



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 173. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 04. Juli 2001
Gebilligt in der 174. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 13./14. September 2001

	Seite
1	Einführung 5
2	Erläuterung zentraler Begriffe und Methodik der Bewertung..... 6
3	Zusammenfassende Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes..... 7
3.1	Statische elektrische und magnetische Felder 7
3.1.1	Statische elektrische Felder 7
3.1.2	Statische magnetische Felder 8
3.2	Niederfrequente elektrische und magnetische Felder 8
3.2.1	Niederfrequente Magnetfelder und Krebs; epidemiologische Studien 9
3.2.2	Niederfrequente Felder und neurodegenerative Erkrankungen, Einflüsse auf die Reproduktion und andere gesundheitliche Beeinträchtigungen außer Krebs 10
3.2.3	Tabellarische Zusammenfassung 11
3.3	Hochfrequente elektromagnetische Felder 11
3.3.1	Interaktionen hochfrequenter elektromagnetischer Felder mit Molekülen und Membranen..... 12
3.3.2	Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Menschen und Tiere 12
3.3.3	Epidemiologische Studien 14
3.3.4	Tabellarische Zusammenfassung 14
4	Schlussfolgerungen und Empfehlungen zum Schutz der Bevölkerung..... 15
4.1	Empfehlungen zum Schutz vor nachgewiesenen Gesundheitsbeeinträchtigungen..... 15
4.2	Empfehlungen zur Vorsorge 16
5	Empfehlungen zur Forschung..... 17

Anhang

Wissenschaftliche Begründung für Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung 18

A 1	Wissenschaftlich nachgewiesene Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen.....	18
A 1.1	Niederfrequente elektrische und magnetische Felder (1 Hz-100 kHz)	18
A 1.2	Hochfrequente elektromagnetische Felder (100 kHz–300 GHz).....	19
A 1.3	Störbeeinflussung von elektronischen Körperhilfen und Implantaten	20
A 2	Bewertung wissenschaftlicher Studien niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder seit 1998	21
A 2.1	Niederfrequente Felder und Krebs	21
A 2.1.1	Tierexperimentelle Studien zu Krebs	22
A 2.1.2	Epidemiologische Studien zu Krebs bei Kindern.....	23
A 2.1.3	Epidemiologische Studien zu Krebs bei Erwachsenen	24
A 2.2	Niederfrequente Felder und neurodegenerative Erkrankungen, Einflüsse auf die Reproduktion und andere gesundheitliche Beeinträchtigungen außer Krebs	25
A 2.2.1	Epidemiologische Studien zu neurodegenerativen Erkrankungen	25
A 2.2.2	Einflüsse auf die Reproduktion, teratogene Reaktionen	26
A 2.2.3	Einflüsse auf das kardiovaskuläre System	26
A 2.2.4	Einflüsse auf den Melatoninhaushalt	27
A 2.2.5	Einflüsse auf das zentrale Nervensystem (ZNS) und Beeinflussung kognitiver Funktionen.....	28
A 2.2.6	Untersuchungen zu Beeinflussungen des Schlafes	28
A 2.2.7	Psychische Beeinflussungen wie z.B. Depression und Suizid	28
A 2.2.8	Elektrosensibilität.....	29
A 3	Bewertung wissenschaftlicher Studien hochfrequenter elektromagnetischer Felder seit 1998	30
A 3.1	Interaktionen hochfrequenter elektromagnetischer Felder mit Zellen und subzellulären Strukturen.....	30
A 3.1.1	Moleküle und Membranen	30
A 3.1.2	Kalzium	30
A 3.2	Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Menschen und Tiere	31

A 3.2.1	Verhalten bei Tieren	31
A 3.2.2	Elektroenzephalogramm beim Menschen	32
A 3.2.3	Schlaf.....	33
A 3.2.4	Kognitive Funktionen beim Menschen	33
A 3.2.5	Blut-Hirn-Schranke bei Ratten.....	34
A 3.2.6	Melatonin bei Tieren und bei Menschen.....	34
A 3.2.7	Blutparameter und Immunsystem	35
A 3.2.8	Reproduktion und Entwicklung.....	35
A 3.3	Hochfrequente elektromagnetische Felder und Krebs	36
A 3.3.1	Untersuchungen zu krebsrelevanten Proteinen, Krebsentstehung und -promotion	36
A 3.3.2	Spontane und initiierte Tumorbildung	37
A 3.3.3	Epidemiologische Studien.....	38
	Literatur zu A1 - A3.....	39
A 4	Grenzwerte.....	53
	Auszüge aus der Empfehlung der Strahlenschutzkommission „Schutz der Bevölkerung bei Exposition durch elektromagnetische Felder (bis 300 GHz)“ und der ICNIRP-„Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)“,.....	53

1 Einführung

In der Öffentlichkeit kam die Risiko-Diskussion im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern in den 80er Jahren mit der Einführung von Mikrowellenherden im Haushalt und der zunehmenden Verwendung von Bildschirmgeräten im Büro auf. Seit Ende der 80er Jahre hat die öffentliche Diskussion der Frage möglicher Gesundheitsbeeinträchtigungen durch nieder- und hochfrequente Felder zugenommen. Ab den 90er Jahren sind Mobilfunksendemasten und Handys in den Mittelpunkt der Diskussion gerückt, die sich durch die geplante Einführung der UMTS-Technologie noch deutlich verstärkt hat.

Die Strahlenschutzkommission (SSK) ist vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gebeten worden, in Vorbereitung der Novellierung der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV) [1] den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse zu Gesundheitsbeeinträchtigungen durch statische und niederfrequente elektrische und magnetische sowie hochfrequente elektromagnetische Felder¹⁾ auf den Menschen zu überprüfen. Dabei war zu beurteilen, ob neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Risiken durch die Exposition mit elektromagnetischen Feldern vorliegen, die über die wissenschaftlichen Erkenntnisse hinausgehen, die den Grenzwertempfehlungen der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) zugrunde lagen. Dabei sollte ausdrücklich auch geprüft werden, inwieweit die wissenschaftlichen Erkenntnisse Vorsorgemaßnahmen nahe legen.

Analysen zur Frage der Gesundheitsbeeinträchtigung durch elektromagnetische Felder sind von der SSK 1998 [2] sowie von ICNIRP [5], die auch die Basis der EU-Ratsempfehlung [3] waren, durchgeführt worden. Dabei stand die Erkennung von nachweisbaren biologischen Reaktionen und die Bewertung ihrer gesundheitlichen Wirkungen im Vordergrund. Ziel der vorliegenden Empfehlung der Strahlenschutzkommission ist es, auch den Aspekt der Vorsorge mit in die Bewertung einzubeziehen. Die vorliegende Bewertung konzentriert sich auf die wissenschaftlichen Publikationen, die ab 1998 veröffentlicht wurden. Im Bereich der hochfrequenten elektromagnetischen Felder sind dabei sowohl Erkenntnisse zu den thermisch bedingten Reaktionen als auch zu den Reaktionen bei Expositionen durch Felder, die nur zu vernachlässigbaren Temperaturerhöhungen führen, betrachtet worden²⁾.

Kapitel 3 enthält eine zusammenfassende Bewertung der neueren wissenschaftlichen Literatur. Der Bewertung vorangestellt sind die wichtigsten Themen/Fragen, die in der öffentlichen Diskussion stehen. Kapitel 4 beinhaltet Empfehlungen zum Schutz vor nachgewiesenen Gesundheitsbeeinträchtigungen sowie Empfehlungen zur Vorsorge. Der Anhang umfasst eine

¹⁾ Im Folgenden kurz als *elektromagnetische Felder* (Abkürzung EMF) bezeichnet.

²⁾ Dies war – entgegen der in einigen Veröffentlichungen vertretenen Auffassung – auch in der bisherigen Arbeit der Kommission der Fall. Für die früheren Empfehlungen waren aber letztlich die thermisch bedingten Reaktionen entscheidend, weil sie bei geringeren Feldstärken eintreten als nachgewiesene athermische Reaktionen. Der zum Teil in der öffentlichen Diskussion erhobene Vorwurf, die bisherigen Empfehlungen schützen die Bevölkerung lediglich vor thermischen Reaktionen, trifft deshalb nicht zu.

Zusammenfassung wissenschaftlich nachgewiesener Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen durch nieder- und hochfrequente Felder (Kap. A 1), ausführliche Begründungen der zusammenfassenden Bewertung in Kapitel 3, sowie eine Zusammenstellung der Grenzwerte.

2 Erläuterung zentraler Begriffe und Methodik der Bewertung

Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder können unter bestimmten Umständen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen, bis hin zu Schädigungen, führen. Die Abfolge der Ereignisse, die schließlich eine gesundheitliche Beeinträchtigung hervorrufen kann, wird im Folgenden mit den Begriffen physikalische **Einwirkung**, **Effekt** und biologische **Reaktion** beschrieben. Dies ist unabhängig davon, ob Effekte einer kurzzeitigen oder einer andauernden (chronischen) Exposition bzw. Effekte, die unmittelbar (akut) oder erst nach einer gewissen Verzögerung auftreten, betrachtet werden.

Die wesentliche physikalische Einwirkung elektrischer, magnetischer bzw. elektromagnetischer Felder auf den Körper äußert sich in Kräften, die auf elektrische Ladungen ausgeübt werden. Hierdurch werden Ströme im Körper erzeugt, die u.a. bei hohen Frequenzen zu Temperaturerhöhungen führen können.

Die physikalische Einwirkung von elektromagnetischen Feldern kann – muss jedoch nicht – zu messtechnisch nachweisbaren physikalischen Effekten führen, z.B. in Form einer Temperaturerhöhung oder einer Veränderung der elektrischen Spannung über einer Zellmembran. Effekte stellen sich ohne aktives Zutun des Körpers ein.

Effekte können – müssen jedoch nicht – eine aktive biologische Reaktion des Körpers hervorrufen. Hierzu gehört z.B. die Auslösung thermoregulatorischer Vorgänge.

