHz arbeiten. Die Ergebnisse sind daher nicht unmittelbar auf den Mobilfunk übertragbar, liefern aber Hinweise auf möglicherweise auch in anderen Frequenzbereiche wirksame Mechanismen.

Ein mit <Lai 1994> vergleichbares Experiment wurde von Lai 1996 mit einem 60 Hz magnetischen Feld (0,75 mT) durchgeführt <Lai 1996a>. Auch in diesem Experiment

wurden Ratten an 10 aufeinanderfolgenden Tagen über je 45 Minuten exponiert und in einem 12-armigen Labyrinth untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass exponierte Tiere - verglichen mit einer scheinexponierten Gruppe – deutlich mehr Fehler bei der Suche nach Futter machten. Da beide Gruppen etwa die gleiche Zeit für die Futtersuche benötigten, werden Unterschiede in der Motivation oder der Motorik nicht für ursächlich gehalten. Die untersuchten Gruppen bestanden aus je 8 Tieren.

In einer Zusatzuntersuchung mit 4 Gruppen von je 4 bis 5 Tieren wurde der Einfluss von Physostigmin auf das Lernverhalten untersucht. Dabei zeigte sich bei exponierten und mit Physostigmin behandelten Tieren eine deutlich geringere Fehlerrate, als bei der exponierten Kontrollgruppe, der lediglich die gleiche Menge Salzlösung injiziert wurde. Unter Scheinexposition zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen der mit Physostigmin behandelten Gruppe und der Kontrollgruppe.

Die Untersuchung wurde zwar mit sehr kleinen Versuchstierzahlen bei niederfrequentem technischen Wechselstrom durchgeführt, zeigte aber vergleichbare Ergebnisse wie die Versuche bei gepulster 2450 MHz-Mikrowellenstrahlung <Lai 1994>.

Sienkiewicz et al. führten in Großbritannien ebenfalls Versuche im magnetischen Feld durch <Sienkiewicz 1996>. Ziel war es, die in mehreren Studien unterschiedlicher Labors aufgezeigten Einflüsse magnetischer Felder auf das räumliche Lernen und die Orientierung von Nagetieren auf die Abhängigkeit von unterschiedlichen magnetischen Flussdichten zu untersuchen. Hierbei wurden 40 Mäuse in vier Gruppen aufgeteilt und zweimal 5 Tage in einem 50 Hz-Magnetfeld exponiert. Die magnetische Flussdichte betrug 5 μ T, 50 μ T, 0,5 mT bzw. 5 mT. Im Unterschied zu <Lai 1994> und <Lai 1996a> erfolgte die Exposition während der Untersuchung in einem 8-armigen Labyrinth und dauerte maximal 15 Minuten. Als Kontrollgruppen wurden 4 x 10 Mäuse unter Scheinexposition untersucht.

Die Ergebnisse wurden als Wahrscheinlichkeitswerte für das nicht mehrfache Betreten eines Ganges angegeben und ausgewertet. Dabei zeigten die Ergebnisse keine Auswirkungen des magnetischen Feldes auf das räumliche Lernverhalten der Mäuse. Auch konnte damit keine Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte gezeigt werden. Aufgrund von Vorstudien, bei denen mit dem gleichen Tiertyp, dem gleichen Labyrinth und der gleichen statistischen Methode bereits dosisabhängige Effekte bei der Untersuchung von pränataler Röntgenbestrahlung festgestellt wurden, wurde geschlossen, dass das Fehlen von signifikanten Effekten nicht auf mangelnde Sensitivität der Untersuchungs- und Auswertungsmethoden zurückzuführen war.

Es wurde in <Sienkiewicz 1996> eine Anzahl von kompatiblen und nicht-kompatiblen Untersuchungen diskutiert, jedoch wurden keine Vergleiche mit den Arbeiten von Lai angestellt. Mögliche Auswirkungen der kurzen Expositionszeit wurden nicht diskutiert. Die Belastbarkeit der Ergebnisse ist auch hier durch die geringe Anzahl der Tiere pro Gruppe beeinträchtigt.

In einer kürzlich publizierten Arbeit von Sienkiewicz et al. <Sienkiewicz 2000> wurde die Auswirkung von gepulsten Mikrowellen des GSM-Standards (900 MHz gepulst mit 217 Hz, SAR 0,05 W/kg) auf das räumliche Lernverhalten von Mäusen untersucht. Dabei wurde ein 8-armiges Labyrinth verwendet und wie bei <Lai 1994> an 10 aufeinanderfolgenden Tagen je 45 Minuten exponiert bzw. scheinexponiert. Im Gegensatz zu anderen Studien wurden die Versuchstiere, abhängig vom Zeitintervall zwischen Exposition und Untersuchung im Labyrinth, in drei Gruppen eingeteilt:

- Test im Labyrinth unmittelbar nach der Exposition,
- Test im Labyrinth 15 Minuten nach der Exposition, oder
- Test im Labyrinth 30 Minuten nach der Exposition.

Alle drei Gruppen bestanden aus je fünf Versuchstieren und wurden mit je einer gleich großen Kontrollgruppe verglichen.

Als Ergebnis zeigten sich keine signifikanten Abweichungen im Lernverhalten zwischen exponierten und scheinexponierten Tieren. Auch zeigten sich zwischen den drei Gruppen keine signifikanten Unterschiede. Bei der Gruppe, die unmittelbar nach der Exposition untersucht wurde, zeigte sich im Vergleich mit der entsprechenden Kontrollgruppe ein schwankender Verlauf der Fehlerkurve, der jedoch nicht signifikant von der Kontrollgruppe abwich. Gemeinsam war diesen beiden Gruppen, dass vergleichsweise mehr Zeit für die komplette Ausführung der Aufgabe benötigt wurde. Dieser Effekt wurde nicht als signifikant bewertet und mit einer möglichen Stressantwort durch die direkte Aufeinanderfolge von Exposition und Untersuchung erklärt.

In der Diskussion der Ergebnisse wird in <Sienkiewicz 2000> auch auf die Arbeit <Lai 1994> eingegangen, in der sich bei einem ähnlichen Versuchsaufbau aber anderer Frequenz deutliche Lerndefizite ergaben. Neben den Unterschieden in der Art der Versuchstiere, der Frequenz und Pulsung sowie Expositionseinrichtung und Labyrinthdesign wird als wesentlichster Unterschied die bei Lai höhere spezifische Absorptionsrate angegeben.

Hinsichtlich der gewählten Feldparameter (GSM-Standard: 900 MHz, 217 Hz gepulst) sind die Expositionsbedingungen sehr gut auf die Benutzung von Mobiltelefonen übertragbar. Die spezifische Absorptionsrate liegt mit 0,05 W/kg eher im unteren Bereich

dessen, was für handelsübliche Mobiltelefone gemessen wurde. Aufgrund der sehr geringen Versuchstierzahl von fünf Tieren pro Gruppe ist die statistische Belastbarkeit der Daten jedoch als eher gering zu bewerten.

Ohne den Weg über ein Modell lassen sich die Auswirkungen von elektromagnetischen und magnetischen Feldern für bestimmte Parameter auch direkt am Menschen untersuchen. Vier solcher Arbeiten wurden ausgewertet, zwei befassen sich mit einer Trägerfrequenz von ca. 900 MHz, zwei mit technischem Wechselstrom (50 Hz).

Preece et al. veröffentlichten 1999 Ergebnisse über die Auswirkungen simulierter Mobilfunksignale auf die kognitiven Fähigkeiten bei Menschen <Preece 1999>. Bei der Untersuchung an 36 Freiwilligen (18 Männer/18 Frauen) wurde ein simuliertes Mobiltelefon verwendet, das mit einer Trägerfrequenz von 915 MHz arbeitete. Das Gerät wurde wie ein gewöhnliches Mobiltelefon links am Kopf angebracht. Jede Testperson unterzog sich drei Sitzungen (Scheinexposition, 915 MHz kontinuierliches Signal bei durchschnittlich 1 W Sendeleistung, 915 MHz mit 217 Hz gepulstes Signal bei durchschnittlich 0,125 W Sendeleistung) von je ca. 30 Minuten, zwischen denen eine Pause von 48 Stunden eingehalten wurde. Die Versuchsbedingungen wurden zufällig auf die erste bis dritte Sitzung verteilt. In jeder Sitzung mussten die Versuchspersonen 10 Tests absolvieren, die auf einem Bildschirm präsentiert wurden. Die Antworten, durch Drücken eines oder zweier Knöpfe, wurden mittels Computer aufgezeichnet.

Mit den einzelnen Tests, die der Cognitive Drug Research entstammen, wurden das Kurzzeitgedächtnis (begrifflich, numerisch und räumlich), Reaktionsgeschwindigkeit und die Aufmerksamkeit getestet. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Verkürzung der Reaktionszeit beim Auswahltest. Am schnellsten erfolgte die Reaktion beim kontinuierlichen Signal, am langsamsten unter Scheinexposition. Bei der Fehlerrate in diesem Test wurden keine Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen festgestellt. Die Hälfte der Versuchspersonen wurde zusätzlich mittels Fragbogen zu Alkohol-, Tee- und Kaffeekonsum, Medikamenteneinnahme und Schlafverhalten in den letzten 12 Stunden vor den Tests befragt. Aus dieser Zusatzuntersuchung gingen für die Reaktionszeit Tendenzen zur Verkürzung nach erhöhtem Alkoholkonsum bzw. Verlängerung bei erhöhtem Tee-/Kaffeekonsum hervor. Die signifikanten Veränderungen der Reaktionszeit lassen sich jedoch nicht durch die abgefragten Einflussfaktoren erklären. Temperatureffekte werden ebenso als mögliche Erklärung ausgeschlossen.

Die Untersuchungen wurden, verglichen mit der realen Mobiltelefonnutzung, nicht bei absolut ungünstigsten Bedingungen durchgeführt und der gefundene Effekt wird als weder schädlich noch bleibend bezeichnet.

Eine zweite vergleichbare Untersuchung wurde in <Koivisto 2000> vorgestellt. In dieser Arbeit wurden 48 Versuchspersonen (24 Männer, 24 Frauen) mit einem handelsüblichen Mobiltelefon des GSM-Standards (902 MHz gepulst mit 217 Hz bei durchschnittlich 0,25 W Sendeleistung) exponiert bzw. scheinexponiert. Zwischen den beiden Versuchsdurchgängen lagen ca. 24 Stunden. Die bei dieser Arbeit verwendeten Tests entstammen der Software CogniSpeed und CogniSpeed-2, die bereits für andere Untersuchungen verwendet wurde. Es kamen bei den je etwa einstündigen Versuchsdurchgängen insgesamt 12 Tests zur Anwendung, die die Bereiche Reaktionszeit, Aufmerksamkeit und Wiedererkennung für begriffliche, numerische und bildliche Aufgaben abdeckten.

Die Ergebnisse zeigten eine beschleunigte Reaktionszeit für einfache Reaktionstests, Aufmerksamkeitstests und für einfache Subtraktionen unter Exposition. Im Aufmerksamkeitstest wurde ferner für die exponierte Gruppe eine geringere Fehlerquote ermittelt. Beim Auswahl-Reaktionszeit-Test wurden im Gegensatz zu <Preece 1999> keine signifikanten Veränderungen festgestellt. Dies erklärten die Autoren mit der Verwendung eines gepulsten Signals und der Tatsache, dass die stärkste Veränderung in <Preece 1999> durch das kontinuierliche Signal hervorgerufen wurde. Aus der Untersuchung wurden keine Schlüsse auf mögliche gesundheitliche Auswirkungen der Ergebnisse gezogen.

Als weitere Untersuchungen zu kognitiven Fähigkeiten beim Menschen wurden zwei Arbeiten ausgewertet, die die Auswirkungen des magnetischen Feldes von 50 Hz Wechselstrom untersuchten.

Preece veröffentlichte 1998 eine Untersuchung <Preece 1998>, in der 16 Versuchspersonen unter drei verschiedenen Testbedingungen (Scheinexposition, 0,6 mT statisches Feld, 0,6 mT Wechselstromfeld (50 Hz)) mit 10 Tests aus der Cognitive Drug Research untersucht wurden.

Dabei zeigten sich für die Exposition im magnetischen Feld des Wechselstroms eine Beeinträchtigung des Kurzzeitgedächtnis bei numerischen und begrifflichen Aufgaben sowie eine höhere Fehlerrate beim Auswahl-Reaktionstest.

Crasson et al. untersuchten den Einfluss von kontinuierlichem und im 15 Sekunden-Takt intermittierendem 50 Hz-Magnetfeld (0,1 mT) <Crasson 1999>. Die Untersuchung erfolgte an 21 Testpersonen und wurde 18 Monate später an 18 Personen aus dem ersten Durchgang noch einmal wiederholt. Als Parameter wurden

- das subjektive Feldempfinden der Testpersonen abgefragt,
- eine Auswahl von Aufmerksamkeits-, Gedächtnis- und Reaktionstest vor, während und nach der Exposition durchgeführt
- sowie elektrophysiologische Reaktionen (u.a. EEG)

aufgezeichnet.

Die Auswertung der Befragung der Testpersonen ergab, dass das Vorhandensein eines magnetischen Feldes nicht empfunden werden konnte. Auch die Selbsteinschätzung der Probanden hinsichtlich Wohlbefinden und Aufmerksamkeit zeigte keine Beeinflussung durch das anliegende Feld. In der Ausführung der einzelnen Tests, einschließlich der Reaktionszeit, konnten keine Unterschiede zwischen Scheinexposition, kontinuierlichem und intermittierendem Feld erkannt werden. Lediglich im zweiten Durchgang wurde eine Verlängerung der Reaktionszeit beim visuellen Reaktionstest festgestellt. Die Auswertung der EEG-Aufzeichnungen zeigte Veränderungen der Amplituden in unterschiedlichen Gehirnregionen.

Aus den Ergebnissen wurde abgeleitet, dass das magnetische Feld keinen Einfluss auf das Erinnerungs- und Konzentrationsvermögen der Versuchspersonen hatte. Die leichten Veränderungen, die festgestellt wurden, wurden als wenige, geringe und vorübergehende Effekte bezeichnet, die nur einige Aspekte kognitiver Fähigkeiten betreffen. Mit dieser Arbeit konnten Ergebnisse einiger früherer Arbeiten, die bei ähnlichen Bedingungen Effekte zeigten, nicht bestätigt werden.

Aus den ausgewerteten Arbeiten zu kognitiven Fähigkeiten und Lernverhalten lassen sich zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Es gibt nur wenige Arbeiten, die im Hinblick auf kognitives Verhalten und Lernfähigkeit die derzeit relevanten Frequenzen des Mobilfunks untersuchen. Weitere Arbeiten untersuchen z.B. Mikrowellen im 2450 MHz-Bereich oder technischen Wechselstrom (50/60 Hz), wobei die Ergebnisse, insbesondere bei den niedrigen Frequenzen, nicht direkt auf den Mobilfunk übertragbar sind.
- Neben Untersuchungen am Menschen wird zur Untersuchung der Auswirkungen von nichtionisierender Strahlung auf Kognition und Lernen auch das räumliche Lernverhalten von Nagetieren als Modell herangezogen.

- In Tierversuchen wurden bei gepulsten 2450 MHz-Mikrowellen Defizite im räumlichen Lernverhalten nachgewiesen, aus denen auf eine negative Beeinflussung des Kurzzeitgedächtnisses geschlossen wird <Lai 1994, Wang 2000>. Als beteiligte Wirkungsmechanismen wurden der Azetylcholinzyklus im Hippocampus sowie die Wirkung endogener Opiate identifiziert.
- Im magnetischen Feld technischen Wechselstroms (50 bzw. 60 Hz) wurden Lerndefizite bei Nagetieren in einigen Untersuchungen ebenfalls nachgewiesen, in anderen nicht. Eine Erklärung hierfür könnte in den unterschiedlichen Versuchsbedingungen liegen. Aufgeklärt wurden diese Widersprüche jedoch noch nicht.
- Eine Untersuchung, die sich im Tierversuch mit dem räumlichen Lernverhalten befasst, wurde mit dem GSM-Standard, d.h. bei gepulster 900 MHz Trägerfrequenz durchgeführt <Sienkiewicz 2000>. Hier konnten keine signifikanten Defizite nachgewiesen werden. Die Ergebnisse wurden mit nur sehr wenigen Versuchstieren pro Untersuchungsgruppe gewonnen und wurden noch nicht reproduziert.
- Untersuchungen am Menschen zeigten bei mobilfunkrelevanten Frequenzbereichen (902 bzw. 915 MHz) Veränderungen der kognitiven Fähigkeiten in Form von Reaktionszeitverkürzungen. Über gesundheitliche Auswirkungen dieser Veränderungen werden in den Untersuchungen entweder keine Aussagen getroffen oder die Effekte werden als nicht schädlich und vorübergehend bezeichnet.
- Studien zu Kognition und Lernen beim Menschen wurden auch mit Frequenzen des technischen Wechselstroms durchgeführt. Hierbei wurde teilweise eine Beeinträchtigung des Kurzzeitgedächtnisses, teilweise EEG-Beeinflussungen ohne Auswirkungen auf die kognitiven Fähigkeiten festgestellt.
- Insgesamt konnten für die menschliche Gesundheit noch keine schädlichen Auswirkungen des Mobilfunks nachgewiesen werden. Es liegen jedoch eine Anzahl von Ergebnissen u.a. aus Tierversuchen vor, deren mögliche Auswirkungen auf den Menschen noch genauer zu untersuchen sind.

4.2.5 Bewertung von Untersuchungen zur Blut-Hirn-Schranke

Das Gehirn von Säugetieren wird von möglicherweise schädigenden Substanzen im Blut durch die sogenannte Blut-Hirn-Schranke (BHS) geschützt. Diese Schranke ist eine selektiv permeable hydrophobische Barriere, die von kleinen lipid-löslichen Molekülen einfach überquert werden kann. Bestimmte lipid-unlösliche Moleküle, wie Glukose, können die Zelllagen auch mittels Trägerproteinen überqueren, die eine hohe Affinität für spezifische Moleküle haben.

Obwohl die Kenntnisse über die Rolle dieser Barriere bei weitem noch nicht vollständig sind, gibt es einen wachsenden Konsens darüber, dass sie nicht nur dazu dient, toxischen polaren Molekülen den Weg in das Gehirn zu verwehren, sondern auch ein regulierendes System ist, das die flüssige Umgebung der intrazellulären Teile des Gehirns stabilisiert und optimiert.

Eine intakte BHS schützt das Gehirn vor Beschädigung, wohingegen eine Dysfunktion der BHS das Einströmen von hydrophilen Molekülen in das Gehirngewebe ermöglicht, das normalerweise ausgeschlossen ist. Dies kann zu einem cerebralen Ödem, einem erhöhten intracranialen Druck und im schlimmsten Fall zu einem irreversiblen Hirnschaden führen.