Biologische Reaktionen können – müssen jedoch nicht – zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. Sie liegen immer dann vor, wenn eine Beeinträchtigung der körperlichen Unversehrtheit, der Leistungsfähigkeit oder des Wohlbefindens erfolgt. Eine gesundheitliche Beeinträchtigung setzt eine biologische Reaktion voraus, der ein Effekt infolge einer physikalischen Einwirkung vorausgeht.

Für die vorliegende Bewertung ist von zentraler Bedeutung, dass der Körper in vielfältiger Art und Weise auf Einflüsse von außen reagieren kann, ohne dass dies stets gesundheitlich relevant sein muss. Es lassen sich daher durchaus Effekte oder Reaktionen beobachten, die keine Gesundheitsbeeinträchtigungen zur Folge haben.

Bei der Bewertung von wissenschaftlichen Untersuchungen muss geprüft werden, ob es sich um gesundheitliche Beeinträchtigungen oder um biologische Reaktionen handelt, die nach dem bisherigen Wissen in keinem Zusammenhang zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen stehen.

In Bezug auf die Qualität wissenschaftlicher Arbeiten orientiert sich die SSK an den anerkannten Qualitätsstandards für wissenschaftliche Forschung. Erforderlich ist dabei die Erfüllung von Mindestanforderungen an Objektivität, Kausalität und Reproduzierbarkeit. Ein wichtiger Anhaltspunkt für die Güte eines Forschungsberichtes ist es bereits, ob die Arbeit in einer anerkannten Fachzeitschrift publiziert wurde, die einem Begutachtungsverfahren durch andere Wissenschaftler (peer-review) unterliegt. In diesem Zusammenhang weist die SSK darauf hin,

dass Erfahrungsberichte wie z.B. Fallberichte über Erfahrungen mit Patienten, von ihrer Art häufig nicht geeignet sind, einen ursächlichen Zusammenhang festzustellen, weil sie den Mindestanforderungen an Objektivität und Reproduzierbarkeit nicht genügen. Darüber hinaus sind viele Erfahrungsberichte nicht ausreichend dokumentiert und oft von subjektiven Eindrücken geprägt. Sie können jedoch Anlass sein, wissenschaftliche Forschung durchzuführen.

Die SSK unterscheidet zwischen den im Folgenden dargestellten Definitionen der Kategorien wissenschaftlicher Nachweis, wissenschaftlich begründeter Verdacht und wissenschaftlicher Hinweis:

Wissenschaftlich nachgewiesen ist ein Zusammenhang zwischen einer Gesundheitsbeeinträchtigung und elektromagnetischen Feldern, wenn wissenschaftliche Studien voneinander unabhängiger Forschungsgruppen diesen Zusammenhang reproduzierbar zeigen und das wissenschaftliche Gesamtbild das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs stützt.

Ein **wissenschaftlich begründeter Verdacht** auf einen Zusammenhang zwischen einer Gesundheitsbeeinträchtigung und elektromagnetischen Feldern liegt vor, wenn die Ergebnisse bestätigter wissenschaftlicher Untersuchungen einen Zusammenhang zeigen, aber die Gesamtheit der wissenschaftlichen Untersuchungen das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs nicht ausreichend stützt. Das Ausmaß des wissenschaftlichen Verdachts richtet sich nach der Anzahl und der Konsistenz der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeiten.

Wissenschaftliche Hinweise liegen vor, wenn einzelne Untersuchungen, die auf einen Zusammenhang zwischen einer Gesundheitsbeeinträchtigung und elektromagnetischen Feldern hinweisen, nicht durch voneinander unabhängige Untersuchungen bestätigt sind und durch das wissenschaftliche Gesamtbild nicht gestützt werden.

Die Strahlenschutzkommission ist sich bewusst, dass die Beurteilung des Wissensstandes auch subjektive Wertungen einschließt. Zur Berücksichtigung des Meinungsspektrums hat sie auch Fachgespräche geführt. Da nie ein vollständiger Konsens unter Wissenschaftlern erreichbar ist, wurde das Urteil anerkannter Expertengremien, die sich dem wissenschaftlichen Diskurs gestellt haben, besonders hoch gewertet.

3 Zusammenfassende Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Forschungsarbeiten betrachtet, für die eine nachvollziehbare und wissenschaftlichen Kriterien entsprechende Dokumentation zur Verfügung steht, die eine Bewertung im Rahmen der Zielsetzung dieser Empfehlung ermöglicht. In den meisten Fällen sind dies Untersuchungen, die in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert wurden. Die Darstellung konzentriert sich auf die wissenschaftlichen Publikationen, die seit Verabschiedung der SSK-Empfehlung [2] vom Dezember 1998 veröffentlicht wurden. Ausführlichere Darstellungen finden sich im Anhang Kap. A 2 und A 3.

3.1 Statische elektrische und magnetische Felder

3.1.1 Statische elektrische Felder

Biologische Reaktionen des Körpers auf elektrische Gleichfelder sind gut bekannt. Es bestand daher in den letzten Jahren kein weiterer Forschungsbedarf. Elektrische Gleichfelder bewir-

ken primär Ladungsansammlungen an der Körperoberfläche (durch Influenz). Dadurch beschränken sich biologische Reaktionen ebenfalls auf die Körperoberfläche. Sie bestehen zunächst in Kraftwirkungen auf Haare, die ab elektrischen Feldstärken von ca. 1 kV/m wahrnehmbar sind. Bei größeren Feldstärken kommt es zu (einmaligen) Funkenentladungen, die ab Energien von ca. 2 mJ-25 mJ als belästigend empfunden werden können, die Schwelle für das lebensgefährliche Herzkammerflimmern liegt bei 1000 mJ, was für direkte Entladungen in einem elektrischen Gleichfeld etwa einer Feldstärke von 450 kV/m entspricht.

Im privaten und beruflichen Alltag sind weniger elektrische Gleichfelder, sondern vor allem elektrostatische Aufladungen für Funkenentladungen verantwortlich. Dies erklärt, weshalb derzeit keine Grenzwertregelungen für elektrische Gleichfelder vorliegen.

3.1.2 Statische magnetische Felder

Wegen der fehlenden zeitlichen Änderungen sind die Wirkungsmöglichkeiten magnetischer Gleichfelder auf gut bekannte Mechanismen beschränkt, nämlich einerseits die Kraftwirkungen auf Teilchen und Gegenstände, z.B. metallische Implantate, die ein eigenes Magnetfeld besitzen oder magnetisierbar sind und andererseits die Erzeugung elektrischer Spannungen in bewegten Körperteilen. In *in-vitro*-Untersuchungen wurden darüber hinaus Beeinflussungen des Gleichgewichtes chemischer Reaktionen untersucht. Erst im Zusammenwirken mit anderen Feldformen, z.B. elektrischen oder magnetischen Wechselfeldern oder hochfrequenten elektromagnetischen Feldern wurden in den letzten Jahren weitere Wechselwirkungsmöglichkeiten im Sinne von Resonanzeffekten mit dem Erdmagnetfeld als Erklärungsmodelle für nichtthermische Reaktionen diskutiert. Die entsprechenden Arbeiten werden in den folgenden Abschnitten angesprochen.

In sehr starken magnetischen Gleichfeldern können die erzeugten elektrischen Spannungen insbesondere bei Risikopatienten gesundheitsbeeinträchtigend werden. Dies erklärt die Notwendigkeit der Festlegung von Grenzwerten. In den letzten Jahren wurde durch neuere Arbeiten das Besorgnispotential in Bezug auf die Gesundheitsbeeinträchtigungen durch magnetische Gleichfelder nicht erhöht. Der Einsatz neuerer medizinischer Anwendungen, in denen das medizinische Personal starken magnetischen Gleichfeldern ausgesetzt ist, hat jedoch Anlass gegeben, sich mit der Nutzen-Risiko-Analyse dieser neuen Situation zu beschäftigen. Die Strahlenschutzkommission befasst sich gegenwärtig mit der Neubewertung dieser Exposition.

Die Veröffentlichungen der letzten Jahre über statische elektrische oder magnetische Felder geben keine Hinweise auf bislang unbekannte bzw. unberücksichtigt gebliebene Gesundheitsbeeinträchtigungen oder Anhaltspunkte für einen wissenschaftlich begründeten Verdacht.

3.2 Niederfrequente elektrische und magnetische Felder

Der Bereich der niederfrequenten Felder umfasst hier elektrische und magnetische Wechselfelder mit Frequenzen von 1 Hz-100 kHz. Niederfrequente Felder entstehen im Wesentlichen durch die Bereitstellung und den Verbrauch elektrischer Energie. Die Netzfrequenz und damit die Frequenz der entsprechenden Felder beträgt 50 Hz (USA: 60 Hz) bzw. bei der elektrischen Energieversorgung der Bahn $16\frac{2}{3}$ Hz. Während ein elektrisches Feld von jeder Leitung ausgeht, die an das Stromnetz angeschlossen ist, entstehen magnetische Felder nur, wenn ein Strom fließt, d.h. wenn elektrische Energie verbraucht wird. Eine Zusammenfassung der wissenschaftlich nachgewiesenen Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder befindet sich im Anhang, Kap. A 1.1.

In der öffentlichen Diskussion steht vor allem die Frage nach einem möglichen Zusammenhang zwischen chronischer Exposition durch niederfrequente Magnetfelder und einem erhöhten Leukämierisiko für Kinder im Vordergrund.

Im Folgenden wird eine zusammenfassende Bewertung neuerer Arbeiten zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch niederfrequente Felder gegeben. Dabei werden im Wesentlichen Untersuchungen am Menschen und Tierversuche betrachtet.