Die normale selektive Permeabilität der BHS kann durch diverse neuropathologische Bedingungen und experimentelle Situationen verändert werden, so z.B. durch ein starkes Schädeltrauma, epileptische Anfälle oder während einer Röntgenbestrahlung.

Seit Ende der 70er Jahre wurden etliche wissenschaftliche Arbeiten zum Thema der Veränderung der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke veröffentlicht.

Bei einer Frequenz von 2450 MHz untersuchte die Arbeit von <Lin 1980a>, ob es eine Korrelation zwischen der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke und der Menge sowie Verteilung von absorbierter Mikrowellenenergie in Gehirnen von erwachsenen Wistar-Ratten gibt.

Die Untersuchung fand keinen funktionalen Zusammenhang zwischen einer eingestrahlten Energiedosis und der Veränderung der Permeabilität. Ob die bei einer Energiedichte von 2 W/cm^2 gefundene veränderte Permeabilität im Zusammenhang mit (nicht)thermischen Effekten steht, wurde in <Lin 1980a> nicht weiter diskutiert.

In <Persson 1992> wurde die Veränderung der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke von Ratten bei 915 MHz untersucht.

Die Autoren ziehen aus ihren Untersuchungen den Schluss, dass Radiofrequenzen die Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke erhöhen. Sie haben diesen Effekt für kontinuierliche Strahlung gefunden sowie ausgeprägter für zwischen 8 und 215 Hz gepulste RF-Strahlung.

Die Arbeit von <Salford 1993> untersuchte die Veränderung der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke in elektromagnetischen Feldern von 915 MHz bei unterschiedlichen Modulationsfrequenzen.

In der Arbeit wurde eine veränderte Permeabilität von Albumin für alle Modulationsfrequenzen festgestellt. Für Fibrinogen wurde keine veränderte Permeabilität gefunden. Dies wird als Hinweis gewertet, dass EMF die BHS nur in begrenztem Maße beeinflussen können.

In einer weiteren Arbeit untersuchten Salford et al. die Permeabilität der BHS für endogenes Albumin und Fibrinogen während der Exposition mit Mikrowellen von einer Frequenz von 915 MHz und verschiedenen Modulationsfrequenzen <Salford 1994>.

Über eine Albumin-Extravasation in traditionell schwachen Bereichen des Gehirns hinaus finden die Autoren asymmetrische und fleckige Extravasationen in als wenig durchlässig bekannten Regionen des Gehirns wie z.B. der Kortex und dem lateralen Thalamus. Diese wurden als pathologische Effekte bewertet und traten gemäß den Untersuchungen der Autoren für alle SAR-Werte und auch für alle Modulationsfrequenzen auf.

Für Fibrinogen wurde in <Salford 1994> keine veränderte Permeabilität gefunden. Dies wird von den Autoren so erläutert, dass diese im Vergleich zu Albumin größeren Moleküle die BHS nicht passieren können. Dies wird als Hinweis gewertet, dass die Einwirkungen von EMF auf die BHS nur einen begrenzten Effekt haben können.

Für sowohl die Anzahl wie auch die Größe der Extravasate in den Gehirnen der Ratten wurde in <Salford 1994> keine Korrelation zu der Modulationsfrequenz oder zu den SAR-Werten gefunden. Da Extravasationen auch für kleine SAR-Werte gefunden wurden, wird von den Autoren festgestellt, dass zumindest für einen Teil der SAR-Werte eine nicht-thermische Wechselwirkung der BHS mit dem elektromagnetischen Feld stattfindet. Ob die erhöhten Anzahlen an veränderter Permeabilität bei SAR > 2,5 W/kg im Zusammenhang mit thermischen Effekten steht, muss nach Angaben der Autoren durch weitere Untersuchungen zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen geprüft werden.

In einer Studie von Fritze et al. <Fritze 1997a> wird eine Beeinflussung der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke bei Ratten durch Mobilfunk bei Frequenzen von 900 MHz untersucht. Die Tiere wurden einmalig für eine Dauer von 4 Stunden bestrahlt.

Die Autoren ordneten ihren Ergebnissen jedoch nur für den höchsten SAR-Wert von 7,5 W/kg eine statistische Signifikanz und eine thermische Ursache zu. Bei Tieren, die nach einem Ablauf von sieben Tagen nach der einmaligen Exposition untersucht wurden, wurde keine Erhöhung des Extravasates an Albumin gefunden. Hieraus zogen die Autoren den Schluss, dass es sich um einen reversiblen Effekt handelt.

Es wäre notwendig, zu untersuchen, wie die ständige Nutzung eines Mobiltelefons die Veränderungen in der Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke beeinflusst, wozu eine Untersuchung nicht erst sieben Tage nach Exposition erfolgen dürfte.

Die Arbeit von Persson et al. <Persson 1997> untersuchte die Permeabilität der BHS für endogenes Albumin und Fibrinogen während der Exposition mit Mikrowellen einer Frequenz von 915 MHz und verschiedenen Modulationsfrequenzen und führte damit die Untersuchungen aus den Arbeiten von <Salford 1993> und <Salford 1994> weiter. Im Rahmen dieser Arbeit wurden 630 Ratten Expositionen mit unterschiedlichen SAR-Werten und unterschiedlichen Modulationsfrequenzen ausgesetzt. 372 Tiere wurden zu Kontrollzwecken keiner Exposition ausgesetzt. Von beiden Gruppen wurden die Gehirne untersucht. Diese große Anzahl von Tieren ermöglichte es den Autoren Ergebnisse mit einer hohen statistischen Signifikanz zu erzielen.

Die Autoren fanden bei allen Modulationsfrequenzen, einschließlich CW, eine erhöhte Permeabilität für Albumin, wobei sich eine deutliche Variation in Abhängigkeit der Modulationsfrequenz ergab. Die Untersuchung der Permeabilität in Abhängigkeit vom SAR-Wert zeigte weitere interessante Ergebnisse. Nicht ein Ansteigen der Permeabilität im Sinne einer monotonen Dosis-Wirkungsbeziehung wurde beobachtet, sondern ein Oszillieren der Permeabilität. Für kleine SAR-Werte von $4 \cdot 10^{-4}$ bis $8 \cdot 10^{-3}$ W/kg zeigte ein höherer Prozentsatz von Tieren eine veränderte Permeabilität gegenüber Werten von 1,7 bis 8,3 W/kg. Eine Erklärung für die gefundenen Effekte gaben die Autoren nicht. Die Autoren wiesen darauf hin, dass eine Öffnung der Blut-Hirn-Schranke während der Exposition mit elektromagnetischen Feldern mit einem potentiellen Gesundheitsrisiko verbunden ist. Die Autoren sahen einen weiteren Untersuchungsbedarf.

Die im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung betrachteten Arbeiten wurden im Zeitraum zwischen 1980 und 1997 veröffentlicht. Es befinden sich darunter sowohl Arbeiten, die Effekte fanden, wie auch Arbeiten, bei denen keine Effekte gefunden wurden. Klar lässt sich in diesem Arbeitsfeld eine Entwicklung im wissenschaftlichen „Skill“, insbesondere eine Fortentwicklung in den Methoden erkennen. Während in den frühen Jahren noch vorzugsweise Fluoreszenz oder Evans-Blue-Methoden herangezogen wurden, werden später von den Wissenschaftlern immunohistopathologische Techniken bevorzugt.

Die Arbeiten zu Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf die Blut-Hirn-Schranke lassen sich mit folgenden Schlussfolgerungen zusammenfassen:

- Die Ergebnisse der Arbeitsgruppen von Persson und Salford sind aufgrund ihrer hohen statistischen Signifikanz durch die Untersuchung von über tausend Tieren als sehr abgesichert zu sehen.
- Die Arbeitsgruppen, die bislang noch keine statistisch signifikanten Effekte gefunden haben, hatten ein niedrigeres Signifikanzniveau.
- Für Fibrinogen wurde keine veränderte Permeabilität gefunden. Dies wird als Hinweis gewertet, dass die Einwirkungen von EMF auf die BHS nur einen begrenzten Effekt haben können.
- Im Rahmen der Arbeiten wurden für den Fall einer veränderten Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke keine Aussagen über ein potentiell Gesundheitsrisiko gemacht. In dieser Frage ist Forschungsbedarf zu sehen.

4.2.6 Bewertung von Untersuchungen zum kardiovaskulären System

Als kardiovaskuläre Veränderungen werden Änderungen von Blutdruck, Herzfrequenz, Wellenform des Elektrokardiogramms etc. bezeichnet. Bislang geht man davon aus, dass kardiovaskuläre Veränderungen beim Menschen dann auftreten können, wenn ein elektrischer Strom fließt, so z.B. durch einen elektrischen Schock. Der Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf das kardiovaskuläre System wurde in einigen Arbeiten untersucht.

Jauchem et al. <Jauchem 1998> untersuchten den Effekt von Ultraweitbandelektromagnetischen Pulsen auf die Herzfrequenz und den Blutdruck während einer zweiminütigen Exposition von Ratten.

Die Ergebnisse deuten nach den Analysen der Autoren darauf hin, dass eine akute UWB-Gesamtkörperexposition keinen sofortigen schädigenden Effekt auf das kardiovaskuläre System von anästhesierten Ratten hat.

Mann et al. <Mann 1998> untersuchten den Effekt von gepulsten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf die Variabilität der Herzfrequenz während des menschlichen Schlafes. Als felderzeugende Quelle diente ein digitales Mobiltelefon mit einer Frequenz von 900 MHz und einer Pulsung von 217 Hz. Die Untersuchungen wurden mit zwölf gesunden männlichen Probanden durchgeführt.

Bezüglich der Parameter der Herzfrequenz wurden in <Mann 1998> signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Schlafphasen gefunden, die auf die unterschied-

lichen Zustände während des Schlafs hinwiesen. Bezüglich dem Einflusses elektromagnetischer Felder wurde anhand der Ergebnisse der Herzfrequenzanalyse abgeleitet, dass es zu keiner Veränderung in der zentralen Regulation der kardiovaskulären Funktionen kommt.

Die Arbeitsgruppe von Szmigielski <Szmigielski 1998> untersuchte den diurnalen Rhythmus des Blutdruckes und der Herzfrequenz an Arbeitern, die radiofrequenten elektromagnetischen Feldern ausgesetzt waren. Dabei handelte es sich um eine Gruppe von 61 gesunden Arbeitern die mit RF-Feldern mit Frequenzen zwischen 0,738 – 1.503 MHz exponiert wurden und um eine Kontrollgruppe von 42 gesunden Arbeitern ohne arbeitsbedingte Exposition.

Die Untersuchungen zeigten, dass für die Gruppe der Arbeiter ohne berufsbedingte Exposition ein stabiler diurnaler Rhythmus von Blutdruck und Herzfrequenz mit zwei Maxima (um ca. 14 Uhr und 17 – 18 Uhr) und einem Minimum (um ca. 2 bis 4 Uhr) beobachtet werden konnte. Für Arbeiter, die einem EMF ausgesetzt waren, wurde eine signifikante Absenkung der Amplituden des Blutdruckes und des Herzfrequenzrhythmus festgestellt. Ebenfalls wurde eine Verschiebung in der Acrophase auf eine frühere Zeit (11-12 Uhr) beobachtet. Die klinische Relevanz muss, gemäss den Schlussfolgerungen der Autoren, in weiteren Studien untersucht werden. Die Autoren erläuterten in ihrer Arbeit, dass bislang noch keine schlüssige Erklärung für die gefundenen Effekte gegeben werden kann.

Lu et al. untersuchten in <Lu 1999> die Auswirkungen von Ultraweitbandelektromagnetischen Pulsen auf den Blutdruck von Ratten. Die Untersuchungen erfolgten für SAR von 70 mW/kg und 121 mW/kg sowie bei einer Exposition von sechs Minuten.

Es wurde ein signifikantes Absinken des arterischen Blutdruckes (Hypotension) gefunden. Die Herzfrequenz blieb während der Exposition unverändert.

Jauchem et al. <Jauchem 2000> haben kardiovaskuläre und thermische Effekte auf anästhesierte Ratten durch Mikrowellenstrahlung bei Frequenzen von 1 GHz und 10 GHz sowie bei einer Kopplung beider Frequenzen untersucht. Bei allen drei Feldern wurde jeweils die gleiche Ganzkörperenergieabsorptionsrate von 12 W/kg gewählt. Der Anstieg der Körpertemperatur (colonisch, tympanisch, subkutan und am Schwanz), der Atemfrequenz, des arteriellen Blutdruckes und der Herzfrequenz wurden bis zum Tod der Tiere überwacht.

Die Resultate wiesen nach <Jauchem 2000> nicht auf eine ungewöhnliche physiologischen Reaktion während der Bestrahlung hin. Trotz einer frequenzabhängigen Variation in der thermischen Verteilung, gäbe es nach <Jauchem 2000> keine signifikanten Unterschiede zwischen der beobachteten kardiovaskulären Reaktion zwischen den mit unterschiedlichen Frequenzen bestrahlten Gruppen von Tieren. Diese Untersuchungen kamen somit zu konträren Ergebnissen gegenüber Untersuchungen von <Frei 1995>, in denen bei Exposition mit höheren Frequenzen einen größeren Anstieg der Herzfrequenz beobachtet wurde als bei niedrigeren Frequenzen.

Für eine Analyse einer Frequenzabhängigkeit der Herzfrequenz wäre eine Auftragung der Pulrate über der Temperatur eine weitere Größe, um eine Korrelation zu überprüfen. Da die Diagramme in <Jauchem 2000> Auftragungen der gemessenen Größe über der Zeit sind, wird die Herzfrequenz bei ganz unterschiedlichen Temperaturen verglichen. Es wäre sinnvoll, diese Analyse der Daten zu ergänzen.

Die meisten Studien haben keine Hinweise auf akute Effekte auf Blutdruck, Herzfrequenz oder die Wellenform des Elektrokardiogramms ergeben. Wenige Arbeiten finden schwache Effekte auf die Herzfrequenz, wobei über mögliche gesundheitliche Konsequenzen dieser Ergebnisse nichts bekannt ist.

Es gibt bislang jedoch noch viele Kontroversen über Effekte einer Langzeitexposition von EMF niedriger Intensität. Die Energie, die von EMF abgegeben wird, kann im menschlichen Körper elektrische Ströme induzieren. Es gibt bislang nur eine kleine Anzahl von epidemiologischen Studien über kardiovaskuläre Effekte bei Langzeitexpositionen. In <Bortkiewicz 1995> wurden messbare Effekte auf die Variabilität der Herzfrequenz und den Blutdruck festgestellt. Ebenso wurde eine signifikante negative Korrelation der nächtlichen Absenkung des Blutdruckes und der Herzfrequenz gefunden.

4.2.7 Bewertung von Untersuchungen zur Kalzium-Homöostase

Die intrazelluläre Kalziumkonzentration, $[Ca^{2+}]_i$, spielt eine große Rolle bei der Regelung zellulärer Vorgänge wie Bewegung, Kontraktion oder Zellteilung <Carafoli 1986, Rasmussen 1989>. Falls elektromagnetische Felder Einfluss auf die Aktivitäten von Zellen haben, dann wird sich dies mit großer Wahrscheinlichkeit auch in Veränderungen der $[Ca^{2+}]_i$ widerspiegeln. Die $[Ca^{2+}]_i$ unterliegt vielen Einflüssen, z.B. hängt sie von der elektrischen Leitfähigkeit der Zellmembran ab, wird durch die Permeabilität von intrazellulären Ca^{2+} -Speichern bestimmt, aber auch die Konzentrationen von anderen intrazellulären Botenstoffen, wie Inositoltrisphosphat (IP_3), hat Einfluss auf sie. IP_3

ist hauptsächlich in die Signalübertragung, ausgehend von Rezeptoren in der Zellmembran, involviert. So ist die $[Ca^{2+}]_i$ ein guter Indikator für Veränderungen in den verschiedensten zellulären Systemen, die für elektromagnetische Felder empfindlich sein könnten.

Untersuchungen der $[Ca^{2+}]_i$ werden schon seit den siebziger Jahren durchgeführt. Die ersten Arbeiten wurden mit radioaktiv markiertem Kalzium $^{45}Ca^{2+}$ in sogenannten Flux-Messungen durchgeführt. Von den Arbeitsgruppen um S.M. Bawin, W.R. Adey und C.F. Blackman wurden Arbeiten zur Kalzium-Homöostase schon seit den siebziger Jahren veröffentlicht. Dabei setzen sich die Autoren in erster Linie mit neuronalen Zellen auseinander. Als weitere Beeinflussungen wurden eine Reihe von Ca^{2+} -abhängigen Vorgängen festgestellt, z.B.

- betäubende Wirkung von Opiaten <Kavaliers 1987>,
- Kontraktion glatter Gefäßmuskelzellen <Miura 1991, Miura 1993>,
- elektrische Eigenschaften der Zellmembran wie das Membranpotential von Schneckenervenzellen <Kullnick 1992>,
- Membranströme in kultivierten Skelettmuskelzellen <Bernardi 1989>.

Adey et al. <Adey 1992> haben den Effekt von amplituden-modellierten Mikrowellenfeldern auf den Kalziumfluss ($^{45}Ca^{2+}$) der Großhirnrinde von immobilisierten Katzen unter lokaler Anästhesie untersucht. Sie verwendeten eine Trägerfrequenz von 450 MHz und eine sinusförmige Amplitudenmodulation von 16 Hz; die Leistungsdichte betrug $3,0 \text{ mW/cm}^2$ und die Dauer der Exposition 60 Minuten.

Im Vergleich zum Fluss von nicht exponierten Kontrolltieren, wurde bei Exposition ein wellenartig erhöhter Fluss von $^{45}Ca^{2+}$ beobachtet. Diese Wellen waren irregulär in Amplitude und Dauer, viele wiesen eine Periode von 20 – 30 Minuten auf. Die Wellen setzten sich auch nach der Exposition fort.

Blackman und seine Arbeitsgruppe haben seit den achtziger Jahren eine große Zahl an systematischen experimentellen Untersuchungen zum Efflux von Kalzium-Ionen durchgeführt. Sie versuchten, die gefundenen Effekte durch theoretische Modelle abzubilden, so z.B. in <Blackman 1999>. In <Blackman 1988> wurden In Vitro-Experimente zum Einfluss elektromagnetischer Felder auf den Calcium Ionen Efflux an Gehirngewebe durchgeführt. Der Frequenzbereich zwischen 1 und 510 Hz wurde in 15 Hz-Intervallschritten untersucht, mit einem effektiven E-Feld von $15 \text{ V}_{\text{eff}}/\text{m}$ und einem magnetischen Anteil zwischen 59 und 69 nT_{eff} .

Ein direkter Vergleich zwischen Reaktion und Frequenz ergab keinen eindeutigen Zusammenhang. Eine statistische Analyse zeigte jedoch drei frequenz-abhängige Muster in den Daten. In <Blackman 1988> wurden ihre Daten dahingehend analysiert, dass bestimmte Frequenzen im Frequenzintervall zwischen 15 und 510 Hz einen erhöhten Kalzium-Ionen-Efflux zeigten, andere hingegen nicht. Auch in den älteren Arbeiten der Forschergruppe, z.B. in <Blackman 1982> und <Blackman 1985> wurde ein veränderter Kalzium-Ionen-Efflux an Gehirngewebe in Vitro gefunden.

In der Arbeit <Galvanovskis 1999> wurden menschliche Leukämie-T-Zellen und Jurkat-Zellen mit Magnetfeldern von 50 Hz bestrahlt, bei unterschiedlichen Feldstärken zwischen 0 und 0,4 mT_{eff}.

Es wurde eine Reduktion der Oszillationen des Zytoplasmas in menschlichen Leukämie-T-Zellen gefunden. Die Daten der intrazellulären Ca²⁺-Konzentration wurden für einzelne Jurkat-Zellen aufgenommen, die einen ausgeprägten Peakeffekt über den Zeitraum von 1 Stunde aufzeigten. Für die Daten wurde eine rechnergestützte Spektralanalyse durchgeführt. Ein Vergleich der gefundenen Mittelwerte zeigte, dass die totale Spektraldichte des zytosolischen Ca²⁺-Oszillators durch eine Exposition der Zellen mit einem alternierenden Magnetfeld reduziert werden konnte, und dass der Effekt eine Anstieg entsprechend einer Dosis-Wirkungsbeziehung zeigte.

Meyer et al. <Meyer 1995> haben über den fluoreszierenden Kalziumindikatorfarbstoff Fura-2 die intrazelluläre Kalziumkonzentration in isolierten Herzmuskelzellen von Meerschweinchen und in kultivierten menschlichen T-Lymphozyten der Zelllinie Jurkat gemessen. In der Arbeit von Wolke et al. <Wolke 1996> wurden Ergebnisse von Untersuchungen an den Herzmuskelzellen von Meerschweinchen diskutiert. Die isolierten Herzmuskelzellen des Meerschweinchen wurden als Vertreter der Gruppe der erregbaren Zellen ausgewählt, da es sich dabei um Zellen handelt, die über eine reichhaltige Ausstattung mit Ca²⁺-Kanälen, -Speichern und -Transportsystemen verfügen, die alle gut beschrieben sind. Als Beispiel aus der Gruppe der elektrisch nicht erregbaren Zellen wurde eine Zelllinie entarteter menschlicher T-Lymphozyten, Jurkat-Zellen untersucht. Nach <Lindström 1993> gelten diese Zellen als besonders empfindlich gegenüber elektromagnetischen Feldern. Es wurde mit den Trägerfrequenzen 900, 1300 und 1800 MHz und den Modulationsfrequenzen 16, 50, 210 und 30000 Hz untersucht. Die Untersuchungen umfassten sowohl die Vitalität der Zellen, Nullexperimente sowie auch chemische Stimulationen.

Die Untersuchungen an den Herzmuskelzellen ergaben eindeutig, dass für die $[Ca^{2+}]_i$ der ruhenden und der langlangfristig depolarisierten Zelle kein Einfluss der hochfrequenten elektromagnetischen Felder des Mobilfunks nachgewiesen wurde. Die Ergebnisse an den T-Jurkat-Zellen konnten von den Autoren nicht ohne weiteres interpretiert werden, da die Zellen eine insgesamt geringeres reaktives Verhalten aufwiesen. Sie beobachteten bei den Lymphozyten keine Wirkung der hochfrequenten Felder, die von <Lindström 1993> gefundene $[Ca^{2+}]_i$ -Oszillation bei 50 Hz-Magnetfeldern konnte nicht beobachtet werden und auch die chemische Stimulation brachte nicht die erwarteten Ergebnisse. Die Autoren wiesen darauf hin, dass die $[Ca^{2+}]_i$ nicht der einzige Parameter der Ca^{2+} -Homöostase ist, der im Verdacht steht, durch elektromagnetische Felder beeinflussbar zu sein.

Von Liboff et al. <Liboff 1985> wurde der Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf das Verhalten der Ca^{2+} -Kanäle der Zellmembran, die während einer Erregung der Zelle geöffnet wurden, untersucht. Die Autoren wiesen darauf hin, dass eine Wirkung auf den offenen Kanal durch die Ergebnisse ihrer Studie nicht vollständig auszuschließen ist, da kleine Veränderungen in dem Membranstrom von Ca^{2+} sich nicht unbedingt in einer Veränderung der $[Ca^{2+}]_i$ manifestieren, da das Zytoplasma eine sehr große Pufferkapazität hat, die kleine Veränderungen in der $[Ca^{2+}]_i$ kaschieren kann.

Um die Frage einer Beeinflussung des Ca^{2+} -Stromes durch elektromagnetische Felder zu klären, sind noch direkte Messungen dieses Stromes notwendig, sowohl im Bereich der niedrig-frequenten Felder als auch im Bereich der hochfrequenten Felder. In <Wolke 1996> wurden vier mögliche Gründe für unterschiedliche Resultate verschiedener Forschergruppen angegeben:

- Herzmuskelzellen reagieren weniger empfindlich auf hochfrequente elektromagnetische Felder als neuronale Zellen.
- Die Wechselwirkung der Zellen hängt nicht nur von der Modulationsfrequenz ab, sondern auch vom Pulsmuster.
- Die untersuchte Trägerfrequenz kann zu hoch sein oder Veränderungen treten nur in einem anderen Energiefenster auf. (Die von Blackman et al. 1989 gefundenen Fenster wurden im Rahmen der Arbeit nicht systematisch untersucht.)
- Nur das Ca^{2+} , das auf der äußeren Membranoberfläche gebunden ist, wird durch die hochfrequenten Felder beeinflusst, und dieses hat die $[Ca^{2+}]_i$, die im Experiment untersucht wurde, nicht beeinflusst.

Im Hinblick auf Untersuchungen zur Auswirkung elektromagnetischer Felder auf die Kalzium-Homöostase ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Untersuchungen zur Kalzium-Homöostase bilden nur einen Teil der Untersuchungen, die eine mögliche Beeinflussung der Zellmembran, des Zelltransports und der Zellkommunikation durch elektromagnetische Felder untersuchen. Die Arbeiten verfolgen schwerpunktmäßig einen phänomenologischen Ansatz, mit einfachen Erklärungsmodellen. Adverse Effekte auf die menschliche Gesundheit können zum jetzigen Zeitpunkt weder ausgeschlossen werden, noch sind sie eindeutig belegt.
- Von den Autoren wird eine große Zahl möglicher Effekte, Fenstereffekte, Resonanzeffekte, etc. angesprochen. Ebenso steht eine große Zahl möglicher Erklärungsmodelle sowohl für die Präsenz wie auch das Fehlen von Effekten zur Verfügung. Selbst ohne die zusätzlichen Betrachtungen über die Einwirkung von elektromagnetischen Feldern, ist zum jetzigen Zeitpunkt davon auszugehen, dass auf diesem Arbeitsfeld noch diverse wissenschaftliche Kontroversen auszutragen sind.

4.2.8 Bewertung von Untersuchungen zur Melatoninproduktionsrate

Das Hormon Melatonin wird in der Zirbeldrüse produziert. Die Funktion dieses Hormons besteht in der Steuerung des Tag-Nacht-Zyklusses. Die Produktionsrate ist von der Einwirkung sichtbaren Lichts und der Jahreszeit abhängig und das Melatonin wird vorwiegend nachts ausgestoßen. Melatonin fängt außerdem freie Radikale ein, weswegen es als Schutzfaktor gegen Krebsentstehung gilt, eine Absenkung der Produktionsrate von Melatonin daher als krebsauslösend und krebsfördernd gelten kann.

Die Abhängigkeit der Melatoninproduktionsrate von der Einwirkung sichtbaren Lichts legt die Vermutung nahe, dass auch andere elektromagnetische Strahlung die Produktionsrate beeinflussen könnte. In der Literatur wird daher bereits verhältnismäßig frühzeitig über Versuche berichtet, die dies experimentell absichern sollten (z.B. <Welker 1983>). Die Frequenz sichtbaren Lichts liegt aber um Größenordnungen oberhalb der für den Mobilfunk relevanten Frequenzen, so dass nicht der gleiche Wirkungsmechanismus wie bei sichtbarem Licht auf dem Weg über das Auge unterstellt werden kann. Die meisten Arbeiten verwendeten im Vergleich zum Mobilfunk relativ niedrige Frequenzen elektromagnetischer Strahlung.

In einer Arbeit von Rosen et al. <Rosen 1998> wurden Zellen bestrahlt, die Zirbeldrüsen von Ratten entnommen worden waren. Die Bestrahlung erfolgte mit einem elektro-

magnetischen Feld von 60 Hz, sinusoidal und vertikal, sowie einer magnetischen Feldstärke von 0,05 mT. Die Zellen waren teils 10 Minuten vor Bestrahlung, teils 10 Minuten nach Beginn der Bestrahlung stimuliert worden. Die Bestrahlung erfolgte nachts und über 12 Stunden.

Es wurde signifikant und belastbar eine Reduzierung der Melatoninproduktion von Zellen der Zirbeldrüse nach Bestrahlung festgestellt. Die ermittelte Reduzierung des Melatoningehalts betrug 46% <Rosen 1998>.

Reiter et al. haben den Einfluss auf die Melatoninproduktionsrate bei Bestrahlung von Sprague-Dawley-Ratten mit einem sehr niederfrequenten magnetischen Feld untersucht <Reiter 1998>. Die Ratten wurden vor den Versuchen auf einen bestimmten Tag-Nach-Rhythmus eingestellt und dann nachts über 15 bis 120 Minuten bestrahlt. Untersucht wurden nach Entnahme der Zirbeldrüse und Blut der abgetöteten Tiere drei Parameter:

- Gehalt an pinealer N-acetyltransferase (NAT), einem Enzym, das die Melatoninproduktion begrenzt,
- Melatoningehalt der Zirbeldrüse, und
- Melatoningehalt im Blutserum.

In 4 der 15 Experimente wurde keine signifikante Änderung bei einem der Parameter gefunden. In 5 der 15 Experimente wurde eine Abnahme der pinealen NAT-Aktivität festgestellt, in 2 der 15 Experimente eine Abnahme des Melatoningehalts der Zirbeldrüse und in 10 der 15 Experimente eine Abnahme des Melatoningehalts des Blutserums. Als möglicher Grund für die relativ häufig beobachtete Abnahme des Melatoningehalts des Serums wurde diskutiert, dass dieser Radikalbinder durch Bildung freier Radikale in benachbartem bestrahltem Gewebe abgefangen wird, was allerdings weiterer Überprüfung bedürfen würde. Eine Korrelation mit der in den Experimenten variierten Feldstärke oder der Jahreszeit ergab sich nicht. Nachteilig an der Untersuchung von Reiter et al. ist, dass die insgesamt 15 Versuche mit variierten Randbedingungen durchgeführt wurden, bei denen die Zahl der Versuchstiere in den Einzelexperimenten relativ gering war. Die festgestellte fehlende Korrelation mit der Jahreszeit oder der Feldstärke ist daher statistisch weniger gut abgesichert als das Ergebnis reduzierter Produktionsrate von Melatonin.

Sehr umfangreiche Bestrahlungen von Ratten und Hamstern mit hochfrequenten Feldern wurden von Vollrath et al. durchgeführt <Vollrath 1997>. Der größte Teil der Versuchstiere waren Sprague-Dawley-Ratten. Ein Teil der Versuche wurde mit 217 Hz-modulierter 900 MHz-Strahlung vorgenommen, der überwiegende Teil mit unmodulier-

ter 900 MHz-Strahlung. Die Expositionszeiten wurden zwischen 15 Minuten und 6 Stunden variiert. In 26 Einzelexperimenten mit über 300 Versuchstieren wurden die folgenden Parameter analysiert:

- Aktivität des Enzyms NAT in der Zirbeldrüse
 - an 116 bestrahlten Sprague-Dawley-Ratten, davon 23 Ratten mit gepulster Bestrahlung,
 - an 11 Dark-Agouti-Ratten, alle Bestrahlungen ungepulst,
 - an 12 Hamstern (*Phodopus sungorus*), alle Bestrahlungen gepulst.
- Gehalt an Melatonin im Blut, an 28 bestrahlten Sprague-Dawley-Ratten, alle ungepulst bestrahlt,
- Mikrostrukturen im Gewebe der Zirbeldrüsen, elektronenmikroskopisch ausgewertet an 13 bestrahlten Sprague-Dawley-Ratten, alle ungepulst bestrahlt.

Die Kontrollgruppen umfassten jeweils etwa die gleiche Tierzahl.

In einigen der ersten Experimente, über die in <Vollrath 1997> berichtet wird, zeigte sich eine gegenüber der Kontrollgruppe erhöhte NAT-Aktivität. Es wurde vermutet, dass dies ein auf andere Versuchsbedingungen als der elektromagnetischen Strahlung zurückzuführender Effekt sein müsse. Der Versuchsablauf wurde daraufhin geändert und in allen weiteren Versuchen war ein Effekt nicht mehr nachweisbar. Die elektronenmikroskopische Untersuchung der Zirbeldrüse erfolgte im Rahmen der ersten drei Versuche, erbrachte aber keinen Unterschied zwischen bestrahlten Tieren und der Kontrollgruppe. Beim Melatoningehalt des Blutserums wurde ebenfalls keine Veränderung gefunden. Diese Versuche erfolgten sämtlich mit dem geänderten Versuchsablauf. Es ist noch darauf hinzuweisen, dass in den Experimenten, die mit gepulster Strahlung durchgeführt wurden, nur hinsichtlich der NAT-Aktivität analysiert wurde.

Eine Untersuchung der Melatoninproduktion bei Bestrahlung an Menschen wurde von de Seze et al. durchgeführt <de Seze 1999>. Als Strahlenquelle wurden zwei verschiedene Arten von Mobiltelefonen verwendet, eine mit einer Frequenz von 900 MHz, gepulst mit 217 Hz, und eine mit 1800 MHz, ebenfalls gepulst mit 217 Hz. Die maximale lokale Absorptionsrate betrug 0,1 bis 0,3 W/kg. Das untersuchte Kollektiv bestand aus 37 Männern im Alter zwischen 20 und 32 Jahren, die unter verschiedenen Kriterien ausgewählt worden waren, die insgesamt eine niedrige Vorbelastung gewährleisten sollten. Die Versuchspersonen verwendeten ihr Mobiltelefon über zwei Stunden täglich, an fünf Tagen pro Woche und über insgesamt vier Wochen. Mittels Katheder wurden jeder Versuchsperson 17 Blutproben über den Tag verteilt entnommen und im Hinblick auf

- maximalem Melatoningehalt des Bluts,
- Uhrzeit des Maximums, sowie
- tägliche Gesamtproduktion von Melatonin

ausgewertet. Verglichen wurde mit entsprechenden Messwerten von vor Beginn des Versuchs, von zwei und vier Wochen nach Beginn des Versuchs sowie von 15 Tagen nach Ende des Versuchs. Insgesamt erfolgten 1887 Analysen.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Analyseergebnissen der Versuchspersonen während des Versuchs und den Referenzwerten konnte nicht festgestellt werden <de Seze 1999>.

Die vorliegenden Funde hinsichtlich der Auswirkung von elektromagnetischen Feldern auf die Zirbeldrüse und die Melatoninproduktion lassen die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Einflüsse von elektromagnetischen Feldern in Form einer Reduzierung der Melatoninproduktionsrate wurden vor allem bei sehr niedrigen Frequenzen in der Größenordnung bis 100 Hz gefunden.
- Mit Frequenzen im MHz-Bereich bis GHz-Bereich sind bisher relativ wenige Untersuchungen durchgeführt worden. Aus den vorhandenen Untersuchungen ergibt sich kein abgesicherter signifikanter Einfluss auf die Melatoninproduktionsrate, auch nicht bei modulierter hochfrequenter Strahlung.
- Bei Experimenten mit Tieren bzw. Personengruppen konnten keine Effekte durch elektromagnetische Felder, wie sie für den Mobilfunk charakteristisch sind, nachgewiesen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Zirbeldrüse beim Menschen besser gegen die Exposition durch Mobiltelefongebrauch abgeschirmt ist, als dies bei Tierversuchen mit Kleinsäugetern oder gar bei Zellbestrahlung der Fall ist.
- Es besteht daher ein Hinweis auf möglichen Einfluss des Mobiltelefongebrauchs durch Ergebnisse aus Versuchen mit anderen Frequenzbereichen, aber kein positiver Beleg eines Effekts beim Mobiltelefongebrauch, weder durch Untersuchungen an Tieren noch an Personenkollektiven. Unklar ist außerdem das quantitative Risiko, das aus einer Erniedrigung der Melatoninproduktionsrate resultieren würde, und welche Endpunkte bzw. gesundheitliche Folgen sich daraus ergeben würden.

4.2.9 Bewertung von Untersuchungen an verschiedenen Enzymen

Enzyme sind in lebenden Zellen gebildete organische Verbindungen, die den Stoffwechsel des Organismus steuern. In der Literatur finden sich verschiedene Arbeiten, in denen mögliche Auswirkungen von elektromagnetischer Strahlung auf spezielle Enzyme untersucht worden sind.

Nachfolgend werden Ergebnisse von Untersuchungen diskutiert, die die folgenden Enzyme betreffen:

- Aminoacyl-Transfer-Ribonukleinsäure (tRNA) Synthetase der Leber und des Gehirns. Synthetasen sind Enzyme, die die Verbindung von zwei Molekülen unter Spaltung energiereicher Phosphatbindungen katalysieren.
- Enzymfreisetzungen aus Lysosomen der Leber. Lysosomen sind Zellorganellen, die intrazellulär organische Substanz abbauen (z.B. Viren, Bakterien, Moleküle). Untersuchte Enzyme waren
 - Kathepsin-D, eine Protease der Lysosomen, die den Abbau von Proteinen und Peptiden katalysiert, und
 - β -Glukuronidase, die wichtig für die Entgiftungsfunktion der Leber ist.
- Azetylcholinesterase (AChE). Dieses Enzym sorgt für eine besonders rasche Hydrolyse von Azetylcholin in Cholin und Azetat.
- Kreatin-Phosphokinase (CPK). Dieses Enzym ist für die Energiereserve in der Muskulatur von Bedeutung.
- Glutamat-Oxalazetat-Transaminase (GOT), neue Bezeichnung Aspartat-Aminotransferase (AST). Hierbei handelt es sich um ein Enzym, das Aminogruppen von einer Substanz auf andere überträgt.
- Glutamat-Pyruvat-Transaminase (GPT), neue Bezeichnung Alanin-Aminotransferase (ALT). Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Enzym, das der Übertragung von Aminogruppen von einer Substanz auf andere dient.
- Laktat-Dehydrogenase (LDH). Dieses Enzym der Glykolyse katalysiert die Reduktion von Pyruvat zu Laktat.
- Alkalische Phosphatase (AP). Phosphatasen sind Enzyme, die organischen Phosphorsäureester in die Komponenten spalten.