3.2.1 Niederfrequente Magnetfelder und Krebs; epidemiologische Studien

Seit 1998 wurden diverse Ergebnisse tierexperimenteller Untersuchungen einer möglichen krebsfördernden Wirkung durch niederfrequente Felder veröffentlicht. Diese Ergebnisse sind zum Großteil negativ und sprechen eher gegen die Existenz eines Risikos. Dennoch sollte den vereinzelt positiven Ergebnissen durch weitere Studien nachgegangen und ihre Bedeutung für den Menschen überprüft werden.

Im Zentrum des derzeitigen Interesses steht die Frage nach einem Zusammenhang zwischen Leukämie bei Kindern und der Exposition mit niederfrequenten magnetischen Feldern. Diese wurde in zahlreichen großen epidemiologischen Studien untersucht und in zwei aktuellen Metaanalysen zusammenfassend dargestellt. Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine statistische Assoziation zwischen dem Auftreten von Leukämie bei Kindern und einer weit über dem Bundesdurchschnitt liegenden hohen, zeitlich gemittelten Magnetfeldexposition in der Wohnung (über $0,3 \mu\text{T}$ oder $0,4 \mu\text{T}$ je nach Studie). Ob es tatsächlich die Felder waren, die in Wohnungen mit erhöhter Magnetfeldexposition zu einem höheren Leukämierisiko geführt haben, kann anhand der epidemiologischen Daten nicht ermittelt werden. Die Ursachen, und damit auch die Risikofaktoren, der meisten Leukämiefälle bei Kindern sind nicht bekannt. Daher kann auch nicht überprüft werden, ob mögliche Risikofaktoren bei Exponierten und Nichtexponierten in den Studien gleich verteilt waren. Die Übersicht der tierexperimentellen Daten spricht nicht für einen ursächlichen Zusammenhang.

Die epidemiologischen Hinweise zu Krebs bei Erwachsenen sind weniger konsistent als bei Kindern und stellen insgesamt nicht mehr als einen schwachen Hinweis auf einen entsprechenden Zusammenhang dar.

Der in epidemiologischen Studien gefundene Zusammenhang mit dem Auftreten kindlicher Leukämie reicht im Hinblick auf die fehlende Evidenz karzinogener Wirkungen bei Erwachsenen oder einer plausiblen Erklärung der Experimente an Tieren oder isolierten Zellen nicht aus, um die eindeutige Schlussfolgerung zu ziehen, dass diese Felder Leukämie bei Kindern verursachen. Sollte die erhöhte Magnetfeldexposition ursächlich für das Auftreten der Krankheit verantwortlich sein, könnten etwa 1% der Fälle von Leukämie bei Kindern in Deutschland auf diesen Zusammenhang zurückgeführt werden. Die bisherigen Ergebnisse über die Möglichkeit eines Zusammenhangs zwischen der Magnetfeldexposition und Leukämie bei Kindern sind als wissenschaftlich begründeter Verdacht anzusehen und unterstreichen die Notwendigkeit einer intensiven Suche nach möglichen Zusammenhängen.

3.2.2 Niederfrequente Felder und neurodegenerative Erkrankungen, Einflüsse auf die Reproduktion und andere gesundheitliche Beeinträchtigungen außer Krebs

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl gesundheitlicher Beeinträchtigungen außer Krebs untersucht. Die Datenlage ist für die einzelnen Aspekte zumeist sehr schlecht, so dass fundierte Schlussfolgerungen kaum möglich sind.

Hinsichtlich neurodegenerativer Erkrankungen (z.B. Alzheimer, Parkinson, amyotrophe Lateralsklerose) als Folge einer berufsbedingten Exposition mit niederfrequenten Feldern liegen neuere epidemiologische Studien vor. Auf Grundlage dieser Studien sind jedoch noch keine Aussagen über einen Zusammenhang zwischen neurodegenerativen Erkrankungen und niederfrequenten Feldern möglich. Tierversuche, die einen solchen Zusammenhang nahe legen könnten, liegen bisher nicht vor. Die Ergebnisse weiterer Forschung bleiben abzuwarten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Auftreten von amyotropher Lateralsklerose sind z.T. methodisch höherwertig und ergeben insgesamt einen schwachen wissenschaftlichen Verdacht. Ob ein kausaler Zusammenhang vorliegt, kann aus Sicht der SSK nur mittels weiterer Forschung geklärt werden.

Zu möglichen negativen Einflüssen auf die Reproduktion wurden sowohl epidemiologische Studien als auch Tierversuche durchgeführt. Die neueren Arbeiten bilden keinen wissenschaftlich begründeten Hinweis auf Gesundheitsbeeinträchtigungen durch niederfrequente Felder mit Intensitäten unterhalb der Grenzwerte.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Frage, ob Einflüsse auf das kardiovaskuläre System auftreten sind insgesamt als wissenschaftlicher Hinweis zu werten. Ob eine gesundheitliche Beeinträchtigung vorliegt, kann aus Sicht der SSK nur mittels weiterer Forschung geklärt werden.

Die Studien zur Beeinflussung des Melatoninhaushalts liefern ein sehr unterschiedliches Bild. Bislang sind die Ergebnisse nicht schlüssig zu interpretieren. Es werden Hypothesen angenommen, die aus Sicht der SSK durch entsprechende Untersuchungen geklärt werden sollten.

Es ist festzustellen, dass keine neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse vorliegen, aus denen ein Nachweis bisher nicht bekannter gesundheitlicher Beeinträchtigungen abgeleitet werden kann. Hinsichtlich der diskutierten unbestätigten wissenschaftlichen Hinweise bzw. Verdachtsmomente sind aus Sicht der SSK weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

3.2.3 Tabellarische Zusammenfassung

Tabelle 1 Bewertung neuerer wissenschaftlicher Publikationen (im Wesentlichen ab 1998): Vereinfachte Darstellung über mögliche Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder unterhalb der Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung [3] und ihre Einordnung in die Kategorien Nachweis, Verdacht und Hinweis (detaillierte Darstellung siehe Anhang, Kap. A 2)

Reaktionen bzw. Gesundheitsbeeinträchtigungen	N	V	H
A 2.1 Krebs			
Tierexperimentelle Studien			X
Epidemiologische Studien; Leukämie bei Kindern		X	
Epidemiologische Studien; Erwachsene			X
A 2.2 Andere Reaktionen bzw. gesundheitliche Beeinträchtigungen außer Krebs			
Epidemiologische Studien; neurodegenerative Erkrankungen		X	
Reproduktion; teratogene Reaktionen			
Kardiovaskuläres System			X
Melatonin (Mensch)			
Melatonin (Tier)			X
ZNS und kognitive Funktionen			X
Schlaf			X
Psychische Beeinflussungen			
Elektrosensibilität			X

N = Nachweis; V = Verdacht; H = Hinweis

3.3 Hochfrequente elektromagnetische Felder

Der Bereich der hochfrequenten elektromagnetischen Felder umfasst die Frequenzen von 100 kHz-300 GHz. Die Absorption von Energie aus elektromagnetischen Feldern mit diesen Frequenzen kann zu einer Erwärmung führen. Bei zu starken Temperaturerhöhungen kommt es zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen. Eine Zusammenfassung der wissenschaftlich nachgewiesenen Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder befindet sich im Anhang, Kap. A 1.2.

In der öffentlichen Diskussion stehen vor allem biologische Reaktionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen durch chronische Expositionen mit niedrigen (nichtthermischen) Leistungsflussdichten und Feldstärken im Vordergrund.

So wird z.B. die Hypothese diskutiert, dass den niederfrequent modulierten Feldern des Mobilfunks eine besondere Relevanz für Reaktionen des Biosystems zukomme und hier insbesondere der Zeitfaktor der Immission zu berücksichtigen sei. Dabei wird angeführt, dass es insbesondere im Bereich von Basisstationen des Mobilfunks nicht unmittelbar zu einer Reak-

tion kommt, sondern erst nach einiger Zeit und zwar individuell verschieden nach Tagen bis Monaten. Mögliche Reaktionen seien: Schlaflosigkeit, Konzentrationsstörungen, Kopfschmerz, Arrhythmien und Tinnitus. Als Beleg für diese Beeinträchtigungen wird auf Berichte der Erfahrungsmedizin verwiesen.

Weiter wird diskutiert, dass auch kurzzeitige Immissionen mit Intensitäten, wie sie von einem Mobilfunkgerät ausgehen, die Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke erhöhen könnten. Dabei würden hirnschädigende Substanzen in das Gehirn eintreten und im weiteren Verlauf Krankheiten entstehen können.

Es wird auch die Frage untersucht, ob die bei der Nutzung des Mobiltelefons auftretenden elektromagnetischen Felder die intellektuelle Informationsverarbeitung (kognitive Leistung) beeinflussen.

Nachfolgend werden die wissenschaftlichen Ergebnisse unter dem Gesichtspunkt der Vorsorge bewertet. Die Bewertung konzentriert sich insbesondere auf die Frequenzen, die technisch genutzt werden (z.B. durch die Mobilfunktechnologie) und damit für die Bevölkerung von Bedeutung sind. Neben den wenigen Untersuchungen am Menschen sind auch Zell- und Tierstudien berücksichtigt. Für die gesundheitliche Bewertung werden in diesem Zusammenhang zwei unterschiedliche, international akzeptierte Basisgrenzwerte betrachtet: der SAR³⁾-Wert 0,08 W/kg für den Ganzkörper, aus dem der gesetzlich gültige Grenzwert in der 26. BImSchV abgeleitet wurde, und der SAR-Wert von 2 W/kg, gemittelt über 10 g, den die SSK für die Teilkörperexposition empfohlen hat. Er ist z.B. für die Beurteilung der Exposition des Kopfes bei der Nutzung eines Mobiltelefons entscheidend.