In Experimenten von Kubinyi et al. wurde weibliche Mäuse bestrahlt und der Gehalt an tRNA Synthetase in Hirn und Leber ermittelt <Kubinyi 1996>. Das elektromagnetische Feld hatte eine Frequenz von 2,45 GHz, teils moduliert mit 50 Hz. Die mittlere SAR betrug $4,23 \pm 0,63$ W/kg im Zentrum der Bestrahlungsbox. Die CFLP-Mäuse wurden in u-

tero über 19 Tage jeweils 100 Minuten bestrahlt. 296 Mäuse wurden dem unmodulierten Feld exponiert, 165 Mäuse dem modulierten. Die Kontrollgruppen hatten eine Stärke von 299 bzw. 186 Tieren. Die Tiere wurden nach Körpergewicht, Mortalität und Organmasse gruppiert.

Die Untersuchungen hatten die folgenden Ergebnisse:

- Die Bestrahlung in utero hat keine signifikante Auswirkung auf das Körpergewicht, die Mortalität und die Organmasse.
- Die Ergebnisse für Mengen an Aminoacyl-tRNA-Synthetase-Protein und Aminoacyl-tRNA-Synthetase-Enzym sind je nach Organ und Feld unterschiedlich. Die nachfolgende Tabelle fasst sie zusammen.

	Aminoacyl-tRNA-Synthetase-Protein		Aminoacyl-tRNA-Synthetase-Enzym	
	Leber	Gehirn	Leber	Gehirn
Unmoduliertes Feld	signifikant erhöht	kein signifikanter Effekt	signifikant erhöht	signifikant erniedrigt
Moduliertes Feld	signifikant erhöht	kein signifikanter Effekt	signifikant erhöht	kein signifikanter Effekt

Die Ergebnisse der Arbeit <Kubinyi 1996> sind insgesamt statistisch gut abgesichert. Eine Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnisse fehlt aber.

Galvin et al. haben Lysosomen der Leber von Guinea-Schweinen einer Bestrahlung über 90 bzw. 60 Minuten mit einem nicht gepulsten Feld von 2,45 GHz ausgesetzt <Galvin 1980>. Die SAR betrug 10, 50 bzw. 100 W/kg. Bestimmt wurden Freisetzungen der Enzyme Kathepsin-D und β -Glukuronidase.

Ein Einfluss der Bestrahlung auf die Freisetzungen konnte nur für den Teil der Versuche gezeigt werden, bei dem eine Ansäuerung der Lösung erfolgte, um z.B. den gleichzeitigen Einfluss von Stress zu simulieren. Dieser Effekt ergab sich aber auch bei den Kontrollproben, so dass er nicht auf die Bestrahlung zurückgeführt werden kann.

In einer weiteren Arbeit hat die Gruppe um Galvin Reaktionen der Enzyme AchE und CPK untersucht <Galvin 1981>, wiederum unter Verwendung eines nicht gepulsten Felds von 2,45 GHz. Die SAR betrug bei diesen Versuchen 1, 10, 50 bzw. 100 W/kg. Die Expositionsdauern variierten zwischen zwei und zehn Minuten.

Als Ergebnis fand sich stets ein linearer Zusammenhang zwischen Zeitdauer und Reaktion, unabhängig davon, ob eine Bestrahlung erfolgte oder nicht. Die Arbeit zeigte damit belastbar, dass unter den gewählten Bedingungen keine nichtthermischen Effekte der Enzyme AchE und CPK zu erwarten sind. Thermische Effekte werden dagegen von den Autoren für möglich gehalten, aber ohne dass aufgrund vermuteter homöostatischer Mechanismen irreversible Effekte zu unterstellen sind. Es werden in <Galvin 1981> auch anderslautende Ergebnisse früherer Untersuchungen diskutiert, wobei für die Abweichungen plausible Erklärungen gegeben werden.

In <Lu 1983> werden die Ergebnisse von Experimenten von Lu et al. beschrieben. In diesen Experimenten waren Long-Evans-Ratten mit Mikrowellen von 2450 Hz, moduliert mit 120 Hz, bestrahlt worden. Die Exposition erfolgte über 4 Stunden, bis zu 10fach wiederholt. Außerdem wurde die SAR variiert, nämlich zwischen 0,02 und 20 W/kg. Nach unterschiedlicher Zahl von Bestrahlungen und unterschiedlicher Zeit nach Bestrahlung (sofort bis 24 Stunden) erfolgte eine Bestimmung des Gehalts der Enzyme

- Glutamat-Oxalazetat-Transaminase (GOT) bzw. Aspartat-Aminotransferase (AST),
- Glutamat-Pyruvat-Transaminase (GPT) bzw. Alanin-Aminotransferase (ALT),
- Laktat-Dehydrogenase (LDH) und
- Alkalische Phosphatase (AP) im Blutserum.

Die belastbaren Ergebnisse der Experimente ergaben keinen Unterschied in den Gehalten der Enzyme gegenüber den Kontrolltieren.

Neben der Einwirkung des modulierten EMF wurden in <Lu 1983> auch Tiere gezielt auf 41,5 °C durch Mikrowellenstrahlung erwärmt. In diesen Fällen ergab sich eine signifikante Erhöhung der Gehalte an GOT und GPT. Die Autoren zogen daraus den Schluss, dass thermische Effekte durch EMF-Bestrahlung bei diesen Enzymen durchaus zu erwarten sind, athermische Effekte dagegen nicht nachgewiesen werden können.

Hinsichtlich des Einflusses elektromagnetischer Felder auf Enzyme lassen sich keine allgemeinen gesicherten Schlussfolgerungen ziehen. Dies hat vor allem die folgenden Gründe:

- Die Ergebnisse von Untersuchungen sind oft sehr uneinheitlich.
- Die Zahl bekannter Enzyme ist sehr groß, so dass es einen immensen Aufwand darstellen, einen größeren Teil der verschiedenen im menschlichen Körper relevanten

Enzyme unter Bedingungen zu testen, die den Expositionen des Mobiltelefongebrauchs nahe kommen.

- Es ist davon auszugehen, dass nicht alle Enzyme bereits bekannt sind, insbesondere was deren Funktion im menschlichen Körper betrifft. Damit ist ein ungeklärter Aspekt in vielen Fällen die Frage des Endpunkts und der Relevanz im Hinblick auf negative gesundheitliche Auswirkungen.

4.2.10 Bewertung von Untersuchungen hinsichtlich der Beeinflussung von Fortpflanzung und Entwicklung

Es liegen eine Reihe tierexperimenteller Studien vor, in denen mögliche Auswirkungen elektromagnetischer Strahlung auf Fortpflanzung und Entwicklung von Tieren, insbesondere Nagetiere, untersucht worden sind. Die Arbeiten sind erst kürzlich in einem Review-Artikel <O'Connor 1999> zusammengefasst worden (siehe hierzu auch <Jensh 1983a, 1983b, 1984a, 1984b, 1997>).

Die in Einzelfällen gefundenen schädigenden Effekte auf das Gewicht und auf die Entwicklung der Föten ließen sich auf die Erhöhung der Körpertemperatur der Muttertiere zurückführen und traten nur bei entsprechend hohen Feldstärken auf. Auch Untersuchungen von Nelson et al. <Nelson 1997, 1998, 1999> zur teratogenen Wirkung elektromagnetischer Strahlung in Kombination mit Salizylsäure zeigten keine statistisch signifikanten adversen Effekte.

Abweichend hiervon wurden in der Arbeit von Magras et al. <Magras 1997> starke Abnahmen der Fruchtbarkeit von Mäusen beschrieben, die in einer Gebirgsgegend in Griechenland den Strahlungen eines Antennenparkes von Rundfunk- und Fernsehsendern ausgesetzt wurden. Diese Arbeit muss allerdings aufgrund der nicht unter vergleichbaren Bedingungen gehaltenen Kontrollen als wissenschaftlich nicht belastbar angesehen werden, solange die Versuchsergebnisse nicht reproduziert werden können.

5. Zusammenfassende Bewertung des aktuellen Kenntnisstands zu gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks

Im folgenden Kapitel wird zunächst eine allgemeine Bewertung der Dokumentation von Untersuchungen getroffen, die im Sinne einer Vorbemerkung den inhaltlichen Bewertungen vorangestellt ist (Kapitel 5.1). Anschließend sind in Kapitel 5.2 zu den einzelnen hier untersuchten Effekten gesicherte Kenntnisse zusammengestellt, die sich aus Kapitel 4 ergeben haben. In Kapitel 5.3 sind die offenen Fragen nach den untersuchten Effekten zusammengestellt. In Kapitel 5.4 erfolgt eine Gesamtbewertung.

5.1 Vorbemerkungen zur Dokumentation der Untersuchungen

Durch das gesamte Forschungsgebiet zieht sich die Problematik, dass durch ein Forscherteam gefundene Effekte durch andere Forschungsteams nicht verifiziert werden können, ohne dass die Ursache geklärt ist bzw. geklärt werden kann. Voraussetzung für die Klärung, ob die Ursache in unterschiedlichen Versuchsbedingungen zu sehen ist, wären unter anderem detaillierte Kenntnisse über die Versuchsbedingungen, den Ablauf, und die Auswertung der gemessenen Daten. Diese Angaben sind im allgemeinen nur in stark komprimierter Form in den Publikationen zu finden. Dies macht es unmöglich, das jeweilige Experiment anhand der Publikation in seinen Details nachzuvollziehen, und eben dieses unter den gleichen Versuchsbedingungen durchzuführen und auszuwerten. Darüber hinaus können bestimmte störende Einflüsse auf das Ergebnis erst durch spätere Forschungsergebnisse erkannt werden, so dass bei früheren Arbeiten unter Umständen keine Informationen darüber vorliegen, inwieweit solche Einflüsse vorlagen oder nicht.

Von Hansen et al. wurde ein Leitfaden für Experimente, die die Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme untersuchen, entwickelt <Hansen 1996>. Jahre et al. haben in <Jahre 1996> über den Einfluss von gepulsten elektromagnetischen Feldern auf das Elektroenzephalogramm von Menschen einen Vorschlag für einen systematischen Aufbau der Versuchsspezifikationen und -ergebnisse und deren Dokumentation gemacht. Für die Durchführung der Untersuchungen selbst haben sie eine Checkliste zur Versuchsdurchführung entwickelt.

Diesen positiv zu bewertenden Vorschlägen steht jedoch ein Dilemma der modernen Wissenschaft gegenüber. So ist für Publikationen zur Annahme in international verbreiteten Fachzeitschriften im allgemeinen eine maximale Länge vorgegeben. Eine schnelle

Verbreitung neuer wissenschaftlicher Ergebnisse ist oft nur über eine „Rapid Communication“ möglich, bei der wenige Seiten zur Verfügung stehen. Ausführliche Arbeiten müssen den langen Prozesse des „peer reviewing“ durchlaufen, sodass für die Wissenschaftler immer die Gefahr besteht, dass vergleichbare Ergebnisse vorher von einer anderen Forschungsgruppe publiziert werden.

Das genannte Dilemma hat die Arbeit am vorliegenden Gutachten erschwert und trägt in einigen Fällen dazu bei, dass offene Fragen verbleiben. Es ist nicht zu erwarten, dass sich kurzfristig Verbesserungen in dieser Hinsicht erreichen lassen. Mittelfristig könnte angeregt werden, ausführliche und standardisierte Beschreibungen von Versuchsbedingungen, wenn diese nicht in der Publikation unterzubringen sind, beispielsweise elektronisch vorzuhalten und darauf in der Publikation hinzuweisen.

5.2 Gesicherte Erkenntnisse über gesundheitliche Auswirkungen

5.2.1 Auslösung und Förderung von Krebserkrankungen

Obwohl in verschiedenen Arten von Untersuchungen, die sich mit Effekten befassten, die bei der Krebsauslösung und –förderung eine Rolle spielen, solche Effekte gefunden werden konnten, bestehen keine gesicherten Erkenntnisse, in welchem Umfang sich solche Effekte tatsächlich und auch beim Menschen gesundheitlich auswirken.

5.2.2 Gehirnfunktion

Die EEG-Untersuchungen am wachen Gehirn zeigen nicht in einheitlichem und reproduzierbaren Maße einen Effekt durch die RF-Felder. Gesicherte Erkenntnisse liegen daher zu dieser Fragestellung nicht vor.

5.2.3 Schlafverhalten

Aussagen über gesicherte Erkenntnisse zu gesundheitlichen Auswirkungen lassen sich aus den bisherigen Untersuchungen zum menschlichen Schlafverhalten und Schlaf-EEG unter Einfluss von elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks aufgrund der geringen Datendichte aus den festgestellten biologischen Effekten noch nicht ableiten.

5.2.4 Kognitive Fähigkeiten und Lernverhalten

In Tierversuchen wurden bei gepulsten 2450 MHz-Mikrowellen Defizite im räumlichen Lernverhalten nachgewiesen, aus denen auf eine negative Beeinflussung des Kurzzeitgedächtnisses geschlossen wird. Untersuchungen am Menschen zeigten in mobilfunkrelevanten Frequenzbereichen Veränderungen der kognitiven Fähigkeiten in Form von Reaktionszeitverkürzungen. Über gesundheitliche Auswirkungen dieser Veränderungen werden in den Untersuchungen entweder keine Aussagen getroffen oder die Effekte werden als nicht schädlich und vorübergehend bezeichnet. Insgesamt konnten für die menschliche Gesundheit aber noch keine schädlichen Auswirkungen des Mobilfunks nachgewiesen werden.

5.2.5 Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke

Hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf die Gesundheit, die durch eine veränderte Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke aufgrund der Einstrahlung radiofrequenter elektromagnetischer Felder erzeugt wird, gibt es bislang noch keine gesicherten Erkenntnisse.

5.2.6 Kardiovaskuläres System

Die meisten der bislang durchgeführten Studien haben keine Hinweise auf akute Effekte auf Blutdruck, Herzfrequenz oder die Wellenform des Elektrokardiogramms ergeben. . Gesicherte Erkenntnisse liegen daher zu dieser Fragestellung nicht vor.

5.2.7 Kalzium-Homöostase

Die bislang durchgeführten Studien liefern interessante Erkenntnisse über Prozesse der Zellkommunikation und der Kalzium-Homöostase, jedoch können aus den gefundenen Effekten keine direkten Hinweise auf gesundheitliche Beeinträchtigungen abgeleitet werden.

5.2.8 Melatoninproduktionsrate

Einflüsse von elektromagnetischen Feldern in Form einer Reduzierung der Melatoninproduktionsrate wurden vor allem bei sehr niedrigen Frequenzen in der Größenordnung bis 100 Hz gefunden. Aus den vorhandenen Untersuchungen ergibt sich dagegen

kein abgesicherter signifikanter Einfluss auf die Melatoninproduktionsrate bei für den Mobiltelefongebrauch typischer Exposition. Es besteht aber ein Hinweis auf möglichen Einfluss des Mobiltelefongebrauchs, ohne dass Schlussfolgerungen auf das mögliche quantitative Risiko sowie mögliche Endpunkte bzw. gesundheitliche Folgen nach derzeitigem Kenntnisstand gezogen werden können.

5.2.9 Enzymproduktion

Bei einigen Enzymen wurden Auswirkungen elektromagnetischer Strahlung auf die Produktionsrate festgestellt. Es kann aber nicht von gesicherten Erkenntnissen gesprochen werden, da die Exposition meist nicht als typisch für die Nutzung von Mobiltelefonen angesehen werden kann. Über Endpunkte und damit gesundheitliche Auswirkungen liegen ebenfalls keine gesicherten Erkenntnisse vor.

5.2.10 Fortpflanzung und Entwicklung

Es gibt derzeit keine gesicherten Erkenntnisse, dass elektromagnetische Strahlung im für Mobilfunk-Anwendungen typischen Strahlenbereich schädigende Einwirkungen auf die Fortpflanzung und Entwicklung von Tieren bzw. Menschen ausüben kann.

5.3 Offene Fragen hinsichtlich gesundheitlicher Auswirkungen

5.3.1 Auslösung und Förderung von Krebserkrankungen

5.3.1.1 Gentoxizität und Transformation

Die Vielzahl der experimentellen Arbeiten, die zur Frage gentoxischer Schädigungen elektromagnetischer Strahlen durchgeführt wurde, ergibt insgesamt kein einheitliches Bild. Sowohl bei den durchgeführten Untersuchungen zu DNA-Einzel- und Doppelstrangbrüchen, als auch zu Chromosomenaberrationen, Schwesterchromatidaustausch und Mikronukleusbildung stehen Arbeiten, in denen ein Zusammenhang zwischen Erhöhungen der Raten und elektromagnetischer Strahlung gefunden wurde, neben Veröffentlichungen, die ebenfalls wissenschaftlich belastbar keine Zusammenhänge gezeigt haben (siehe z.B. die Publikationen <Lai 1995, Lai 1996b bzw. Malyapa 1997a, Malyapa 1997b>). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Zum jetzigen Zeitpunkt kann lediglich festgestellt werden, dass es durch Strahlungen im mobilfunkrelevanten Fre-

quenz- und Feldstärkebereich in einzelnen Testsystemen zu Schädigungen der DNA kommt, in anderen Testsystemen dagegen nicht.

Bei den Untersuchungen zur DNA-Synthese und zur Zellteilungsaktivität belegen die Arbeiten von Stagg et al. <Stagg 1997> und Kwee et al. <Kwee 1998>, dass es zu Beeinflussungen (bei Gliazellen von Ratten und bei menschlichen Amnion-Epithelzellen) kommt, die in anderen Testsystemen (z.B. Hefe, <Gos 1997>) nicht gefunden wurden. Einige Publikationen zur Ornithin-Decarboxylase zeigen, dass durch elektromagnetische Strahlungen im für den Mobilfunk typischen Frequenzbereich die Enzymaktivitäten ansteigen. Dies kann als Hinweis auf eine tumorpromovierende Wirkung in den eingesetzten Testsystemen gewertet werden. Eine promovierende Wirkung zeigte sich auch in Studien, in denen zusätzlich zur elektromagnetischen Strahlung mit Tumorinitiatoren wie Benzo-a-pyren gearbeitet wurde.

Zur Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit tumorinitiiierenden und – promovierenden Substanzen liegen unterschiedliche Befunde vor. Die Arbeiten von Balcer-Kubiczek et al. <Balcer-Kubiczek 1985, Balcer-Kubiczek 1991> unterstützen die These, dass elektromagnetische Strahlung im Mobilfunkbereich zusammen mit Tumorinitiatoren wie Benzo-a-pyren bzw. zusammen mit Tumorpromotoren wie TPA die Zelltransformation fördert. Auch in der realen Expositionssituation des Menschen wirken elektromagnetische Strahlen und Umweltchemikalien mit Initiations- bzw. Promotionspotential gleichzeitig ein. In dem experimentell anders gestalteten Co-Kulturansatz von Cain et al. <Cain 1997> fanden sich keine entsprechenden Hinweise. Auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

5.3.1.2 Langzeituntersuchungen zur Krebsentstehung an Tieren

Die durchgeführten Langzeitversuche mit Tieren zu einer eventuellen initiierenden und promovierenden Wirkung elektromagnetischer Strahlung ergeben keine einheitlichen Befunde. Es überwiegen Arbeiten, in denen keine Effekte gefunden wurden, hier waren in Einzelfällen allerdings auch zu kleine Tierzahlen in den Versuchen verwendet worden (z.B. <Santini 1988, Salford 1993>). Die Vergleichbarkeit der Arbeiten untereinander ist in den meisten Fällen nicht gegeben, da mit unterschiedlichen Tierstämmen gearbeitet wurde.

Die Übertragbarkeit der gefundenen Effekte auf den Menschen ist schwierig. In einigen Fällen wurden Tierstämme eingesetzt, die sich durch eine gezielt herbeigeführte hohe Veranlagung zur Krebsentstehung auszeichnen <Szmigielski 1982, Toler 1997, Frei 1998a, Frei 1998b, Repacholi 1997>. Allerdings sind auch beim Menschen genetische Prädispositionen bekannt. In anderen Arbeiten wurden transformierte Zellen in die Ver-

suchstiere implantiert <Santini 1988, Salford 1993> bzw. neben der elektromagnetischen Strahlung Chemikalien eingesetzt, die tumorinitiierend bzw. tumorpromovierend wirken <Szmigielski 1982, Wu 1994, Adey 1999>. Wie bereits oben aufgeführt, findet beim Menschen real ebenfalls eine gleichzeitige Einwirkung elektromagnetischer Strahlung und weiterer Noxen statt.

In der Arbeit von Repacholi et al. <Repacholi 1997>, in der bei der EMF-exponierten Tiergruppe wesentlich häufiger Lymphome auftraten, wurden transgene Mäuse mit aktiviertem Onkogen eingesetzt. Die Arbeitsgruppe von Chou fand allerdings auch bei nicht prädisponierten Ratten und ohne den gleichzeitigen Einsatz von Tumorinitiatoren bzw. –promotoren signifikant erhöhte Zahlen von spontan aufgetretenen Tumoren in den EMF-exponierten Tieren <Chou 1992>.

Die derzeit vorliegenden Ergebnisse aus Tierversuchen zur Frage der tumorinitiierenden und tumorpromovierenden Wirkung elektromagnetischer Felder im Mobilfunkfrequenzbereich sind sehr unterschiedlich. Hier sollten in Abstimmung mit den Befunden aus den *in vitro*-Studien weitere Untersuchungen durchgeführt bzw. die Reproduzierbarkeit bisheriger Befunde geklärt werden. Zu den Ergebnissen der Arbeiten von Repacholi et al. werden derzeit zwei Studien durchgeführt <IEGMP 2000, S. 76>.

5.3.1.3 Epidemiologische Untersuchungen zur Krebsentstehung an Menschen

Die bisher durchgeführten epidemiologischen Studien erlauben keine Aussagen über eventuelle gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen. Die vorgelegten Arbeiten lassen lediglich den Schluss zu, dass es keine Hinweise auf massive Gesundheitsschäden in Form von Krebs gibt.

In der Umwelt des Menschen sind eine Vielzahl krebserzeugender Noxen natürlichen und anthropogenen Ursprungs vorhanden und Krebserkrankungen zählen zu den häufigsten Todesursachen überhaupt. Vor diesem Hintergrund ist es schwierig, ein eventuell durch Mobilfunkanwendungen bestehendes zusätzliches Risiko mit epidemiologischen Methoden nachzuweisen. Erschwerend wirken sich vor allem die langen Latenzzeiten bis zur Manifestation von Krebs und (aufgrund der überall vorhandenen Belastung mit elektromagnetischen Feldern unterschiedlicher Herkunft) das Fehlen eines Vergleichskollektivs, das als nicht belastete Kontrolle dienen könnte, aus.

5.3.2 Gehirnfunktion

Die Ergebnisse von Arbeiten, die eine Beeinflussung des Gehirns durch RF-Felder mit Hilfe von Elektroenzephalogrammen (EEG) untersucht haben, weisen kein einheitliches Bild auf. So finden Reisser et al. <Reisser 1995> einen Anstieg der gemittelten EEG-Aktivität in einigen Frequenzbändern. <v. Klitzing 1995> findet in einem schmalen Frequenzband um ca. 10 Hz einen Resonanzeffekt im EEG. Er interpretiert diesen als eine Aktivierung oder Generierung einer EEG-Signals im Gehirn durch das äußere Feld. Dem gegenüber finden <Röschke 1995> und <Gehlen 1996> keine Auswirkungen von RF-Feldern auf das menschliche EEG.

Röschke et al. <Röschke 1995> weisen in ihrer Arbeit darauf hin, dass die von Ihnen gefundenen Ergebnisse unter klaren Einschränkungen gültig sind. Zum einen werden Veränderungen in der Gehirnfunktion nur teilweise durch ein EEG reflektiert, zum anderen beziehen sich die gefundenen Ergebnisse nur auf Untersuchungen an jungen, gesunden Freiwilligen.

Die Frage, ob eine gesundheitliche Beeinträchtigung durch RF-Felder auf das menschliche Gehirn mit Sicherheit auszuschließen ist, lässt sich aus den Ergebnissen der EEG-Untersuchungen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht eindeutig beantworten.

5.3.3 Schlafverhalten

Die bisher durchgeführten Studien zum menschlichen Schlafverhalten und Schlaf-EEG unter Einfluss von elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks geben Hinweise auf biologische Effekte, zeigen aber noch ein uneinheitliches Bild. Neben der Absicherung dieser Ergebnisse sind weitere Untersuchungen über mögliche Auswirkungen der EEG-Veränderungen auf die menschliche Gesundheit notwendig. Des Weiteren ist eine Ausdehnung der Untersuchungen auf sensitive Personengruppen erforderlich, da hier möglicherweise verstärkt gesundheitliche Auswirkungen zu erwarten sind. Auch mögliche Langzeitauswirkungen sind noch zu klären.

Weiterhin gibt es noch keine gesicherten Kenntnisse darüber, über welche Wirkmechanismen elektromagnetische Felder auf die Schlafarchitektur und das Schlaf-EEG einwirken. Hier besteht noch Forschungsbedarf hinsichtlich der wirksamen Frequenzen, Intensitäten und Mechanismen.

In der Bundesrepublik Deutschland sind weitere Untersuchungen zu Kurz- und Langzeitauswirkungen von HF-Feldern auf die Qualität des menschlichen Schlafes und der hieraus resultierenden Tagesempfindlichkeit an der Universität Kiel geplant <Brix 1999>. Hierbei soll die Auswirkung veränderten Schlafparameter untersucht werden.

5.3.4 Kognitive Fähigkeiten und Lernverhalten

Bisher liegen nur wenige Studien zum Einfluss von Mobilfunk auf kognitive Fähigkeiten und Lernverhalten des Menschen vor. Tierversuche zeigen bei unterschiedlichen Frequenzen teilweise deutliche Defizite im räumlichen Lernverhalten von Nagetieren. Unklar ist nach derzeitigem Kenntnisstand, ob diese Effekte und die hierfür für verantwortlich gehaltenen Wirkungsmechanismen auch für den Menschen relevant sind und wie sie sich auswirken. Hierzu sind weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Da es sich außerdem bei den ausgewerteten Arbeiten um Untersuchungen handelt, die nur einen kleinen Zeitraum von wenigen Tagen abdecken, sind Aussagen zu langfristigen Auswirkungen regelmäßiger Exposition noch nicht möglich. Hier könnten unter Umständen auch sehr kleine Effekte langfristig relevante Auswirkungen haben.

Untersuchungen am Menschen wurden bislang nur an gesunden, meist jungen Menschen durchgeführt. Über mögliche Effekte bei sensitiven Personengruppen liegen noch keine Aussagen vor.

5.3.5 Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke

Eine Veränderung der Blut-Hirn-Schranke wird in den Untersuchungen der Gruppe um Persson und Stalford gefunden. Die Ergebnisse stehen jedoch im Widerspruch zu Ergebnissen anderer Gruppen, wie z.B. Fritze und Kollegen. Die große Anzahl von Untersuchungen und die damit verbundene hohe statistische Signifikanz der Ergebnisse von Persson und Stalford erfordern jedoch eine unbedingte sofortige Auseinandersetzung mit diesen Resultaten. Im Gegensatz zu Albumin hatten Persson et al. <Persson 1997> keine veränderte Permeabilität für Fibrinogen gefunden. Sie ziehen daraus den Schluss, dass der Effekt von radiofrequenten Mobilfunkfeldern nur eine begrenzte Auswirkung auf die Blut-Hirn-Schranke hat. Eine ausführliche Analyse der Versuchsbedingungen, -abläufe und -auswertungen, unter denen Effekte nachgewiesen wurden, und derer, unter denen keine Effekte nachgewiesen wurden, muss erfolgen. Darüber hinaus ist es zum jetzigen Zeitpunkt notwendig, sich damit auseinander zu setzen, welche gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch eine veränderte Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke erfolgen könnten. In diese Betrachtungen gilt es sowohl Langzeiteffekte wie auch empfindliche Bevölkerungsgruppen einzubeziehen.

5.3.6 Kardiovaskuläres System

Die meisten der bislang durchgeführten Studien haben keine Hinweise auf akute Effekte auf Blutdruck, Herzfrequenz oder die Wellenform des Elektrokardiogramms ergeben. Wenige Arbeiten finden schwache Effekte auf die Herzfrequenz, wobei hier mögliche gesundheitliche Konsequenzen dieser Ergebnisse unbekannt sind. Dabei beziehen sich nur einige wenige Arbeiten auf die Feldbedingungen des digitalen Mobilfunks. Bei kurzzeitiger Exposition oder Untersuchungsdauer wurden in einigen der Untersuchungen keine Effekte gefunden, so z.B. in <Jauchem 2000>, <Mann 1998>, in anderen Arbeiten hingegen doch, wie z.B. <Frei 1995>.

Es gibt auch viele Kontroversen über Effekte einer Langzeitexposition von EMF auf niedrigem Niveau und nur eine kleine Anzahl von epidemiologischen Studien über kardiovaskuläre Effekte bei Langzeitexpositionen. <Bortkiewicz 1995> fanden messbare Effekte auf die Variabilität der Herzfrequenz und den Blutdruckwerten. Ebenso wurde eine nächtliche Absenkung des Blutdruckes und der Herzfrequenz gefunden.

Es wurde zur Diskussion gestellt, ob diese Ergebnisse darauf hinweisen können, dass eine Exposition von Arbeiten mit relativ starken RF-EMF über einen Zeitraum von mehreren Jahren zu einer Desynchronisation von bestimmten natürlichen diurnalen Rhythmen führt, und zwar in erster Linie von denen, die durch das autonome Nervensystem kontrolliert werden.

Es besteht im Hinblick auf die Feldbedingungen des digitalen Mobilfunks und möglicher gesundheitlicher Beeinträchtigungen auf das kardiovaskuläre System weiterer Untersuchungsbedarf.

5.3.7 Kalzium-Homöostase

<Repacholi 1998> hat in einem Review der WHO zur Literatur zu RF-Feldern dargestellt, dass diese Felder Membrankanäle beeinflussen können, wenn auch nur bei vergleichsweise hohen Intensitäten, jedoch ohne signifikanten thermischen Effekt. Es gibt Hinweise, dass RF-Felder das Membranpotential beeinflussen können und damit die Bewegung der Ionen durch die Membran hindurch.

Obwohl beim Efflux von Kalzium aus Gehirngewebe wahrscheinlich eine Anzahl weiterer Faktoren eine Rolle spielt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die bei einer Modulation von 16 Hz gefundenen Effekte in einem Zusammenhang mit den anregenden Feldern stehen.

Die Untersuchungen zur Kalzium-Homöostase erfordern die Analyse der Variation vieler Parameter, die bei der Regulierung dieses Gleichgewichts eine Rolle spielen. So ver-

fügen die Zellen selbst über Mechanismen zur Regulation, die die Beeinträchtigung durch RF-Felder ausgleichen könnten.

Die Analysemethoden haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte deutlich weiterentwickelt, so dass auch in dieses Arbeitsgebiet eine Fortführung der Untersuchungen wichtige Beiträge zum Verständnis von normalen und gestörten Prozessen der Zellkommunikation und des Transportes liefern kann.

5.3.8 Melatoninproduktionsrate

Die vorliegenden Funde hinsichtlich der Auswirkung von elektromagnetischen Feldern auf die Zirbeldrüse und die Melatoninproduktion zeigen Effekte vor allem bei sehr niedrigen Frequenzen in der Größenordnung bis 100 Hz gefunden. Für die Exposition bei Nutzung von Mobiltelefonen typischen Bedingungen trifft dies nicht zu. Es ist zu berücksichtigen, dass die Zirbeldrüse beim Menschen besser gegen die Exposition durch Mobiltelefongebrauch abgeschirmt ist, als dies bei Tierversuchen mit Kleinsäugetieren oder gar bei Zellbestrahlung der Fall ist.

Es besteht daher ein Hinweis auf möglichen Einfluss des Mobiltelefongebrauchs durch Ergebnisse aus Versuchen mit anderen Frequenzbereichen, aber kein positiver Beleg eines Effekts beim Mobiltelefongebrauch. Unklar ist außerdem das quantitative Risiko, das aus einer Erniedrigung der Melatoninproduktionsrate resultieren würde, und welche Endpunkte bzw. gesundheitliche Folgen sich daraus ergeben würden. Weitere Untersuchungen zur Klärung der offenen Fragen sollten durchgeführt werden.

5.3.9 Enzymproduktion

Hinsichtlich des Einflusses elektromagnetischer Felder auf Enzyme bestehen eine Reihe offener Fragen. So konnten zwar in einigen Untersuchungen Einflüsse auf Produktionsraten bestimmter Enzyme nachgewiesen werden, offene Fragen verbleiben aber insbesondere in folgender Hinsicht:

- Die Zahl bekannter Enzyme ist sehr groß, so dass diese nicht alle in ihrer Reaktion auf elektromagnetische Strahlung untersucht sind.
- Es ist davon auszugehen, dass nicht alle Enzyme bereits bekannt sind, so dass auch aus diesem Grund keine abschließende Bewertung möglich ist.
- Die genaue Funktion der Enzyme im menschlichen Körper ist oft nicht gesichert bekannt, so dass in vielen Fällen die Frage des Endpunkts und der Relevanz im Hin-

blick auf mögliche gesundheitliche Auswirkungen nach aktuellem Stand der Erkenntnis nicht beantwortet werden kann.

5.3.10 Fortpflanzung und Entwicklung

Die in Einzelfällen gefundenen schädigenden Effekte auf das Gewicht und auf die Entwicklung der Föten ließen sich auf die Erhöhung der Körpertemperatur der Muttertiere zurückführen und traten nur bei entsprechend hohen Feldstärken auf. In der Arbeit von Magras et al. <Magras 1997> wurden starke Abnahmen der Fruchtbarkeit von Mäusen beschrieben. Diese Arbeit muss allerdings als wissenschaftlich nicht belastbar angesehen werden, solange die Versuchsergebnisse nicht reproduziert werden können. Es bestehen daher offene Fragen im Hinblick auf Fortpflanzung und Entwicklung unter Einfluss von für die Mobiltelefonnutzung typischen Expositionsbedingungen.

5.4 Gesamtbewertung

Die vorangehend zusammengestellten gesicherten Erkenntnisse und offenen Fragen, die der Klärung bedürfen, zeigen, dass hinsichtlich der Wirkung elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf die Gesundheit des Menschen im wesentlichen offene Fragen bestehen, während gesicherte Erkenntnisse nur in sehr eingeschränktem Umfang vorliegen.

Um Aussagen über biologische Effekte elektromagnetischer Felder des Mobilfunks treffen zu können, ist es notwendig, die entscheidenden Parameter des Energieabsorptionsprozesses zu verstehen. Zwei offensichtlich wichtige Parameter sind dabei zum einen die Frequenz und zum anderen die Intensität des RF-Feldes. So stellt sich die Frage, ob bei unterschiedlichen Frequenzen unterschiedliche Effekte zu erwarten sind. Bei einem Teil der untersuchten Effekte gibt es Hinweise, dass die Frequenz die biologische Antwort bestimmt, bei anderen untersuchten Effekten ergibt sich, dass unterschiedliche Frequenzen den gleichen Effekt erzeugen.

Eine weitere wichtige Fragestellung in bezug auf biologische Effekte durch RF-Felder ist, ob es sich hierbei um kumulative Reaktionen handelt. So weisen Ergebnisse bei einer wiederholten Exposition auf eine Veränderung im Respons des Nervensystems hin, was so interpretiert werden kann, dass die Reaktion nach jeder Exposition nicht „vergessen“ wird. Darum muss untersucht werden, ob sich das biologische System nach einer wiederholten Exposition an die Störung adaptiert oder ob der Selbstregulierungsprozess nach einer kontinuierlichen Exposition versagt und ein irreparabler Schaden resultiert.

Eine weitere Schlussfolgerung aus den Forschungen ist, dass modulierte oder gepulste RF-Felder manche Effekte effektiver hervorrufen können. Diese Aussage ist wichtig, da mobile Telefone bei niedrigen Frequenzen moduliert sind. Dabei muss bei der Planung und Durchführung des Experiments im Auge behalten werden, wie groß der Anteil der niederfrequenten Felder auf die biologischen Effekte ist.

Zusammenfassend kann somit dargestellt werden, dass der Respons eines biologischen Systems auf RF-Felder durch die folgenden Parameter bestimmt wird:

- Frequenz,
- Intensität,
- Modulation,
- Wellenform,
- Dauer der Exposition,
- Anzahl der Expositions-Episoden,
- Wechselwirkung der obigen Parameter (Intensität - Expositionsdauer, etc.).