3.3.1 Interaktionen hochfrequenter elektromagnetischer Felder mit Molekülen und Membranen

Untersuchungen an zellulären Strukturen, z.B. an Zellmembranen oder Flüssen biologischer bedeutender Ionen wie Kalzium, dienen zur Aufklärung von Wirkungsmechanismen, besonders unter dem Aspekt von biologischen Reaktionen niederfrequent amplitudenmodulierter Hochfrequenzfelder bei nichtthermisch wirkenden Intensitäten. Die wenigen Untersuchungen unterstützen nicht die Hypothesen, dass bei niedrigen Feldstärken Reaktionen, die eine Relevanz für die Gesundheit des Menschen haben könnten, auftreten. Eindeutige biologische Reaktionen konnten gezeigt werden, wenn die Absorptionsrate um Größenordnungen über dem Grenzwert lag und bekannte Mechanismen wie z.B. thermisch bedingte Reaktionen vorlagen. Die Gesamtheit an Versuchsergebnissen spricht nicht für einen wissenschaftlich begründeten Verdacht.

3.3.2 Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Menschen und Tiere

Studien an Probanden schließen nicht aus, dass bei Einhaltung des Basisgrenzwertes von 2 W/kg für die Teilkörperexposition, das menschliche Gehirn in seinen physiologischen Reaktionen beeinflusst werden kann. Während das spontane Elektroenzephalogramm eines Menschen, oder reizkorrelierte Hirnpotentiale nicht durch das hochfrequente Feld beeinflusst wurden, zeigten sich in komplexeren Aufgaben zur Informationsverarbeitung in verschiedenen Studien Veränderungen verschiedener Reaktionszeiten bei Aufmerksamkeitstests, die

³⁾ SAR: Spezifische Absorptionsrate angegeben in W/kg

jedoch noch bestätigt werden müssen. Die Daten geben keine Hinweise auf gesundheitliche Beeinträchtigungen, die bei der Nutzung von Mobiltelefonen auftreten können. Die Änderungen werden mit einer lokalen und geringfügigen Erwärmung und besseren Durchblutung erklärt, wobei der zugrunde liegende Wirkungsmechanismus nicht bekannt ist. Die Autoren weisen deutlich darauf hin, dass die gefundenen Veränderungen im Bereich der normalen biologischen Schwankungen enthalten sind und keine gesundheitliche Relevanz aufzeigen. Die Ergebnisse sind jedoch als wissenschaftliche Hinweise einzustufen, die weitere Forschungsarbeiten erfordern.

Untersuchungen mit Tieren erlauben Expositionsfeldstärken, die im Alltag nicht auftreten. Die wenigen Verhaltensexperimente, die mit unterschiedlichen Feldstärken und Tierspezies durchgeführt wurden, sind kaum miteinander vergleichbar und ihre Ergebnisse sind inkonsistent. Zum Teil können die beschriebenen Änderungen auf thermische Einflüsse zurückgeführt werden.

Untersuchungen zu Permeabilitätsänderungen der Blut-Hirn-Schranke gegenüber Albumin zeigen keine Übereinstimmung und sind als unbestätigte Hinweise zu werten. In der Mehrzahl zeigen die Versuchsergebnisse aber, dass bei Feldstärken, die bei Nutzung von Mobiltelefonen auftreten, die Schrankenfunktion gewährleistet bleibt. Das bedeutet, dass bei den um Größenordnung niedrigeren individuellen Immissionen durch Basisstationen keine Beeinträchtigung der Funktion der Blut-Hirn-Schranke zu erwarten ist. Da die Schrankenfunktion jedoch thermisch beeinflussbar ist, sollte zur Absicherung des Teilkörper-SAR-Wertes die thermische Abhängigkeit der Permeabilität weiter untersucht werden.

Parameter des Blutes, des Immunsystems oder bestimmte Hormone wurden ebenfalls in den letzten Jahren unter Einfluss hochfrequenter Felder, z.T. auch beim Menschen, untersucht. Mobilfunkrelevante Expositionen bei Feldstärken oberhalb der Grenzwerte bewirkten keine Änderung im blutbildenden System bei Tieren. Einzelexperimente mit Frequenzen, die deutlich höher waren, gaben Hinweise auf Reaktionen, die z.T. mit einer Temperaturerhöhung erklärbar sind.

Die Untersuchungen bei Mensch und Tier sprechen gegen einen Einfluss der hochfrequenten Felder auf die Konzentration des Hormons Melatonin bei Feldstärken unterhalb der Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung.

Die Untersuchungen zu genetischen Schäden durch hochfrequente Felder sind kaum untereinander vergleichbar, weil unterschiedliche Expositionsparameter wie Frequenz, Modulation und Feldstärke verwendet wurden. Die Ergebnisse mit Feldstärken deutlich oberhalb der Grenzwerte sind nicht einheitlich. Es ist festzuhalten, dass Untersuchungen in Feldern, die durch den Mobilfunk (kontinuierliche, amplituden- und frequenzmodulierte Felder) entstehen, keinen Hinweis auf ein genotoxisches Potential ergaben.

Untersuchungen zur Tumorbildung in Hochfrequenzfeldern sind nicht zahlreich und haben keinen wissenschaftlichen Hinweis auf einen entsprechenden Zusammenhang eines Feldeinflusses ergeben. Die Untersuchungen zu Krebs, ausgelöst durch kanzerogene Substanzen oder Implantation von Krebszellen haben keine neuen Hinweise gegeben, dass hochfrequente elektromagnetische Felder die Entstehung oder die Promotion von Tumoren negativ beeinflussen. Eine Einzelstudie, die eine erhöhte Lymphominzidenz bei genmanipulierten Mäusen zeigte, wird als wissenschaftlicher Hinweis auf mögliche Reaktionen gewertet. Derzeit werden Wiederholungsstudien durchgeführt.

3.3.3 Epidemiologische Studien

Epidemiologische Studien, die einen Zusammenhang zwischen bestimmten Erkrankungen und der Exposition durch Sendeanlagen oder durch Mobiltelefone untersuchten, sind nicht zahlreich. Die vorhandenen Studien haben keine statistisch nachweisbare Assoziation zwischen Krebs im Kopfbereich und Nutzung eines Mobiltelefons gezeigt.

Die Studien weisen insgesamt dosimetrische Mängel auf. Ohne relevante Angaben zur Exposition ist die Aussagekraft der Studien jedoch gering. Es ist kein Mechanismus bekannt, wie die Felder der Mobiltelefone eine Krebserkrankung beeinflussen könnten. Aus den derzeitigen Erkenntnissen lassen sich weder ein wissenschaftlich begründeter Verdacht noch Hinweise auf einen negativen Einfluss auf die Gesundheit ableiten.

3.3.4 Tabellarische Zusammenfassung

Tabelle 2 *Bewertung neuerer wissenschaftlicher Publikationen (im Wesentlichen ab 1998): Vereinfachte Darstellung über mögliche Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder unterhalb der Basisgrenzwerte (Ganzkörperwert 0,08 W/kg [=G], bzw. Teilkörperwert 2 W/kg [=T]) bzw. Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung [3] und ihre Einordnung in die Kategorien Nachweis, Verdacht, Hinweis (detaillierte Darstellung siehe Anhang, Kap. A 3)*

Reaktionen bzw. Gesundheitsbeeinträchtigungen	N	V	H
A 3.1 Interaktion mit Zellen und subzellulären Strukturen			
Moleküle und Membranen			T
Kalzium			T
A 3.2 Einfluss auf Menschen und Tiere			
Verhalten bei Tieren			T
EEG beim Menschen, Schlaf			T
Kognitive Funktionen			T
Blut-Hirn-Schranke bei Ratten			T
Melatonin bei Tieren und bei Menschen			
Blutparameter und Immunsystem			G
Reproduktion und Entwicklung			
A 3.3 Krebs			
Krebsrelevante Modelle (<i>in vitro</i>)			T
Entstehung und Promotion (<i>in vivo</i>)			
Lymphom Modell			T
Epidemiologische Studien (Mobilfunk)			

N = Nachweis; V = Verdacht; H = Hinweis

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen zum Schutz der Bevölkerung

4.1 Empfehlungen zum Schutz vor nachgewiesenen Gesundheitsbeeinträchtigungen

In Übereinstimmung mit den ICNIRP-Richtlinien von 1998 [5], der EU-Ratsempfehlung [3] sowie unter Berücksichtigung der Bewertung der Strahlenschutzkommission von 1998 [2] und insbesondere der neuen wissenschaftlichen Literatur seit 1998 gelangt die Strahlenschutzkommission zu folgenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen:

- Die SSK kommt zu dem Schluss, dass auch nach Bewertung der neueren wissenschaftlichen Literatur keine neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse im Hinblick auf nachgewiesene Gesundheitsbeeinträchtigungen vorliegen, die Zweifel an der wissenschaftlichen Bewertung aufkommen lassen, die den Schutzkonzepten der ICNIRP bzw. der EU-Ratsempfehlung zugrunde liegt.
- Die SSK hält das gegenwärtige Grenzwertkonzept, bestehend aus Basisgrenzwerten sowie unter ungünstigen Expositionsbedingungen abgeleiteten Grenzwerten, für geeignet und flexibel genug, um vor gesundheitlichen Beeinträchtigungen bei den im Alltag vorkommenden Expositionen zu schützen.
- Die SSK empfiehlt, den gesamten Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 300 GHz in die Grenzwertsetzung auf der Basis der EU-Ratsempfehlung einzubeziehen.
- Die SSK empfiehlt, Grenzwerte für alle technischen Quellen und Geräte einzuführen, die elektromagnetische Felder erzeugen. Dabei ist bei Geräten grundsätzlich von den Basisgrenzwerten auszugehen und abgeleitete Grenzwerte sind nur in den Fällen anzuwenden, bei denen eine bekannte Beziehung zwischen den beiden Größen besteht.
- Die SSK verweist auf den Unterschied zwischen Immissions- und Expositionsbegrenzung. Die Grenzwerte sind als Immissionsgrenzwerte zu verstehen und deshalb sind an einem Standort alle Quellen zu berücksichtigen. Die SSK empfiehlt daher insbesondere, die Immissionen durch einzelne Verursacher an Orten, die der Öffentlichkeit zugänglich sind, deutlich unterhalb der bestehenden Grenzen für die Gesamtexposition zu halten.
- Die SSK empfiehlt zusätzlich, die Grenzwerte nicht vollständig auszuschöpfen, um einen Spielraum für die Nutzung neuer Technologien auch in Zukunft zu behalten.
- Die SSK empfiehlt, bei der Festlegung von Sicherheitsabständen für Sendefunk-Anlagen alle Hintergrundfelder mit einzubeziehen.
- Die SSK bestätigt die Notwendigkeit von Produktnormen zur Begrenzung von elektromagnetischen Expositionen bei bestimmungsgemäßem Gebrauch von Geräten.
- Die SSK stellt mit Sorge fest, dass die Produktnormung auf europäischer Ebene zunehmend die Schutzüberlegungen der EU-Ratsempfehlung und der ICNIRP unterläuft. Dazu zählt z.B. das völlige Ausschöpfen des Expositionsspielraumes bereits durch ein einziges Produkt, die Nichtberücksichtigung von (erheblichen) Messunsicherheiten und die Expositionsabschätzung auf der Basis unrealistisch günstiger Bedingungen. Da sich die

europäischen Produktnormung der nationalen Regelkompetenz entzieht, empfiehlt die SSK, sich nachdrücklich für die Einhaltung der EU-Ratsempfehlung auch durch EUNormungsgremien einzusetzen.