Um die Konsequenzen einer Exposition mit RF-Feldern zu verstehen, muss geklärt werden, ob es sich bei möglichen Effekten um:

- einen kumulativen Effekt handelt,
- ein kompensatorischer Respons erfolgt oder
- ein Zusammenbruch der Selbstregulierungsprozesse erfolgen kann.

Die Antworten auf diese Fragen liefern dann die Basis für weitere Betrachtungen zu adversen Effekten auf die menschliche Gesundheit.

Es ist zum jetzigen Zeitpunkt klar, dass es noch nicht genug zielgerichtete Forschungsergebnisse gibt, um aus diesen ableiten zu können, ob die normale Nutzung von mobilen Telefonen zu einer Schädigung der menschlichen Gesundheit führt. Um einen solchen Schluss ziehen zu können, müssten mögliche Wirkungsmechanismen besser verstanden werden, als dies bislang der Fall ist.

Auch gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch große Lücken in dem Kenntnisstand bezüglich biologischer Effekte. Es gibt aber viele Hinweise, dass die Exposition durch Nutzung von Mobiltelefonen biologische Effekte hervorruft, die gesundheitliche Auswirkungen zur Folge haben können.

Ein weiterer Aspekt, der zu berücksichtigen ist, ist die Abwägung von Vorteilen der Nutzung von Mobiltelefonen und der möglicherweise bestehenden Risiken. Eine solche Abwägung ist auf der Basis des derzeitigen Kenntnisstandes schon deshalb kaum zu treffen, da keine quantitativen Wirkungsbeziehungen bekannt sind. Bei der Nutzung von Mobiltelefonen wie auch der Positionierung von Sendemasten sollte der Problematik Rechnung getragen werden, dass es Personen geben kann, die auf die resultierende Exposition empfindlicher reagieren als der Durchschnitt der Bevölkerung. Zum Schutz auch dieser Personen besteht eine gesellschaftliche Verantwortung. Daraus ergeben sich aus unserer Sicht die folgenden Empfehlungen:

- Die große Zahl durchgeführter Untersuchungen und die dabei gefundenen Effekte müssen weiterhin im Rahmen einer offenen, ausführlichen und objektiven Auseinandersetzung diskutiert werden.
- Die Öffentlichkeit sollte in einen solchen Diskussionsprozess eingebunden werden, da ein zielgerichteter Diskurs nicht geführt werden kann, ohne auf die Bedenken der Öffentlichkeit einzugehen. Die gesellschaftliche Bewertung eines Risikos ist mit der subjektiven Akzeptanz des mit der Nutzung dieser Technik verbundenen Risikos gekoppelt.
- Der große technologische Schub - sowohl in Hinsicht der Verbreitung von Mobiltelefonen und Sendern als auch der Nutzung neuer Frequenzen - auf dem Sektor des Mobilfunks, sollte durch entsprechend umfangreiche Forschungen zu gesundheitlichen Auswirkungen begleitet werden.
- Durch die Forschungen sollte auch die Übertragbarkeit von Resultaten, die für andere Frequenzbereiche gefunden wurden, auf die Bedingungen des Mobilfunks intensiv überprüft werden.

6. Bewertung der Grenzwerte der 26. BImSchV und verschiedener empfohlener Grenz- und Vorsorgewerte

Auf der Basis der Ergebnisse der Auswertung und Bewertung wissenschaftlicher Arbeiten in den Kapiteln 4 und 5 wird in Kapitel 6 Stellung zu den in Deutschland geltenden Grenzwerten der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) genommen. In Kapitel 6.1 wird zunächst die Bandbreite verschiedener Empfehlungen von Grenzwerten und Vorsorgewerten exemplarisch dargestellt. In Kapitel 6.2 werden mögliche Forderungen hinsichtlich der Festlegung von Grenzwerten genannt, die in Deutschland erhoben wurden. Im Hinblick auf diese Forderungen erfolgt in Kapitel 6.3 die Bewertung der Grenzwerte.

6.1 Bandbreite verschiedener Empfehlungen von Grenzwerten und Vorsorgewerten

Es gibt eine Reihe von Empfehlungen sowohl von wissenschaftlichen Gremien als auch von anderen nichtstaatlichen Organisationen, die Grenzwerte und Vorsorgewerte nicht-ionisierender Strahlung betreffen. In Tabelle 6.1-1 sind solche Empfehlungen exemplarisch zusammengestellt. Die Auswahl ist so getroffen, dass die Bandbreite der bislang empfohlenen Grenz- bzw. Vorsorgewerte abgedeckt ist.

Die Daten in Tabelle 6.1-1 sind hier für den Frequenzbereich 0,4 bis 10 GHz zusammengestellt worden. Der jeweils gültige Frequenzbereich ist in der Tabelle genannt. Vorangestellt ist die Begrenzung durch die 26. BImSchV, in der in Deutschland die Grenzwerte festgelegt sind. Des weiteren sind aufgenommen:

- Die Grenzwerte der jüngsten Empfehlung der ICNIRP, aus dem Jahr 1998 <ICNIRP 1998>,
- die Grenzwerte der EU-Ratsempfehlung vom 30.7.1999 <EU 1999>,
-

In beiden sind niedrigere Grenzwerte festgelegt worden als in den weiter oben genannten Empfehlungen und Verordnungen.

Schließlich sind in Tabelle 6.1-1 Empfehlungen bzw. Festlegungen von deutlich niedrigeren Vorsorgewerten aufgenommen, nämlich

- Empfehlungen vom ECOLOG-Institut in Hannover <ECOLOG 2000>,
- die Festlegung einer vorläufigen zusätzlichen Begrenzung für gepulste Felder im Land Salzburg <Oberfeld 1998>, und als weitestgehende Forderung
- eine im Vorfeld zum Bürgerforum „Elektrosmog“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit am 19.10.99 in Bonn verfasste Resolution, die von verschiedenen Organisationen und Personen getragen wird <Bundesverband gegen Elektrosmog 1999>.

Tabelle 6.1-1: Bandbreite von Empfehlungen zu Grenz- und Vorsorgewerten für die Exposition mit nicht-ionisierender Strahlung im Frequenzbereich 0,4 bis 10 GHz

	elektrische Feldstärke (V/m)	magnetische Feldstärke (A/m)	magnetische Flussdichte (µT)	Leistungsflussdichte (W/m ²)	Absorptionsrate (W/kg)			Gültigkeitsbereich (GHz)
					spezifische mittlere Ganzkörper	lokale Kopf und Rumpf	Gliedmaßen	
26. BImSchV (1997)	1,375·f ^{1/2}	0,0037·f ^{1/2}	-	-	-	-	-	0,4 - 2
	61	0,16	-	-	-	-	-	2 - 10
ICNIRP (1998)	1,375·f ^{1/2}	0,0037·f ^{1/2}	0,0046·f ^{1/2}	f/200	-	-	-	0,4 - 2
	61	0,16	0,20	10	-	-	-	2 - 10
EU (1999)	1,375·f ^{1/2}	0,0037·f ^{1/2}	0,0046·f ^{1/2}	f/200	0,08	2	4	0,4 - 2
	61	0,16	0,20	10	0,08	2	4	2 - 10
Schweiz (1999)	1,375·f ^{1/2}	0,0037·f ^{1/2}	0,0046·f ^{1/2}	-	-	-	-	0,4 - 2 ^{m6}
	44·f ^{1/2}	0,12·f ^{1/2}	0,15·f ^{1/2}	-	-	-	-	0,4 - 2 ^{mP}
	61	0,16	0,20	-	-	-	-	2 - 10 ^{m6}
	1950	5,1	6,4	-	-	-	-	2 - 10 ^{mP}
Italien (1998)	20	0,05	-	1	-	-	-	0,4 - 3
	6	0,016	-	0,1	-	-	-	0,4 - 3 ^{Gb}
NRPB (1993)	-	-	-	33,21	0,4	10	10	0,9
	-	-	-	100	0,4	10	10	1,8
ECOLOG-Institut (2000)	2	-	-	0,01	-	-	-	0,4 - 2
Oberfeld (1998)	-	-	-	0,001	-	-	-	0,4 - 10
Bundesverband gegen Elektrosmog (1999)	0,2	-	-	0,0001	-	-	-	0,4 - 10 ^{u, Wb}
	0,02	-	-	0,000001	-	-	-	0,4 - 10 ^{u, Rb}
	0,02	-	-	0,000001	-	-	-	0,4 - 10 ^{g, Wb}
	0,002	-	-	0,00000001	-	-	-	0,4 - 10 ^{g, Rb}

f: Frequenz in MHz
u: un gepulst
g: gepulst
Gb: in Gebäuden, in denen sich Personen länger als 6 h/d aufhalten
m6: Mittelwert über 6 Minuten
mP: Mittelwert über Pulsdauer
Rb: Ruhe- und Schlafbereich
Wb: Wohnbereich

Die Empfehlungen und Regelungen umfassen verschiedene physikalische Größen, die begrenzt werden sollen. Als physikalisch messbare Größen gibt es die elektrische Feldstärke (Einheit V/m), die magnetische Feldstärke (Einheit A/m), die magnetische Flussdichte (Einheit μT) und die Leistungsflussdichte (Einheit W/m^2). Diesen messbaren Größen entsprechen andere Größen, die für die Auswirkungen bei Exposition des menschlichen Organismus von Interesse sind. Die im Hinblick auf diese Auswirkungen definierte Größe ist die spezifische Absorptionsrate (Einheit W/kg) in menschlichem Gewebe, bei der zwischen einer spezifischen Absorptionsrate für den mittleren Ganzkörper sowie lokal für Kopf/Rumpf und Gliedmaßen unterschieden wird.

Die Unterscheidung von physikalischen Feldgrößen (abgeleitete Grenzwerte) und der spezifischen Absorptionsrate (Basisgrenzwerte) wird nur deshalb praktiziert, da die spezifische Absorptionsrate nur mit großem Aufwand messbar ist. Die Begrenzung bezieht sich daher im allgemeinen auf die physikalischen Messgrößen, über deren Einhaltung von Grenzwerten aber die gesundheitlich relevante spezifischen Absorptionsrate ebenfalls auf einen bestimmten Wert begrenzt werden soll.

Anzumerken ist, dass derzeit eine Novellierung der 26. BImSchV geplant ist, in deren Rahmen auch weitere Begrenzungen aus der ICNIRP-Empfehlung <ICNIRP 1998> in die Verordnung übernommen werden sollen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es in Deutschland für die berufliche Exposition mit elektromagnetischen Feldern ebenfalls Vorgaben zum Schutz von Beschäftigten gibt (z.B. Normenreihe DIN VDE 0848 zum Aufenthalt von Personen in Feldern mit 0 bis 300 MHz, berufsgenossenschaftliche Vorschriften). Durch diese werden auch besondere Aspekte wie Auswirkungen auf Träger von Herzschrittmachern oder Explosionsschutz abgedeckt. Auch in den Empfehlungen der ICNIRP sind für beruflich exponierte Personen besondere Grenzwerte abgeleitet, die etwas höher sind als die der Bevölkerung, da unterschiedliche Expositionsdauern zu berücksichtigen sind.

6.2 Mögliche Forderungen hinsichtlich der Festlegung von Grenzwerten

Durch verschiedene Organisationen und Einzelpersonen werden Forderungen zum Schutz vor gesundheitlichen Gefahren elektromagnetischer Strahlung erhoben, die - teils deutlich - über bestehende Grenzwertregelungen der 26. BImSchV hinausgehen (siehe z.B. <Bundesverband gegen Elektromog 1999>). In Bezug auf den Schutz vor Expositionen durch den Mobilfunk lassen sich solche Forderungen folgenden Bereichen zuordnen:

- Einbeziehung des Vorsorgeprinzips durch Festlegung von Vorsorgewerten,
- Aufnahme eines Minimierungsgebots in die 26. BImSchV,
- Anwendung der bestehenden Grenzwerte auch auf nicht gewerblich genutzte Anlagen, insbesondere auf Mobiltelefone,
- Berücksichtigung des zunehmenden Ausmaßes der Exposition, insbesondere durch UMTS-Netze,
- Zusätzlicher Schutz besonders sensibler Personen.

Im nachfolgenden Kapitel 6.3 wird bewertet, inwiefern anhand der Ergebnisse der Kapitel 4 und 5 ein Anpassungs- oder Ergänzungsbedarf bei den Grenzwerten vorliegt.

6.3 Bewertung der in Deutschland bestehenden Grenzwertfestlegungen für den Bereich des Mobilfunks

6.3.1 Festlegung von Vorsorgewerten

Das sogenannte Vorsorgeprinzip verlangt, Schutzmaßnahmen auch bei unvollständigem Wissen vorzusehen. Es genügt dazu der Verdacht auf Schäden, wenn eine nachvollziehbare wissenschaftliche Bewertung berechtigten Grund für eine Besorgnis ergeben hat. Zur Unterscheidung von Grenzwerten, die zur Vermeidung wissenschaftlich belegter möglicher Schäden dienen sollen, werden Werte zur Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips als Vorsorgewerte bezeichnet.

Es liegt bereits ein umfangreiches Wissen über die Wirkungen elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme vor. Das Wissen umfasst theoretisch-physikalische Modelle und Wechselwirkungsmechanismen auf den verschiedensten Ebenen, vom Molekül bis zu biologischen Auswirkungen im intakten Organismus. Allerdings ist – wie auch in Kapitel 5 ausgeführt – das Wissen nicht vollständig, da eine sehr große Zahl möglicher Effekte diskutiert wird.

Als wissenschaftlich gesichert gelten zunächst thermische Effekte elektromagnetischer Felder. Die Grenzwertempfehlungen der ICNIRP, und damit insbesondere auch die darauf beruhenden Festlegungen der 26. BImSchV, basieren auf der Verhinderung thermischer Effekte. Ein besonderer „safety factor“ und „additional factor“ (dieser für die Exposition von Personen der Bevölkerung) in <ICNIRP 1998> dient nicht der Berücksichtigung eines Vorsorgeprinzips, sondern soll Unsicherheiten bei den wissenschaftlichen Experimenten (Messgenauigkeiten, Unsicherheiten aus der statistischen Auswertung von Ergebnissen etc.) sowie bekannte Unterschiede in der Empfindlichkeit abdecken. Die Summe aus „safety factor“ und „additional factor“ in <ICNIRP 1998> beläuft sich

auf den Faktor 10 für Expositionen im beruflichen Bereich und den Faktor 50 für Personen der Bevölkerung. Die von der ICNIRP empfohlenen Grenzwerte – einschließlich der genannten Faktoren - haben nicht das Ziel, jeden berichteten möglichen Effekt auszuschließen, sondern sollen vor nachgewiesenen gesundheitsschädigenden Auswirkungen elektromagnetischer Felder schützen.

Erst im Hinblick auf nicht-thermische Effekte kommt, einen ausreichenden Verdacht auf solche Effekte und damit verbundene gesundheitliche Auswirkungen vorausgesetzt, das Vorsorgeprinzip zum Tragen. In <ICNIRP 1998> wird dargelegt, dass die verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Teil keine abschließende Beurteilung über bestehende Risiken zulassen. Aus diesem Grund wird in dieser ICNIRP-Empfehlung darauf hingewiesen, dass die empfohlenen Grenzwerte regelmäßig überprüft und erforderlichenfalls angepasst werden müssen. Die Bewertung der Notwendigkeit der Einbeziehung nicht-thermischer Effekte hochfrequenter Felder in die Grenzwertfestlegung ist strittig. Dies beruht auf einer Reihe von Sachverhalten, die sich aus der Gesamtschau der in Kapitel 4 bewerteten wissenschaftlichen Arbeiten ergeben:

- Zu einzelnen Effekten liegen in verschiedenen Arbeiten unterschiedliche Befunde vor, die widersprüchlich sind, ohne dass die fehlende Konsistenz wissenschaftlich erklärt werden könnte (mangelnde Reproduzierbarkeit).
- Es bestehen Unsicherheiten bei der Frage der Zulässigkeit der Übertragung von Erkenntnissen aus Experimenten mit Zellen oder Tieren auf den menschlichen Organismus. In dieser Hinsicht muss eine Vielzahl von Vorgängen, insbesondere von komplexen Regulierungsmechanismen, verstanden sein, bevor wissenschaftlich abgesicherte Schlussfolgerungen gezogen werden können. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass auch das Nichtauffinden eines Effekts im Tierversuch damit keinen sicheren Ausschluss des Effekts beim Menschen gewährleistet.
- Auch bei tatsächlicher Beobachtung von Effekten ist oft der Schluss auf die Möglichkeit gesundheitlicher Beeinträchtigungen nach derzeitigem Erkenntnisstand nicht möglich. Ein Vergleich mit der gesundheitlichen Bewertung des Rauchens zeigt, dass dort die kausale Kette erst vor etwa drei Jahren geschlossen wurde, jedoch verfestigten sich die wissenschaftlich begründeten Verdachtsmomente, und ein Warnhinweis auf den Zigarettenpackungen wurde gesetzlich vorgeschrieben.
- Es ist bislang nicht abschließend geklärt, ob und gegebenenfalls wie sich die Pulsung hochfrequenter Felder im Vergleich zu ungepulsten Feldern auswirkt.

Gegenüber dem Zeitpunkt der Verabschiedung der Grenzwerte der 26. BImSchV bzw. der Empfehlung der ICNIRP aus dem Jahre 1998 liegt eine Vielzahl von Ergebnissen aus weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen zur Wirkung elektromagnetischer Fel-

der vor. Die im vorliegenden Gutachten vorgenommene Bewertung dieses fortgeschrittenen Erkenntnisstandes ergibt aber, dass grundlegende Unsicherheiten, wie sie weiter oben genannt werden, bislang nicht ausgeräumt sind. Die Bewertung gibt zum jetzigen Zeitpunkt keine Veranlassung zur Senkung von Grenzwerten, wenn diese auf der Basis nachweislicher gesundheitsschädigender Auswirkungen begründet werden sollen.

Ein Verdacht auf mögliche nicht-thermische Gesundheitsschäden im Sinne des Vorsorgeprinzips besteht insofern, als Ergebnisse einzelner wissenschaftlicher Arbeiten die Möglichkeit solcher Effekte nahe legen. Eine Beurteilung, inwiefern ein solcher Verdacht ausreichend im Sinne des Vorsorgeprinzips ist und daher die Festlegung von Vorsorgewerten verlangt, ist notgedrungen immer subjektiv. Aus diesem Grund müssen in die Beurteilung auch andere Gesichtspunkte einbezogen werden, unter anderem auch die Frage, welche technischen Einschränkungen sich aus der Festlegung einzuhaltender Vorsorgewerte unterhalb der Grenzwerte der 26. BImSchV ergeben würden. Aus unserer Sicht sind auf dem aktuellen Kenntnisstand die folgenden Schlussfolgerungen zu ziehen:

- Ein wissenschaftlich begründeter Verdacht auf nicht-thermische gesundheitliche Auswirkungen liegt zum jetzigen Zeitpunkt nicht vor. Damit ist hier gemeint, dass bisher kein wissenschaftlich abgesicherter Wirkungsmechanismus entdeckt wurde, dem sich eindeutig gesundheitliche Wirkungen zuordnen lassen.
- Vor diesem Hintergrund wäre es nicht gerechtfertigt, Vorsorgewerte festzulegen, die die Weiternutzung oder Etablierung einer Technik weitestgehend unterbinden würden. Dies wäre sicherlich dann der Fall, wenn Vorsorgewerte in einer Höhe festgelegt würden, wie sie in <Bundesverband gegen Elektromog 1999> gefordert wird.
- Dennoch ist es angebracht, bei der Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern Vorsicht walten zu lassen. Entsprechende Maßnahmen, die der Verbesserung des Schutzes dienen, werden in den folgenden Kapiteln diskutiert:
 - Aufnahme eines Minimierungsgebots in die 26. BImSchV,
 - Anwendung der Grenzwerte auch auf Mobiltelefone,
 - Berücksichtigung des zunehmenden Ausmaßes der Exposition,
 - zusätzlicher Schutz besonders sensibler Personen.

6.3.2 Aufnahme eines Minimierungsgebots in die 26. BImSchV

Ein Minimierungsgebot, wie es die deutsche Strahlenschutzverordnung zum Schutz vor ionisierender Strahlung festlegt, ist dann als Schutzmaßnahme sinnvoll, wenn keine Wirkungsschwelle bekannt ist. Das gleiche gilt für das ALARA-Prinzip (as low as reasonably achievable), wie es zum Beispiel zum Schutz vor ionisierender Strahlung international gebräuchlich ist.

Die grundlegende Philosophie zum Schutz vor ionisierender Strahlung geht davon aus, dass ein einzelnes Ereignis, bei dem ionisierende Strahlung auf menschliches Gewebe trifft, darin einen adversen Effekt auslösen kann. Eine solche Annahme ist in Anbetracht der Höhe der übertragbaren Energie in der Zelle auch wissenschaftlich plausibel. Reparaturmechanismen im Zellkern sind zwar vorhanden, arbeiten aber nicht so zuverlässig, dass sich daraus eine Schwellendosis ergeben würde. Einzelne Expositionen mit ionisierender Strahlung addieren sich – auch über Jahre – zu einer Gesamtdosis, die für die Wahrscheinlichkeit eines Folgeschadens maßgeblich ist.

Demgegenüber gibt es bislang keine wissenschaftlich fundierte Basis für eine kumulative Wirkung bei der Exposition mit hochfrequenten Feldern. Es kann also bisher davon ausgegangen werden, dass eine langandauernde Exposition mit niedriger spezifischer Absorptionsrate keinen größeren Effekt haben kann, als eine kurzfristige Exposition mit höherer spezifischer Absorptionsrate.

Die Tatsache, dass mit dem gepulsten elektromagnetischen Feld nicht nur Energie sondern auch Information in das biologische System eingetragen wird, wird von einigen Wissenschaftlern betont, so z.B. <V. Klitzing 1995>. Jedoch lassen sich hieraus bislang noch keine Aussagen ableiten, wie diese Information in das biologische System einkoppelt und zu welchen gesundheitlichen Auswirkungen dies führen könnte.

Eine Minimierung der Exposition mit elektromagnetischen Feldern ist aber dennoch angebracht. Dafür sprechen vor allem die folgenden Gründe:

- Elektromagnetische Felder können sehr inhomogen sein. Durch Wechselwirkungen mit Gegebenheiten im Einflussbereich des Feldes können lokal und auch zeitlich variabel sehr viel höhere oder niedrigere Felder auftreten als sich dies in einfachen Modellen, beispielsweise mit dem Abstandsgesetz, errechnen lässt. Auch messtechnisch ist es nicht praktikabel, solche Inhomogenitäten identifizieren und dann abstellen zu wollen. Eine geeignete Maßnahme zur Berücksichtigung dieses Effekts ist daher die Minimierung des Feldes, um auch bei lokal höherer Feldstärke noch einen ausreichenden Schutz erreichen zu können. Beispiele geeigneter Maßnahmen im Bereich des Mobilfunks sind:

- Minimierung der Exposition bei der Planung von Sendeanlagen des Mobilfunks. Diese kann insbesondere durch Meidung von Wohngebieten, Schulen oder Krankenhäusern als Aufstellungsort erzielt werden, sofern keine zwingenden Gründe der Netzabdeckung entgegen stehen. Im Sinne einer bewussten Risikokommunikation sollten auch von den Betreibern ermittelte Immissionswerte der Anlagen für die Öffentlichkeit einsehbar sein.
- Verwendung von Mobiltelefonen mit möglichst geringer Leistung bzw. spezifischer Absorptionsrate. In dieser Hinsicht wäre eine Kennzeichnungspflicht der Geräte sinnvoll, um die Grundlage für eine individuelle Entscheidungsfindung zu geben.
- Verwendung von Mobiltelefonen nach Möglichkeit nicht in Situationen mit besonders hoher Exposition (z.B. in geschlossenen Fahrzeugen).
- Meidung der Nutzung von Mobiltelefonen, wenn stattdessen über ein Festnetz telefoniert werden kann.

Insbesondere die letzten beiden Punkte betreffen Bereiche, die nicht durch eine Verordnung und darin festgelegte Grenzwerte geregelt werden können. Der Schutz setzt geeignetes individuelles Handeln voraus, dieses wiederum eine geeignete Information.

- Die Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern hat in jüngerer Vergangenheit stetig zugenommen, insbesondere durch Einführung von Mikrowellenherden und der Verbreitung des Mobilfunks. Dieser Trend dürfte sich noch eine Weile fortsetzen. Es sollte daher angestrebt werden, auch im Hinblick auf die Vielzahl einzelner Quellen elektromagnetischer Strahlung, die auf eine einzelne Person einwirken können, und deren voraussichtlich steigende Zahl der Minimierung einen hohen Stellenwert beizumessen. Die bisherigen Grenzwerte der 26. BImSchV beziehen sich auf einzelne gewerbliche Anlagen, während die tatsächliche Exposition von Personen in der Regel aus vielen Beiträgen zusammengesetzt ist. Im Rahmen dieser Minimierung sollte auch stets eine im Hinblick auf den Strahlenschutz optimierte Technik bevorzugt werden.

Es ist anzumerken, dass die Aufnahme eines Minimierungsgebotes in die 26. BImSchV sich nicht alleine auf hochfrequente Felder des Mobilfunks begrenzen sollte, sondern auch auf niederfrequente Felder, wie sie insbesondere bei der Nutzung von Strom im Haushalt auftreten, und ungeladene Felder.

6.3.3 Anwendung der Grenzwerte auch auf Mobiltelefone

Im vorangegangenen Kapitel 6.3.2 wurde bereits ausgeführt, dass eine Begrenzung der Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern nicht alleine auf gewerbliche Anlagen (z.B. Sender) beschränkt werden sollte, sondern auch einzelne mobile Geräte umfassen muss. Der üblichen Verwendungsdauer solcher Geräte und sonstigen typischen Einsatzbedingungen muss dabei selbstverständlich Rechnung getragen werden. Daraus ergibt sich aus unserer Sicht

- die Vorgabe einer Höchstexposition von Geräten, die in den Handel gelangen, auf der Basis des Stands der Technik dieser Geräte, sowie
- sowie die Kenntlichmachung der möglichen Exposition bei der typischen Handhabung, auch unter Berücksichtigung von Personengruppen wie den Viel-Nutzern (nach Möglichkeit einschließlich Angaben zur spezifischen Absorptionsrate bei Nutzern verschiedener Altersgruppen).

6.3.4 Berücksichtigung des zunehmenden Ausmaßes der Exposition

Der Aspekt der Berücksichtigung des zunehmenden Ausmaßes der Exposition durch elektromagnetische Felder wurde weiter oben in Kapitel 6.3.2 bereits diskutiert. An dieser Stelle sei nochmals betont, dass diesem Aspekten im Rahmen der Minimierung der Exposition Rechnung getragen werden kann.

6.3.5 Zusätzlicher Schutz besonders sensibler Personen

Es ist auch vom wissenschaftlichen Standpunkt her als plausibel anzusehen, dass es bestimmte Personengruppen gibt, die gegenüber elektromagnetischer Strahlung empfindlicher reagieren können als andere. Hierzu zwei Beispiele:

- Bei der Nutzung eines Mobiltelefons durch Kinder ist davon auszugehen, dass in relevantem Gewebe eine höhere spezifische Absorptionsrate auftritt als bei Erwachsenen unter sonst gleichen Bedingungen.
- Personen, die unter Krankheiten leiden, die das Nervensystem betreffen, könnten durch elektromagnetische Felder besonders belastet werden. Die hängt mit den physikalischen Wechselwirkungen der Felder und dem Nervensystem zusammen.

Beispielsweise in <Bundesverband gegen Elektromog 1999> werden Schutzzonen in bestimmten Bereichen gefordert, da in bestimmten Gruppen der Bevölkerung ein größerer Anteil verstärkt elektrosensibler Personen vermutet wird. Die Schaffung von

Schutzzonen insbesondere in Krankenhäusern, Kindergärten und Schulen sehen wir als eine wichtige Maßnahme an, zunehmender Exposition zu begegnen. Solche Schutzzonen sollten sich dadurch auszeichnen, dass von außen einwirkende Felder durch entsprechende Entfernung zu ihren Quellen oder Abschirmmaßnahmen gering gehalten werden und Strahlungsquellen in den Zonen minimiert werden. Wir sind uns aber der technischen Erfordernisse und der Tatsache, dass solche Maßnahmen teilweise erst längerfristig wirksam werden können, bewusst. Bei der Neuerrichtung von Anlagen und Einrichtungen, von denen elektromagnetische Felder ausgehen, sowie bei der Planung insbesondere von Krankenhäusern, Kindergärten und Schulen sollte diesem Gedanken Rechnung getragen werden.

7. Zusammenfassung

Das Öko-Institut e.V. wurde von der DeTeMobil Deutsche Telekom MobilNet GmbH (T-Mobil) mit einem Gutachten beauftragt, das sich mit dem aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstand hinsichtlich gesundheitlicher Auswirkungen des Mobilfunks befasste. Im Rahmen dieses Gutachtens wurde international publizierte wissenschaftliche Literatur zu Effekten der Exposition mit elektromagnetischen Feldern ausgewertet und bewertet.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass hinsichtlich der Wirkung elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf die Gesundheit des Menschen im wesentlichen offene Fragen bestehen, während gesicherte Erkenntnisse nur in sehr eingeschränktem Umfang vorliegen. Bei der Nutzung der Mobilfunktechnologie sollte der Problematik Rechnung getragen werden, dass es Personen geben kann, die auf die resultierende Exposition empfindlicher reagieren als der Durchschnitt der Bevölkerung. Zum Schutz auch dieser Personen besteht eine gesellschaftliche Verantwortung. Das Gutachten kommt zu folgenden Empfehlungen:

- Die große Zahl durchgeführter Untersuchungen und die dabei gefundenen Effekte müssen weiterhin im Rahmen einer offenen, ausführlichen und objektiven Auseinandersetzung diskutiert werden.
- Die Öffentlichkeit sollte in einen solchen Diskussionsprozess eingebunden werden, da ein zielgerichteter Diskurs nicht geführt werden kann, ohne auf die Bedenken der Öffentlichkeit einzugehen. Die gesellschaftliche Bewertung eines Risikos ist mit der subjektiven Akzeptanz des mit der Nutzung dieser Technik verbundenen Risikos gekoppelt.
- Der große technologische Schub - sowohl in Hinsicht der Verbreitung von Mobiltelefonen und Sendern als auch der Nutzung neuer Frequenzen - auf dem Sektor des Mobilfunks, sollte durch entsprechend umfangreiche Forschungen zu gesundheitlichen Auswirkungen begleitet werden.
- Durch die Forschungen sollte auch die Übertragbarkeit von Resultaten, die für andere Frequenzbereiche gefunden wurden, auf die Bedingungen des Mobilfunks intensiv überprüft werden.
- Eine Minimierung der Exposition von Personen der Bevölkerung mit elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks ist geboten, um lokale und zeitlichen Inhomogenitäten der Felder und die Zunahme ihrer Quellen zu berücksichtigen.
- Die von Mobiltelefonen ausgehende Strahlung sollte bei deren Kauf angegeben werden, so dass sich Nutzer beim Kauf für strahlungsarme Geräte entscheiden können.

nen (Einführung einer Kennzeichnungspflicht). Um die individuelle Minimierung bei Gebrauch eines Mobiltelefons zu unterstützen ist auch eine umfassende Information der Öffentlichkeit erforderlich.

- Schutzzonen in Krankenhäusern, Kindergärten und Schulen sollten geschaffen werden, um Personengruppen, die eine erhöhte Empfindlichkeit aufweisen können, besonders zu schützen.

Literaturverzeichnis

- Adey 1982 W.R. Adey et al.: Effects of weak amplitude-modulated microwave fields on calcium efflux from awake cat cerebral cortex. *Bioelectromagnetics* 3:295–307, 1982
- Adey 1999 W.R. Adey et al.: Spontaneous and nitrosurea-induced primary tumours of the central nervous system in Fischer 344 Rats chronically exposed to 836 MHz modulated microwaves. - *Radiation Research* 152, 293–302, 1999
- Bahr 1999 A. Bahr et al.: Arbeitsschutz im Nahbereich sendender Mobilfunkantennen. - In: Fachverband für Strahlenschutz: Nicht-ionisierende Strahlung, 31. Jahrestagung, Köln, 27. Sept. – 1. Okt. 1999, Band II, S. 893ff
- Balcer-Kubiczek 1985 E.K. Balcer-Kubiczek et al.: Evidence for microwave carcinogenesis in vitro. - *Carcinogenesis* 6 (6), 859–864, 1985
- Balcer-Kubiczek 1991 E.K. Balcer-Kubiczek et al.: Neoplastic transformation of C3H/10½ cells following Exposure to 120 Hz Modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. - *Radiation Research* 126, 65–72, 1991
- Balode 1996 Z. Balode: Assessment of radio-frequency electromagnetic radiation by the micronucleus test in Bovine peripheral erythrocytes. - *The Science of the Total Environment* 180, 81–85, 1996
- Bernardi 1989 P. Bernard et al.: The patch-clamp technique in the study of electromagnetic field effects on biological structures. - *Alta Frequenza*, 58, 355-360, 1989
- Blackman 1982 C.F. Blackman, S.G. Benane, L.S. Kinney, W.T. Joines, D.E. House: Effects of ELF fields on calcium-ion efflux from brain tissue in vitro – *Radiat Res*, 93 (3), 510-520, 1982
- Blackman 1985 C. F. Blackman et al.: Effects of ELF (1–120 Hz) and modulated (50 Hz) RF fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro. - *Bioelectromagnetics* 6, 1–11, 1985
- Blackman 1988 C. F. Blackman et al.: Influence of electromagnetic fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro: a three-model analysis consistent with the frequency response up to 510 Hz. - *Bioelectromagnetics* 9, 215–227, 1988
- Blackman 1989 C.F. Blackman, L.S. Kinney, D.E. House, W.T. Joines: Multiple power density windows and their possible origin, *Bioelectromagnetics* 10, 115-128, 1989

- Blackman 1999 C. F. Blackman et al.: Experimental determination of hydrogen bandwidth for the ion parametric resonance model. *Bioelectromagnetics* 20 (1), 5–12, 1999
- Borbély 1999 A.A. Borbély et al.: Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. - *Neuroscience Letters* 275, 207–210, 1999
- Bortkiewicz 1995 A. Bortkiewicz, M. Zmyslony, C. Palczynski, E. Gadzicka, S. Szigielski: Dysregulation of autonomic control of cardiac function in workers at AM broadcasting stations (0,738 – 1,503 MHz), *Elektromagnetiobiol*, 14, 177-192, 1995
- Brix 1999 J. Brix: Erkenntnisse über biologische Wirkungen und gesundheitliche Auswirkungen – Stand der Forschung und Forschungsprogramme: Aktuelle Forschung in der Bundesrepublik -. – In: *Funkwendungen – Technische Perspektiven, biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen*. – Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 38, 1999
- Bundesverband gegen Elektrosmog 1999: Resolution – Verabschiedet im Vorfeld zum Bürgerforum „Elektrosmog“ des Bundesministeriums für Umwelt am 19.10.99 in Bonn – Betrifft: Minimierung der allgemeinen Elektrobelastung. – Getragen von: Bundesverband gegen Elektrosmog e.V., Hohenstein, Prof. Dr. med. H.-J. Pesch, Würzburg, Interdisziplinäre Gesellschaft für Umweltmedizin e.V., Bad Säckingen, Ökologischer Ärztebund, Bremen, Institut für Umweltkrankheiten, Bad Emstal, Dr. L. von Klitzing, Lübeck, Dr. U. Warnke, Saarbrücken, Baubiologie Maes (Neuss), Arbeitsgemeinschaft für Wohn- und Baubiologie e.V. (Heidelberg), Berufsverband Deutscher Baubiologen VdB e.V. (Lauf), Politischer Arbeitskreis von Patienten-Initiativen Umwelterkrankter (München), Selbsthilfverein für Elektrosensible e.V. (München), Arbeitskreis für Elektrosensible (Bochum), Selbsthilfegruppe Elektrosmog (Bayreuth)
- Byus 1988 C.V. Byus et al.: Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. - *Cancer Research* 48, 4222–4226, 1988
- Cain 1997 C.D. Cain et al.: Focus formation of C3H/10T^{1/2} cells and exposure to a 836.55 MHz modulated radiofrequency field. - *Bioelectromagnetics* 18, 237–243, 1997
- Carafoli 1986 E. Carafoli et al.: Das Calcium-Signal. - *Spektrum der Wissenschaft* 17, 76-85, 1986

- Chou 1985 C.-K. Chou et al.: Auditory response in rats exposed to 2450 MHz electromagnetic fields in a circularly polarized waveguide. - *Bioelectromagnetics* 6, 323-326, 1985
- Chou 1992 C.-K. Chou et al.: Long-term, low-level microwave irradiation of rats. - *Bioelectromagnetics* 13, 469-496, 1992
- Crasson 1999 M. Crasson et al.: 50 Hz magnetic field exposure influence on human performance and psychophysiological parameters: two double-blind experimental studies. - *Bioelectromagnetics* 20 (8), 474-486, 1999
- de Seze 1999 R. de Seze et al.: Evaluation in humans of the effects of radiocellular telephones on the circadian patterns of melatonin secretion, a chronobiological rhythm marker. - *Journal of Pineal Research* 27, 237-242, 1999
- ECOLOG-Institut 2000 ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH: EMF-Monitor 2/00, S. 7, Hannover 2000
- EU 1999 Der Rat der Europäischen Union: Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz). – 1999/519/EG, Amtsblatt L 199/59 vom 30.7.1999
- Fahrig 1994 R. Fahrig: Genotoxizität. - In: H. Marquardt et al. (Hrsg.): *Lehrbuch der Toxikologie*. - B.I.Wissenschaftsverlag, Mannheim 1994
- Flesch-Janys 1989 D Flesch-Janys et al.: Limitations of Epidemiology in Assessing Cancer Risks from Experimental Sources. - *Experimental Pathology*, 37, 1989
- Frei 1995 M.R. Frei: Frequency and orientation effects on site of energy deposition. - In: B.H. Klauenberg et al.: *Radiofrequency radiation standards: Biological effects, dosimetry, epidemiology, and public health policy*. - New York, Plenum Press, 295 – 301, 1995
- Frei 1998a M.R. Frei et al.: Chronic exposure of cancer-prone mice to low-level 2450 MHz radiofrequency radiation. - *Bioelectromagnetics* 19, 20-31, 1999
- Frei 1998b M.R. Frei et al.: Chronic, low-level (1.0 W/kg) exposure of mice prone to mammary cancer to 2450 MHz Microwaves. - *Radiation Research* 150, 568-576, 1998
- Fritze 1997a K. Fritze et al.: Effect of global system for mobile communication (GSM) microwave exposure on blood-brain permeability in rat. *Acta Neuropathol.* (1997) 94:465-470 (Auch el.)