- Die SSK sieht in der möglichen Störbeeinflussung von elektronischen Körperhilfen und Implantaten sowie von anderen Medizinprodukten durch elektromagnetische Felder, wie sie z.B. durch Diebstahlsicherungsanlagen oder Mobilfunkgeräte erzeugt werden, ein ernstes Problem. Dies betrifft sowohl die Emissionseigenschaften der beispielhaft genannten Feldquellen als auch die Störanfälligkeit der beeinflussten Geräte. Die SSK fordert, die Emissionen von Produkten zu spezifizieren und die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten weiter zu verbessern.

4.2 Empfehlungen zur Vorsorge

Die SSK orientiert sich bei ihren Betrachtungen zur Vorsorge an der Mitteilung der EU-Kommission über die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips [4]. Die vorliegende Empfehlung leistet einen Beitrag zur wissenschaftlichen Risikobewertung. Sie stützt ihre Überlegungen ausschließlich auf die Analyse wissenschaftlicher Untersuchungen. Die SSK befasst sich nicht mit dem Risikomanagement und der Risikoakzeptanz. Das Risikomanagement, einschließlich einer Berücksichtigung der Risikoakzeptanz der Bevölkerung, liegt in erster Linie in der Verantwortung der politischen Entscheidungsträger.

Die SSK stellt fest, dass sich auch unter Berücksichtigung des Umfangs und des Ausmaßes der Verdachtsmomente ein über die bisher bekannten gesundheitlichen Beeinträchtigungen zusätzliches Risiko nicht angeben lässt.

Sowohl für den Bereich niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder als auch für den Bereich hochfrequenter elektromagnetischer Felder werden folgende Empfehlungen zur Vorsorge ausgesprochen:

- Die SSK empfiehlt, bei der Entwicklung von Geräten und der Errichtung von Anlagen die Minimierung von Expositionen zum Qualitätskriterium zu machen. Sie weist darauf hin, dass – entgegen der öffentlichen Besorgnis, die vor allem ortsfeste Anlagen betrifft – die Immission insbesondere durch die elektromagnetischen Felder aus Geräten, z.B. bei Haushaltsgeräten oder bei Endgeräten der mobilen Telekommunikation unter dem Gesichtspunkt des vorsorgenden Gesundheitsschutzes zu betrachten sind, weil es hier am ehesten zu einer hohen Exposition eines Nutzers kommen kann.
- Die SSK empfiehlt, Maßnahmen zu ergreifen, um Expositionen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Rahmen der technischen und wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten zu minimieren. Dies gilt insbesondere für Bereiche, in denen sich Personen regelmäßig über längere Zeit aufhalten. Die Maßnahmen sollten sich an dem Stand der Technik orientieren (z.B. Elektroinstallationen).
- Die SSK empfiehlt, dass für alle Geräte und Anlagen, die relevante Expositionen verursachen können, entsprechende Produktinformationen zur Verfügung gestellt werden.
- Die SSK fordert geeignete einheitliche Kennzeichnungen, welche die Exposition durch Geräte angeben, z.B. in welchem Ausmaß Basisgrenzwerte bzw. Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung ausgeschöpft werden.

- Die SSK fordert, rechtzeitig vor der Einführung neuer Technologien (z.B. Aufbau neuer Telekommunikationseinrichtungen, Personenidentifizierungsanlagen) die für eine gesundheitliche Bewertung notwendigen Daten offen zu legen.
- Die SSK empfiehlt, relevante Immissionen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder in regelmäßigen Zeitabständen zu überprüfen.
- Die SSK empfiehlt, bei der Errichtung von ortsfesten Anlagen (z.B. Hochspannungsleitungen, Mobilfunk), die relevante elektromagnetische Emissionen verursachen, eine verstärkte Information der Bürger und die Einbeziehung von Vertretern der Kommunen in die Planung.

5 Empfehlungen zur Forschung

Es ist notwendig, die Kenntnisse über gesundheitliche Beeinträchtigungen bei Exposition durch elektromagnetische Felder durch weitere Forschung zu verbessern.

Die SSK weist in diesem Zusammenhang auf die von ihr vorgelegten Vorschläge für Forschungsbedarf auf den Gebieten der elektromagnetischen Felder hin sowie auf die internationalen Aktivitäten auf diesem Gebiet. Die SSK ist weiterhin bereit, in regelmäßigen Abständen die Forschungsergebnisse neu zu bewerten.

Die SSK empfiehlt, Forschungsschwerpunkte im Bereich nichtionisierender Strahlen stärker auf neue Technologien auszurichten.

Die im Anhang (Kap. A 2 und A 3) dieser Empfehlung gegebenen Anregungen für weitere Forschungsarbeiten sollten aufgegriffen werden.

Literatur:

- [1] Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV – 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, BGBl. Teil I, Nr. 66, 20. Dezember 1996.
- [2] Strahlenschutzkommission: Schutz der Bevölkerung bei Exposition durch elektromagnetische Felder (bis 300 GHz), Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Berichte der SSK, Heft 23, Urban & Fischer, München 1999.
- [3] Empfehlung (1999/519/EG) des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz).
- [4] Mitteilung der Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips, Brüssel 02. Februar 2000.
- [5] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 1998 74 (4), 494-522.

Anhang

Wissenschaftliche Begründung für Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung

A 1 Wissenschaftlich nachgewiesene Reaktionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen

A 1.1 Niederfrequente elektrische und magnetische Felder (1 Hz-100 kHz)

Die Einwirkung niederfrequenter elektrischer Felder verursacht an einem exponierten Körper Oberflächenladungen, die zu wahrnehmbaren Reaktionen führen können, sowie elektrische Felder und Ströme innerhalb des Körpers (siehe unten). Die Schwellenwerte infolge der Bewegungen von Körperhaaren und Mikroentladungen sind für statische und niederfrequente elektrische Felder unterschiedlich. Die Schwellenwerte für Wahrnehmungen beginnen bei Feldstärken von etwa 1 kV/m. Wahrnehmungen, die als Belästigung empfunden werden, zeigen bei elektrischen Feldern von 50 Hz bei Feldstärken oberhalb von etwa 2,5 kV/m etwa 1% der Probanden. Der Schwellenwert für gesundheitlich nachteilige Reaktionen ist nicht genau bekannt; er liegt oberhalb praktisch realisierbarer elektrischer Feldstärken (über 100 kV/m).

Zusätzlich führt die Exposition durch niederfrequente elektrische oder magnetische Felder zu elektrischen Feldern und elektrischen Strömen im Körper, die Anregungswirkungen innerhalb des Körpers auslösen können. In Laboruntersuchungen an zellulären und tierischen Systemen konnten bei einer induzierten Stromdichte von bis zu 10 mA/m² keine auf gesundheitliche Beeinträchtigungen hindeutenden Reaktionen durch niederfrequente Felder nachgewiesen werden. Bei höheren Werten der im Gewebe induzierten Stromdichten (10 mA/m²-100 mA/m²) konnten durchweg signifikante Gewebereaktionen – etwa funktionelle Änderungen im Nervensystem – beobachtet werden.

Eine Stromdichte von 10 mA/m² bei Frequenzen von einigen Hertz bis 1 kHz wird als untere Schwelle für eine geringe Beeinflussung der Funktionen des Nervensystems angenommen. Bei Freiwilligen äußerten sich die stimmigsten Reaktionen der Exposition im Auftreten von Magnetophosphenen (magnetfeldinduzierte Lichterscheinung im Auge), aber es gibt keinen Beweis dafür, dass diese vorübergehenden Reaktionen mit einer gesundheitlichen Beeinträchtigung verbunden sind. Grobe Abschätzungen für die Stromdichteschwellenwerte für visuelle Phosphene ergeben Werte oberhalb von 10 mA/m², während mikrodosimetrische Betrachtungen zeigen, dass die Stromdichten im retinalen Bereich oberhalb von 100 mA/m² liegen könnten [Lin 01].

Bei Stromdichten oberhalb von 100 mA/m² kann es zu einer Stimulation von Nerven- und Muskelzellen kommen. Für Frequenzen oberhalb von etwa 1 kHz nehmen die Schwellenwerte der Stromdichte für diese Reaktionen mit zunehmender Frequenz zu. Erregungen von Nerven- und Muskelgewebe werden als gesundheitliche Beeinträchtigungen angesehen. Als niedrigster Schwellenwert für gesundheitliche Beeinträchtigungen wird 100 mA/m² für Frequenzen von einigen Hz bis 1 kHz angenommen.

Indirekte Reaktionen bei Exposition durch niederfrequente elektrische Felder

Kontaktströme oder transiente Entladungen (Funkenentladungen) können entstehen, wenn der menschliche Körper einen Gegenstand mit einem anderen elektrischen Potential berührt (d.h. wenn entweder der Gegenstand oder der menschliche Körper durch ein elektromagnetisches Feld aufgeladen ist). Die Schwellenwerte für diese Reaktionen sind gut untersucht. Die Schwellenwerte für die Wahrnehmung von Funkenentladungen liegen bei elektrischen Feldstärken oberhalb von 1 kV/m (50 Hz), wobei die Wahrnehmungsschwelle individuell unterschiedlich ist. Oberhalb von 5 kV/m werden Funkenentladungen von 50% der Personen als Belästigung empfunden (Zusammenstellung der Schwellenwerte bei Bernhardt [Ber 88]).

Bei 50 Hz liegen die mittleren Schwellenwerte für die Wahrnehmung von Kontaktströmen bei Personen unterschiedlicher Größe im Bereich von 0,2 mA-0,4 mA, wobei in Einzelfällen die wahrnehmbaren Kontaktströme bereits bei etwa 0,01 mA beginnen. Mit Muskelverkrampfungen, die lebensgefährlich sein können, ist bei Kontaktströmen von mehr als 10 mA zu rechnen. Für Frequenzen oberhalb von etwa 1 kHz nehmen die Schwellenwerte mit zunehmender Frequenz zu [ICN 98]. Die elektrischen Feldstärken, die zu den genannten Körperströmen führen können, nehmen mit zunehmender Größe der metallischen Strukturen (größere Kapazität) ab [Ber 88].

A 1.2 Hochfrequente elektromagnetische Felder (100 kHz–300 GHz)

Die Absorption von Energie aus elektromagnetischen Feldern mit Frequenzen ab 100 kHz kann zu einer nicht unerheblichen Erwärmung von Körpergewebe führen. Die Daten weisen darauf hin, dass es zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen kommt, wenn die Temperaturerhöhung des ganzen Körpers oder von Körperteilen 1°C überschreitet.

Aus gesicherten Versuchsdaten geht hervor, dass die Exposition ruhender Menschen durch hochfrequente EMF zu einer Erhöhung der Körpertemperatur von weniger als 1°C bis zum Erreichen des thermoregulatorischen Gleichgewichts führt, wenn die Ganzkörper-SAR unter 4 W/kg liegt. Bei einer Exposition durch stärkere Felder, die SAR-Werte von über 4 W/kg erzeugen, kann die wärmeregulierende Fähigkeit des Körpers überfordert werden und eine schädliche Gewebeerwärmung die Folge sein. Viele Laborversuche an Nagetieren und Primaten haben eine große Spannweite von Gewebeschädigungen gezeigt, die von einer Teil- oder einer Ganzkörpererwärmung um mehr als 1°C-2°C herrührten. Die Empfindlichkeit verschiedener Gewebearten bezüglich einer thermischen Schädigung ist sehr unterschiedlich, aber die Schwelle für Schädigungen liegt selbst bei den empfindlichsten Geweben unter normalen Umweltbedingungen über 4 W/kg.

Eine Exposition durch gepulste EMF ausreichender Intensität, wie sie bei leistungsstarken Radargeräten auftreten kann, führt zu bestimmten vorhersehbaren Reaktionen, wie das Mikrowellenhörphänomen und verschiedene Verhaltensreaktionen. Das Hörphänomen ist als akustothermischer Effekt heute verstanden. Ursache ist eine kurzzeitige (Mikrosekunden andauernde) Erwärmung im Kopf um wenige millionstel Grad, die zu einer Druckwelle führt, die vom Hörorgan wahrgenommen wird [Cho 85]. Die Reaktion erfordert mindestens einen Wert an zugeführter Energie von etwa 20 mJ/kg innerhalb eines Pulses, während die mittleren Leistungsflussdichten in der Regel im nichtthermisch wirksamen Bereich liegen.⁴⁾

⁴⁾ Diese Reaktionen treten bei Feldern des Mobilfunks nicht auf, da diese Schwellenwerte nicht erreicht werden.

Eine große Zahl von Untersuchungen über die biologischen Reaktionen von amplitudenmodulierten (AM) EMF (einschließlich der Signalformen, wie sie beim GSM⁵⁾-System des Mobilfunks verwendet werden), die meistens bei niedrigen Expositionswerten, wie sie bei der Benutzung von Handys auftreten, durchgeführt wurden, zeigt keine konsistenten Ergebnisse. Sorgfältige Analysen dieser Untersuchungen (bis 1998) zeigen, dass die Effekte und Reaktionen von AM-Feldern je nach Expositionsparemtern, Art der involvierten Zellen und Gewebe und den untersuchten biologischen Endpunkten sehr unterschiedlich ausfallen. Insgesamt wird daraus der Schluss gezogen, dass die Reaktionen bei Exposition biologischer Systeme mit nichtthermisch wirkenden, amplitudenmodulierten EMF gering und sehr schwer mit Gesundheitsbeeinträchtigungen in Verbindung zu bringen sind. Es gibt keine überzeugenden Belege für Frequenz- und Leistungsdichtefenster in der Reaktion auf diese Felder [ICN 98].

Dies ist in Übereinstimmung mit dem aktuellen Kenntnisstand über biophysikalische Wirkungsmechanismen, wonach für Frequenzen des Mobilfunks die Schwellenwerte für die bekannten nichtthermischen Mechanismen (z.B. Membraneffekte oder Kraftwirkungen auf Zellen oder Molekülstrukturen) weit oberhalb der Schwellenwerte für thermische Reaktionen liegen. Daher sind für Frequenzen oberhalb von etwa 10 MHz für die Grenzwertfindung thermische Reaktionen als gesundheitlich relevante Reaktionen mit den geringsten Schwellenwerten entscheidend.

Hochfrequente elektromagnetische Felder dringen – abhängig von der Frequenz – unterschiedlich weit in biologisches Gewebe ein. Für Frequenzen des Mobilfunks sind dies wenige Zentimeter. Beim Gebrauch des Mobiltelefons direkt am Kopf erfolgt die Exposition im Nahfeldbereich, die im Kopf absorbierte Hochfrequenzenergie wird innerhalb eines kleinen Volumens in Wärme umgesetzt, die ihrerseits durch die Wärmeleitung und Blutzirkulation abgeleitet wird. Um lokale Übererwärmungen zu vermeiden, ist es erforderlich, die absorbierte Energie über kleine lokale Volumina zu betrachten. Untersuchungen haben ergeben, dass ein lokaler Wärmeeintrag von 20 W/kg, gemittelt über 10 g Gewebemasse, eine Temperaturerhöhung von weniger als 1°C verursacht.

Indirekte Reaktionen bei Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder

Bei Frequenzen von 100 kHz-110 MHz (die Obergrenze des FM-Rundfunkbandes) schwanken die Schwellenwerte des Kontaktstroms für biologische Reaktionen von der bloßen Wahrnehmung bis hin zu starken Schmerzen in Abhängigkeit von der Feldfrequenz nicht wesentlich. Die mittleren Schwellenwerte für die Wahrnehmung liegen bei Personen unterschiedlicher Größe bei 25 mA-40 mA und die für Schmerzen bei annähernd 30 mA-55 mA; oberhalb von 50 mA kann es zu schweren Verbrennungen der Gewebeteile kommen, die mit einem großen metallischen Leiter im Feld in Kontakt geraten.

A 1.3 Störbeeinflussung von elektronischen Körperhilfen und Implantaten

Kopplungen elektromagnetischer Felder an vom Menschen getragenen medizinischen Geräten (z.B. Herzschrittmacher, Insulinpumpen, Nervenstimulatoren u.a.) können zu einer Störbeeinflussung führen, die gesundheitliche Beeinträchtigungen zur Folge haben können. Die Implantatträger sind entsprechend zu informieren; ggf. sind starke Felder zu kennzeichnen.

⁵⁾ GSM: Global System for Mobile Communications

A 2 Bewertung wissenschaftlicher Studien niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder seit 1998

Der Bereich der niederfrequenten Felder umfasst elektrische und magnetische Wechselfelder mit Frequenzen bis zu 100 kHz. Niederfrequente Felder entstehen im Wesentlichen durch die elektrische Energieversorgung. Die Netzfrequenz und damit die Frequenz der entsprechenden Felder beträgt 50 Hz (USA: 60 Hz) bzw. bei der elektrischen Energieversorgung der Bahn $16\frac{2}{3}$ Hz. Während ein elektrisches Feld von jeder Leitung ausgeht, die an das Stromnetz angeschlossen ist, entstehen magnetische Felder nur, wenn ein Strom fließt, d.h. wenn elektrische Energie verbraucht wird. Verbesserte Abschirmungen und günstigere geometrische Anordnungen von Leitungen können die Intensität dieser Felder in der Umwelt verringern, ohne das eigentliche Ziel, den Transport von elektrischer Energie, zu behindern.

Reaktionen bei Exposition durch niederfrequente Felder können auf bekannte physikalische und physiologische Zusammenhänge zurückgeführt werden. Ob daneben weitere Wirkungsmechanismen existieren, die zu qualitativ anderen Reaktionen und gesundheitlichen Beeinflussungen führen, ist Gegenstand der laufenden wissenschaftlichen Diskussion.

Für die Erfassung möglicher Risiken sind epidemiologische Studien von besonderer Bedeutung. Epidemiologische Studien zeigen, ob statistisch ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten einer Krankheit und dem untersuchten Faktor vorliegt. Ein kausaler Zusammenhang kann durch epidemiologische Daten nicht bewiesen werden, weswegen eine Interpretation epidemiologischer Daten, ohne dass entsprechende Ergebnisse aus Laborexperimenten vorliegen, schwierig ist.