- Galvanovskis 1998 J. Galvanovskis et al.: Periodic forcing of intracellular calcium oscillators – Theoretical studies of the effects of low frequency fields on the magnitude of oscillations. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 1998, 46(2) 161–174
- Galvanovskis 1999 J. Galvanovskis et al.: Cytoplasmic Ca²⁺ oscillations in human leukemia T-cells are reduced by 50 Hz magnetic fields. - *Bioelectromagnetics* 20 (5), 269–276, 1999
- Galvin 1980 M.J. Galvin et al.: Microwave irradiation and in vitro release of enzymes from hepatic lysosomes. – *Radiation and Environmental Biophysics* 18/2, 129-136, 1980
- Galvin 1981 M.J. Galvin et al.: Influence of 2.45 GHz Microwave Radiation on Enzyme Activity. – *Radiation and Environmental Biophysics* 19/2, 149-156, 1981
- Garn 1999 H. Garn: Messung von HF-Feldern im Kopf. – In: *Funkwendungen – Technische Perspektiven, biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen. – Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 38, 1999*
- Garvert 1999 D. Garvert: Funkwelt heute und morgen – Stand der Technik und zukünftige Entwicklungen, Grundlagen, Ausbau bestehender Netze, geplante Entwicklung. – In: *Funkwendungen – Technische Perspektiven, biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen. – Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 38, 1999*
- Gehlen 1996 W. Gehlen et al.: Biologisch-zerebrale Effekte in niederfrequent gepulsten Hochfrequenzfeldern. *Edition Wissenschaft Nr. 12, Dezember 1996 (Auch el.)*
- Gos 1997 P. Gos et al.: Extremely high frequency EMFs at low power density do not affect the division of exponential phase *Saccharomyces cerevisiae* cells. - *Bioelectromagnetics* 18 (2), 142–155, 1997
- Goswami 1999 P.C. Goswami et al.: Proto-oncogene mRNA Levels and Activities of Multiple Transcription Factors in C3H 10T $\frac{1}{2}$ Murine Embryonic Fibroblasts Exposed to 835.62 and 847.74 MHz Cellular Phone Communication Frequency Radiation. - *Radiation Research* 151, 300–309, 1999
- Graham 1999 C. Graham et al.: Human sleep in 60 Hz magnetic fields. - *Bioelectromagnetics* 20 (5), 277–283, 1999
- Hansen 1996 V. Hansen: Leitfaden für Experimente zur Untersuchung der Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme. *Hochfrequenztechnische Aspekte. - Edition Wissenschaft Nr. 11, September 1996*

- Hardell 1999a L. Hardell et al.: Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: A case-control study. - *International Journal of Oncology* 15, 113–116, 1999
- Hardell 1999b L. Hardell et al.: Angiosarcoma of the Scalp and Use of a Cordless (Portable) Telephone. - *Epidemiology*, November 1999, Vol. 10 No. 6, 785f, 1999
- ICNIRP 1998 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). – *Health Physics*, Vol. 74 No 4, p. 494-522 (1998)
- IEGMP 2000 Independent Expert Group on Mobile Phones (IEGMP): Mobile Phones and Health. IGEMP. - National Radiological Protection Board, Oxon, England, 2000
- Ivaschuk 1997 O.I. Ivaschuk et al.: Exposure of nerve growth factor treated PC12 rat pheochromocytoma cells to a modulated radiofrequency field at 836.55 MHz: effects on c-jun and c-fos expression. - *Bioelectromagnetics* 18, 223–229, 1997
- Jahre 1996 K. Jahre et al.: Der Einfluß von gepulsten elektromagnetischen Feldern auf das Elektroenzephalogramm von Menschen. - *Edition Wissenschaft* Nr. 9, Juli 1996
- Jauchem 1998 J.R. Jauchem et al.: Ultra-wideband electromagnetic pulses: lack of effects on heart rate and blood pressure during two-minute exposures of rats. *Bioelectromagnetics* 19(5): 330–333, 1998
- Jauchem 2000 J.R. Jauchem et al.: Cardiovascular and thermal effects of microwave irradiation at 1 and/or 10 GHz in anesthetized rats. - *Bioelectromagnetics* 21 (3), 159–66, 2000
- Jensh 1983a R.P. Jensh: An evaluation of the teratogenic potential of protracted exposure of pregnant rats to 2450-MHz-microwave radiation. I. Morphologic analysis at term. - *Journal Toxicol. Environ. Health* 11, 23–35, 1983
- Jensh 1983b R.P. Jensh: An evaluation of the teratogenic potential of protracted exposure of pregnant rats to 2450-MHz-microwave radiation. II. Postnatal psychophysiologic analysis. - *Journal Toxicol. Environ. Health* 11, 37–59, 1983
- Jensh 1984a R.P. Jensh: Studies of the teratogenic potential of exposure of rats to 6000 MHz microwave radiation. I. Morphologic analysis at term. - *Radiation Research* 97, 272–281, 1984
- Jensh 1984b R.P. Jensh: Studies of the teratogenic potential of exposure of rats to 6000 MHz microwave radiation. II. Postnatal psychophysiologic evaluation. - *Radiation Research* 97, 282–301, 1984

- Jensh 1997 R.P. Jensh: Behavioral teratologic studies using microwave radiation: is there an increased risk form exposure to cellular phones and microwave ovens? - *Reproduction Toxicology* 11 (4), 601–611, 1997
- Kavaliers 1987 M. Kavaliers et al.: Calcium channel involvement in magnetic field inhibition of morphine-induced analgesia. - *Arch Phamacol* 336, 308-315, 1987
- Koivisto 2000 M. Koivisto et al.: Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. - *Neuroreport* 11 (2), 413–415, 2000
- Kubinyi 1996 G. Kubinyi et al.: Effect of continuous-wave and amplitude-modulated 2.45 GHz microwave radiation on the liver and brain aminoacyl-transfer RNA synthetases of in utero exposed mice. - *Bioelectromagnetics* 17 (6), 497-503, 1996
- Kullnick 1992 U. Kullnick et al.: Influence of weak non-thermic highfrequency eletromagnetic fields on the resting potential of nerve cells. - *Bioelectrochem Bioenerg* 27, 293-304, 1992
- Kwee 1998 S. Kwee et al.: Changes in cell proliferation due to environmental non-ionizing radiation 2. Microwave radiation. - *Bioelectrochem. Bioenerg.* 44, 251–255, 1998
- Lai 1989 H. Lai et al.: Low-level microwave irradiation and central cholinergic systems. – *Pharmacol. Biochem. Behaviour* 33, 131-138, 1989
- Lai 1994 H. Lai et al.: Microwave Irradiation Affects Radial-Arm Maze Performance in the Rat. - *Bioelectromagnetics* 15 (2), 95ff, 1994
- Lai 1995 H. Lai et al.: Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. - *Bioelectromagnetics* 16, 207–210, 1995
- Lai 1996a H. Lai: Spatial learning deficit in the rat after exposure to a 60 Hz magnetic field. - *Bioelectromagnetics* 17(6), 494–496, 1996
- Lai 1996b H. Lai et al.: Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. - *International Journal of Radiation Biology* 69 (4), 513–521, 1996
- Liboff 1985 A.R. Liboff: Cyclotron resonance in membrane transport. In: A. Chiabrera et al.: *Interactions between electromagnetic fields and cells.* - Plenum, London, 281, 1985
- Lin 1980a J.C. Lin et al.: Studies on Microwave and Blood-Brain Barrier Interaction. *Bioelectromagnetics* 1(3):313–323, 1980

- Lindström 1993 E. Lindström et al.: Intracellular calcium oscillations induced in a T-cell line by a weak 50 Hz magnetic field. – *Journal of Cellular Physiology* 156, 395-398, 1993
- Litovitz 1993 T.A. Litovitz et al.: The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. - *Bioelectromagnetics* 14, 395–403, 1993
- Lu 1999 S.T. Lu et al.: Ultrawide-Band Electromagnetic Pulses Induced Hypotension in Rats. - *Physiology & Behavior*. 65 (4/5), 753–761, 1999
- Lu 1983 S.-T. Lu et al.: Increased serum enzyme activity in microwave-exposed rats. - *Radiation Research* 96/1, 152-159, 1983
- Maes 1993 A. Maes et al.: In vitro cytogenetic effects of 2450 MHz waves on human peripheral blood lymphocytes. - *Bioelectromagnetics* 14, 495–501, 1993
- Maes 1995 A. Maes et al.: Cytogenetic effects of microwaves from mobile communication frequencies (954 MHz). - *Electro- and Magnetobiology* 14 (2), 91–98, 1995
- Maes 1997 A. Maes et al.: Cytogenetic effects of 935.2-MHz (GSM) microwaves alone and in combination with mitomycin. - *Mutation Research* 393 (1–2), 151–156, 1997
- Magras 1997 I.N. Magras et al.: RF radiation-induced changes in the pre-natal development of mice. - *Bioelectromagnetics* 18 (6), 455–461, 1997
- Malyapa 1997a R.S. Malyapa et al.: Measurement of DNA damage after exposure to 2450 MHz electromagnetic radiation. - *Radiation Research* 148, 608–617, 1997
- Malyapa 1997b R.S. Malyapa et al.: Measurement of DNA damage after exposure to electromagnetic radiation in the cellular phone communication frequency band (835.62 and 847.74 MHz). - *Radiation Research* 148, 618–627, 1997
- Mann 1996 K. Mann et al.: Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep. - *Neuropsychobiology* 33 (1), 41–47, 1996
- Matthes 1999 R. Matthes: Empfehlungen der “International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection” (ICNIRP). - In: *Funkwendungen – Technische Perspektiven, biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen. – Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 38*, 1999
- Meyer 1995 R. Meyer et al.: Biologische Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern. Abschlußbericht des

- Teilprojekts: Der Einfluß hochfrequenter elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf die Calcium-Homöostase von Herzmuskelzellen und Lymphozyten. - Edition Wissenschaft Nr. 2, Dezember 1995
- Ministero dell' Ambiente 1998: Ministero dell' Ambiente (Italien): Decreto 10 settembre 1998, n. 381
- Miura 1991 M. Miura et al.: Non-thermal vasodilatation by radiofrequency bursttype electromagnetic field radiation in the frog. - *J. Physiol*, 435, 257-273, 1991
- Miura 1993 M. Miura et al.: Increase in nitric oxide and cyclic GMP of rat cerebellum by radiofrequency burst-type electromagnetic radiation. - *J. Physiol*, 461, 513-524, 1993
- Nelson 1997 B.K. Nelson et al.: Interactions of RF radiation-induced hyperthermia and 2-methoxyethanol teratogenicity in rats. - *Bioelectromagnetics* 18 (5), 349-359, 1997
- Nelson 1998 B.K. Nelson et al.: Effect of environmental temperature on the interactive developmental toxicity of radiofrequency radiation and 2-methoxyethanol in rats. - *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 71, 413-423, 1998
- Nelson 1999 B.K. Nelson et al.: Developmental toxicity interactions of salicylic acid and radiofrequency radiation or 2-methoxyethanol in rats. - *Reproduction Toxicology* 13 (2), 137-145, 1999
- Oberfeld 1998 G. Oberfeld et al.: Preliminary standard for pulsed EMF in Salzburg. - Workshop on possible biological and health effects of RF electromagnetic fields, Wien, 25.-28.10.1998
- O'Connor 1999 M.E. O'Connor: Intrauterine effects in animals exposed to radiofrequency and microwave fields. - *Teratology* 59, 287-291, 1999
- Persson 1992 B.R.R. Persson et al.: Increased permeability of the blood-brain barrier induced by magnetic and electromagnetic fields. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 649:356-358, 1992
- Persson 1997 B.R.R. Persson et al.: Blood-brain barrier permeability in rats exposed to electromagnetic fields used in wireless communication, *Wireless networks*, 3, 455-461, 1997
- Phillips 1998 J.L. Phillips et al.: DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radiofrequency fields in vitro. - *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 45, 103ff, 1998

- Preece 1998 A.W. Preece et al.: The effect of a 50 Hz magnetic field on cognitive function in humans. - *International Journal of Radiation Biology*, 74 (4), 463–470, 1998
- Preece 1999 A.W. Preece et al.: Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man. - *International Journal of Radiation Biology*, 75 (4), 447–456, 1999
- Rasmussen 1989 H. Rasmussen: Der Membrankreislauf von Calcium als intrazelluläres Signal. - *Spektrum der Wissenschaft* 12, 128-135, 1989
- Reiser 1995 H. Reiser et al.: The influence of electromagnetic fields on human brain activity. *Eur. J. Med. Res.* 1(1): 27–32, 1995
- Reiter 1998 R.J. Reiter et al: Inconsistent suppression of nocturnal pineal melatonin synthesis and serum melatonin levels in rats exposed to pulsed DC magnetic fields. - *Bioelectromagnetics* 19 (5), 318–29, 1998
- Repacholi 1997 M. H. Repacholi et al.: Lymphomas in E μ -Pim 1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. - *Radiation Research* 147 (5), 631–640, 1997
- Repacholi 1998 M.H. Repacholi et al. (Hrsg.): EMF Risk Perception and Communication. International Seminar on EMF Risk Perception and Communication. - World Health Organization. WHO/SDE/OEH 99.01. 290 S., August 1998
- Röschke 1997 J. Röschke et al.: No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram. *Bioelectromagnetics* 18(2):172–176, 1997
- Rosen 1998 L.A. Rosen et al.: A 0.5 G, 60 Hz magnetic field suppresses melatonin production in pinealocytes. - *Bioelectromagnetics* 19, 123–127, 1998
- Rothman 1996 K.J. Rothman et al.: Overall mortality of cellular telephone customers. - *Epidemiology* 7, 303–305, 1996
- Ruppe 1999 I. Ruppe et al.: Wirkungen von niederfrequent gepulsten Feldern auf den Menschen – Fallbeschreibungen und Untersuchungen an Probanden. - In: *Funkwendungen – Technische Perspektiven, biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen. – Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 38*, 1999
- Salford 1993 L. G. Salford et al.: Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. – *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 30, 313–318, 1993

- Salford 1994 L.G. Salford et al.: 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, 1994
- Santini 1988 R. Santini et al.: B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. - *Bioelectromagnetics* 9, 105–107, 1988
- Schulte-Hermann 1994 R. Schulte-Hermann et al.: Tumorpromotion. - In: H. Marquardt et al. (Hrsg.): *Lehrbuch der Toxikologie*. - B.I. Wissenschaftsverlag, Mannheim 1994
- Schweizerischer Bundesrat 1999: Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) vom 23.12.1999
- Seiler 1997 B. Seiler: *taschenbuch der telekom praxis 1997*. – Berlin 1997
- Sienkiewicz 1996 Z. Sienkiewicz et al.: Acute exposure to power-frequency magnetic fields has no effect on the acquisition of a spatial learning task by adult male mice. - *Bioelectromagnetics* 17 (3), 180–6, 1996
- Sienkiewicz 2000 Z. Sienkiewicz et al.: Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice. - *Bioelectromagnetics* 21 (3),151–158, 2000
- Stagg 1997 R.B. Stagg et al.: DNA synthesis and cell proliferation in C₆ glioma and primary glial cells exposed to a 836.55 MHz modulated radiofrequency field. - *Bioelectromagnetics* 18, 230-236, 1997
- Szmigielski 1982 S. Szmigielski et al.: Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. -*Bioelectromagnetics* 3, 179–191, 1982
- Szmigielski 1998 S. Szmigielski et al.: Alteration of diurnal rhythms of blood pressure and heart rate to workers exposed to radiofrequency electromagnetic fields. *Blood Press. Monit.* 3(6): 323–330, 1998
- Toler 1997 J.C. Toler et al.: Long-term, low-level exposure of mice prone to mammary tumours to 435 MHz radiofrequency radiation. - *Radiation Research* 148, 227–234, 1997
- Vollrath 1997 L. Vollrath et al.: No short-term effects of high-frequency electromagnetic fields on the mammalian pineal gland. - *Bioelectromagnetics* 18 (5), 376–387, 1997

- von Klitzing 1995 L. von Klitzing: Low-frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man. *Phys. Medica* 11: 77–80, 1995
- Wagner 1998 P. Wagner et al.: Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: A polysomnographic study using standardized conditions. - *Bioelectromagnetics* 19 (3), 199–202, 1998
- Wang 2000 B.M. Wang et al.: Acute exposure to pulsed 2450-MHz microwaves affects water maze learning in the rat. - *Bioelectromagnetics* 21, 52–56, 2000
- Welker 1983 H.A. Welker et al.: Effects of an artificial magnetic field on serotonin N-Acetyltransferase activity and melatonin content of the rat pineal gland. - *Experimental Brain Research* 50, 426-432, 1983
- Wolke 1996 S. Wolke et al.: Calcium homeostasis of isolated heart muscle cells exposed to pulsed high-frequency electromagnetic fields. - *Bioelectromagnetics* 17 (2), 144–153, 1996
- Wu 1994 R. Y. Wu et al.: Effects of 2.45-GHz microwave radiation and phorbol ester 12-O-tetradecanoylphorbol-13-acetate on dimethylhydrazine-induced colon cancer in mice. - *Bioelectromagnetics* 15, 531–538, 1994