Die Ergebnisse von Untersuchungen an Probanden haben in der Regel eine unmittelbare Bedeutung für die Bewertung von möglichen Gesundheitsbeeinträchtigungen. Tierversuche können zeigen, ob sich eine Reaktion *in vivo* bemerkbar macht. Bei den *in vitro* Untersuchungen steht eher die Suche nach Wirkungsmechanismen im Vordergrund. Diese Untersuchungen sind notwendig, um Ergebnisse, die in Tierversuchen oder bei Untersuchungen an Probanden bzw. in epidemiologischen Studien gefunden werden, zu erklären bzw. bestätigen zu können. Eine gesundheitliche Bewertung von *in vitro* Untersuchungen ist jedoch ohne den Kontext entsprechender Ergebnisse von *in vivo* Untersuchungen kaum möglich. Daher konzentriert sich die folgende Übersicht der neueren Literatur auf epidemiologische Studien und *in vivo* Untersuchungen. In den meisten dieser Untersuchungen wurden linear polarisierte, sinusförmige Magnetfelder mit Netzfrequenz, 50 Hz bzw. 60 Hz, verwendet. Neuere Untersuchungen zu Wirkungen elektrischer Felder liegen kaum vor.

A 2.1 Niederfrequente Felder und Krebs

Wertheimer und Leeper [Wer 79] berichteten 1979 zum ersten Mal von einer epidemiologischen Studie, deren Ergebnisse auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Nähe von Stromleitungen und der Entstehung kindlicher Leukämie schließen ließen. Seitdem wurde eine Vielzahl von epidemiologischen Studien und *in vivo* Untersuchungen durchgeführt, um die Vermutung zu prüfen, ob eine lang anhaltende Exposition mit schwachen Magnetfeldern die Krebserkrankung fördern könnte. Dabei wurden insbesondere Leukämie, Gehirntumoren sowie Brustkrebs untersucht.

A 2.1.1 Tierexperimentelle Studien zu Krebs

Bei den tierexperimentellen Untersuchungen zu Krebs sind Studien, bei denen die spontane Krebsentstehung untersucht wird, und Studien, bei denen die Krebserkrankung nach Induktion von Tumoren durch ein bekanntes Kanzerogen (z. B. ionisierende Strahlung) oder nach Implantation von Krebszellen untersucht wird, zu unterscheiden.

Die Untersuchungen zur spontanen Tumorbildung können Einflüsse auf alle Phasen der Krebsentwicklung einschließlich der Initiation zeigen. Sie haben den Nachteil, dass aufgrund der zumeist sehr kleinen spontanen Tumorrates und der begrenzten Anzahl an Versuchstieren i. Allg. nur eine sehr deutliche Erhöhung der spontanen Tumorrates statistisch nachgewiesen werden kann. Diese Einschränkung gilt auch für die entsprechenden neueren Studien.

Die Untersuchung verschiedener Gruppen von Ratten, die mit 2 μT -1000 μT über 2 Jahre, d.h. nahezu lebenslang exponiert wurden, ergab keine Veränderung der allgemeinen Tumorrates [Boo 99a]. Die Betrachtung verschiedener Tumoren zeigte in den unterschiedlichen Gruppen keine Reaktionen, leichte Erhöhungen bestimmter Tumoren (männliche Tiere bei 2 μT und 200 μT kontinuierliche Exposition) sowie verringerte Tumorrates (Leukämie bei männlichen Ratten bei 1000 μT intermittierende Exposition [1 h an – 1 h aus]). Eine Erhöhung der Tumorrates bezogen auf Leukämie, Brustkrebs oder Hirntumoren konnte nicht festgestellt werden. In einer weiteren Studie wurden weibliche Ratten ebenfalls über 2 Jahre exponiert [Man 97]. Die Intensitäten betragen bei den verschiedenen Gruppen 2 μT -2000 μT . Es zeigte sich kein Einfluss der Exposition auf die Tumorentwicklung. Bei der Studie wurde besonders auf Leukämie, Hirntumoren und Brustkrebs geachtet. Auch bei Exposition über 2 Jahre mit Feldern höherer Intensitäten (500 μT und 5000 μT) ergab sich kein Zusammenhang zu diesen Krebserkrankungen [Yas 97]. Eine Studie an Mäusen ergab ebenfalls keine Erhöhung der Tumorrates einschließlich Leukämie, Hirntumoren und Brustkrebs [McC 99] durch die Magnetfeldexposition der verschiedenen Gruppen (2 μT -1000 μT ; kontinuierlich und intermittierend).

Untersuchungen des Einflusses der Feldexposition auf bestimmte Krebserkrankungen werden anhand verschiedener Tiermodelle, die zumeist eine Krebsinduktion mit bekannten krebsinduzierenden Agenzien beinhalten, durchgeführt.

Die Vermutung, dass niederfrequente Magnetfelder eine fördernde Reaktion hinsichtlich Hirntumoren haben, konnte an einem entsprechenden Tiermodell, bei dem neurogene Tumoren bei Ratten chemisch induziert werden, nicht bestätigt werden [Man 00]. Dabei erfolgte die Exposition mit Feldern von 2 μT -2000 μT . Weitere neuere Studien wurden anhand von Tiermodellen für Lymphome bei Intensitäten von 1 μT -1000 μT durchgeführt ohne einen entsprechenden Zusammenhang zeigen zu können. [McC 98; Har 98]. Die Untersuchung eines möglichen Einflusses auf die Entwicklung von Hautkrebs ergab keinen Zusammenhang bei einer Magnetfeldexposition von 2 mT, 6 h pro Tag [Sas 98; DiG 99]. An einem Hautkrebs-Tiermodell, bei dem bei für diese Erkrankung besonders sensiblen Mäusen mittels UV-Strahlung Krebs induziert wird, zeigte sich ein beschleunigtes Wachstum der induzierten Geschwüre bei den mit einem Magnetfeld von 100 μT exponierten Tieren [Kum 98]. Die Autoren sehen ihre Ergebnisse als Bestätigung der Annahme einer tumorpromovierenden bzw. -copromovierenden Reaktion bei Exposition durch niederfrequente Magnetfelder.

Frühere Untersuchungen von Löscher et al., haben eine fördernde Wirkung von 50 Hz-Magnetfeldern (100 μT) auf chemisch induzierten Brustkrebs gezeigt. Diese Ergebnisse sind aufgrund der hohen Inzidenz der Krankheit in der Bevölkerung von besonderem Interesse. Die Ergebnisse konnten zwar im selben [Mev 98] nicht aber in anderen Laboratorien bestätigt

werden [And 99; Boo 99b; Boo 00]. Die Diskrepanz der Ergebnisse zur feldbedingten Krebsinduktion liegt daran, dass bereits das Tiermodell in der Grundvoraussetzung, nämlich die Auslösung der chemisch induzierten Brustkrebs deutlich zwischen den Arbeitsgruppen abwich. Ein möglicher Einfluss des Magnetfeldes auf die Krebspromotion wäre durch den massiven Einfluss des Kanzerogens kaum detektierbar gewesen. An diesem Beispiel wird die schwierige Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Tierexperimenten auf den Menschen deutlich, wenn bereits innerhalb eines leicht genetisch unterschiedlichen Rattenstamms das Krebsmodell im Ansatz unterschiedliche Ausgangsdaten liefert. Insgesamt bieten die Studien an Nagetieren keine Unterstützung für einen entsprechenden Verdacht beim Menschen.

Die Frage, ob die chronische Magnetfeldexposition Leukämieerkrankungen beeinflussen kann, wurde an einem Tiermodell für akute myeloische Leukämie bei Erwachsenen, bei dem Ratten Leukämiezellen implantiert werden, untersucht. Dabei unterstützen die Daten einer Studie, bei der die Tiere mit einem Magnetfeld von 100 μT exponiert wurden, nicht die Hypothese, dass ein entsprechender Zusammenhang vorliegt [Dev 00]. In einer weiteren Leukämiestudie, bei der die Ratten einem Feld von 1000 μT ausgesetzt waren, wurde ebenfalls kein Zusammenhang zur Progression der Krankheit gefunden [Mor 99].

Für die Untersuchungen unterschiedlicher Krebsarten wurden verschiedene Tiermodelle verwendet, die jeweils eine möglichst große Empfindlichkeit für die beobachtete Krebserkrankung aufweisen. Die an unterschiedlichen Tiermodellen gewonnenen Ergebnisse sind nicht direkt miteinander vergleichbar. Die vereinzelt Befunde, die einen Einfluss von niederfrequenten Magnetfeldern auf das Auftreten bzw. den Verlauf von Krebserkrankungen zeigen, stellen aus der Sicht der SSK einen Hinweis dar, der durch weitere Studien überprüft werden sollte.

A 2.1.2 Epidemiologische Studien zu Krebs bei Kindern

Der Zusammenhang zwischen einer berufsbedingten Exposition des Vaters und Krebs bei den Nachkommen wurde bereits in früheren Studien untersucht. Dabei ergaben sich z.T. Korrelationen bezüglich Krebs des Zentralnervensystems (ZNS). Diese Studien weisen aber methodische Limitierungen auf, die ihre Aussagen in Frage stellen. Dazu gehören vor allem die geringen Fallzahlen, vage Schätzungen der Exposition und die ungenügende Berücksichtigung von anderen möglichen Risikofaktoren. Dies trifft auch auf eine neuere Studie zu, die bei Kindern, deren Väter berufsbedingt exponiert waren, ein verringertes Risiko für Krebs des ZNS findet. Allerdings wurde auch ein erhöhtes Leukämierisiko bei den Kindern mit Vätern in der höchsten Expositionskategorie ($\geq 0,30 \mu\text{T}$) beschrieben [Fey 00].

In den aktuellen Studien zur Exposition der Mütter während der Schwangerschaft durch Haushaltsgeräte, Heizdecken u.a. [Sor 99] bzw. während der beruflichen Tätigkeit [Hat 98] wurde die Exposition retrospektiv durch Interviews oder die Zuordnung von Berufskategorien ermittelt. Dabei zeigte sich in den meisten Fällen kein statistisch signifikantes Ergebnis, in einigen Fällen eine statistisch signifikante Erhöhung und in anderen eine statistisch signifikante Verringerung des Krankheitsrisikos im Zusammenhang mit erhöhten Magnetfeldexpositionen. Die Autoren der Studien folgern, dass aus ihren Daten auf keinen Zusammenhang zwischen dem Krebsrisiko der Kinder und der Exposition der Mütter geschlossen werden kann.

Seit 1998 wurden die Ergebnisse verschiedener, großer epidemiologischer Studien zum Auftreten von Krebs, v.a. Leukämie bei Kindern in Abhängigkeit von der Magnetfeldexposition im Wohnbereich veröffentlicht. Insbesondere sind die sehr umfangreichen Studien aus Groß-

britannien, UK Childhood Cancer Study [UK 99], Kanada [McB 99] sowie die bundesweite Studie von Schüz et al. [Sch 01] zu erwähnen. Weitere neuere Studien sind die von Green et al. [Gre 99] (Kanada), die neuseeländische Studie von Dockerty et al. [Doc 99] und eine italienische Studie mit allerdings deutlichen methodischen Limitierungen [Bia 00]. Die Ergebnisse der vorliegenden Studien deuten auf eine Korrelation zwischen der Höhe der Magnetfeldexposition und der Leukämierate hin, die allerdings am Rande der statistischen Nachweisbarkeit liegt und durch die einzelnen Studien nicht klar gezeigt werden kann. Die deutsche Studie zeigt v.a., dass die Exposition in der Nacht von besonderer Bedeutung sein könnte. Die bundesweite Studie kommt zu dem Schluss, dass 1% der Fälle aller Leukämien bei Kindern in Deutschland (3 bis 4 Fälle von ca. 620 Fällen im Jahr) auf die Exposition durch magnetische Felder zurückzuführen wären, sofern ein kausaler Zusammenhang vorliegen würde. Die Aussagekraft der Studie wird durch die hohe Teilnehmerausfallrate (ca. 50%) beschränkt. Anhaltspunkte für eine besondere Bedeutung der nächtlichen Exposition ergab auch die Neuauswertung der Studie von Linet et al. [Lin 97], aus deren Daten insgesamt jedoch kein Zusammenhang zwischen Magnetfeldexposition und Krebsrate abzuleiten ist [Auv 00]. In einer aktuellen Metaanalyse neuerer Arbeiten wurden die errechneten oder gemessenen Magnetfelder in der Wohnung, die im Jahr vor der Krankheitsdiagnose bewohnt wurde, betrachtet [Ahl 00]. Die Zusammenfassung der Daten bestätigt die Aussage der Untersuchung von Schüz et al. [Sch 01]. Insgesamt zeigt sich keine Erhöhung des relativen Leukämierisikos bei einer über 24 Stunden gemittelten Exposition unterhalb von $0,4 \mu\text{T}$ und eine statistisch signifikante Erhöhung um den Faktor 2 bei Feldern oberhalb von $0,4 \mu\text{T}$. Die Autoren der Studie weisen darauf hin, dass dieses Ergebnis durch die Auswahl der Fälle und Kontrollen beeinflusst worden sein könnte. Ein ähnliches Ergebnis zeigt die Metaanalyse von Greenland et al. [Grn 00]. Ein statistisch signifikanter Zusammenhang konnte bei durchschnittlichen Expositionen oberhalb von $0,3 \mu\text{T}$ gezeigt werden.

Ein grundsätzliches Problem der Untersuchungen auch aufgrund der unterschiedlichen Erscheinungsformen zur kindlichen Leukämie ist, dass für den Großteil der auftretenden Fälle die Ursachen nicht identifiziert werden können. Daher kann auch nicht überprüft werden, ob die Risiken bei Exponierten und Nichtexponierten gleich verteilt sind.

Ein plausibler Wirkungsmechanismus, anhand dessen die gefundene Korrelation zum Auftreten kindlicher Leukämie erklärt werden könnte, ist nicht bekannt und bestätigende Befunde aus tierexperimentellen Untersuchungen liegen nicht vor. Dennoch bilden die sich gegenseitig stützenden epidemiologischen Befunde aber aus der Sicht der SSK die Basis für einen wissenschaftlich begründeten Verdacht einer gesundheitlichen Beeinträchtigung bei Intensitäten weit unterhalb der derzeitigen Grenzwerte und unterstreichen die Notwendigkeit der weiteren Erforschung von möglichen Kausalzusammenhängen.

A 2.1.3 Epidemiologische Studien zu Krebs bei Erwachsenen

Bei den vorliegenden Untersuchungen zur Exposition am Arbeitsplatz begrenzen verschiedene methodische Einschränkungen die Aussagekraft der Ergebnisse. Dazu gehören v.a. die bei allen Studien sehr problematische Expositionserfassung und die ungenügende Berücksichtigung von Risikofaktoren, die mit dem Arbeitsplatz verbunden sind, wie z.B. Lösungsmitteldämpfe. Diese Kritik gilt auch für die neueren Studien, bei denen für Non-Hodgkin Lymphome und Leukämie zwar kein statistischer Zusammenhang mit der Magnetfeldexposition aber mit dem elektrischen Feld am Arbeitsplatz gefunden wurde [Vil 00a; Vil 00b (60 Hz, Schwellenwerte: einige 100 V/m)].

Ein Schwerpunkt lag in den letzten Jahren bei der Untersuchung von Brustkrebs bei Frauen, der sich gegenüber anderen Krebserkrankungen durch eine relativ hohe Inzidenz in industrialisierten Staaten auszeichnet und dessen auslösende Faktoren in erheblichem Umfang derzeit nicht bekannt sind. Die neueren Untersuchungen zur Exposition durch die Verwendung von elektrischen Geräten [Zhe 00; Gam 98; Coo 98; Lad 00], zur Exposition im Wohnbereich [Fey 98: Felder durch Hochspannungsleitungen $\geq 0,3 \mu\text{T}$] und die Untersuchung zur häuslichen und berufsbedingten Exposition [For 00; Exposition $\geq 0,25 \mu\text{T}$] ergeben keinen Hinweis auf einen Zusammenhang zu Brustkrebs. Eine Studie zur berufsbedingten Exposition ergab unter Verwendung eines kumulativen Expositionsmaßes einen statistisch signifikanten Zusammenhang [Kli 99]. Die vorliegenden Ergebnisse zur berufsbedingten Exposition einschließlich der neueren Studien [u.a. Joh 98 – Angestellte von Energieversorgungsunternehmen; Pol 99 – Vergleich verschiedener Berufsgruppen] stellen aber auch hinsichtlich der beruflichen Expositionen insgesamt keinen Hinweis auf eine Erhöhung des Brustkrebsrisikos durch die Magnetfeldexposition dar. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Studien bisher nur eine grobe Expositionserfassung anwenden, z.T. über eine geringe statistische Teststärke verfügen und gerade bei Krebserkrankungen bisher unbekannte Einflussfaktoren eine große Rolle spielen können.

Die neueren epidemiologischen Studien zu Krebs des Zentralnervensystems untersuchen die Exposition in der Wohnumgebung [Wre 99] bzw. am Arbeitsplatz [Joh 98; Rod 98; Coc 99]. Die Ergebnisse zeigen keinen entsprechenden Zusammenhang. Allerdings weisen diese Studien methodische Limitierungen wie die Möglichkeit von Fehlklassifikationen, die ungenügende Berücksichtigung anderer Einflussfaktoren und geringe Fallzahlen auf. Anhand dieser Arbeiten kann daher keine Aussage zu statistisch geringen Risiken getroffen werden.

Die epidemiologischen Daten zu Krebs bei Erwachsenen stellen aus der Sicht der SSK insgesamt nicht mehr als einen schwachen Hinweis auf einen möglichen Zusammenhang mit einer Exposition dar.

A 2.2 Niederfrequente Felder und neurodegenerative Erkrankungen, Einflüsse auf die Reproduktion und andere gesundheitliche Beeinträchtigungen außer Krebs

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl verschiedener Endpunkte im Zusammenhang mit möglichen gesundheitlichen Beeinträchtigungen außer Krebs untersucht.

A 2.2.1 Epidemiologische Studien zu neurodegenerativen Erkrankungen

Verschiedene neuere Studien wurden zu neurodegenerativen Krankheiten und einer berufsbedingten Exposition mit niederfrequenten Feldern veröffentlicht: Alzheimer [Gra 99; Sav 98a; Sav 98b, Fey 98], Amyotrophische Lateralsklerose (ALS) [Sav 98a; Sav 98b; Joh 98; Joh 99; Joh 00], Parkinson [Sav 98a; Sav 98b] und Multiple Sklerose [Joh 99].

Die Aussagekraft der Studien ist v.a. aufgrund der indirekten, z.T. über Jahrzehnte hinweg retrospektiv erfolgten Expositionsbestimmung beschränkt. Hinsichtlich Parkinson, Alzheimer und Multipler Sklerose ergibt sich aus den Ergebnissen nicht mehr als ein schwacher Hinweis auf einen Zusammenhang. Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Auftreten von ALS sind z.T. methodisch höherwertig und bilden insgesamt einen schwachen wissenschaftlichen Verdacht [Sav 98b; Joh 98; Joh 99; Joh 00]. In diesem Zusammenhang wurde die Hypothese entwickelt, dass Faktoren, die mit der Magnetfeldexposition korreliert sind, z.B. elektrische

Schläge [Joh 98; Joh 00], für die gefundene Korrelation verantwortlich sein könnten. Ob eine gesundheitlich relevante Reaktion vorliegt, kann aus Sicht der SSK nur mittels weiterer Forschung geklärt werden.

Tierversuche oder Untersuchungen an Zellen und Geweben, die eine Beeinflussung neurodegenerativer Erkrankungen nahe legen, liegen bisher nicht vor.

A 2.2.2 Einflüsse auf die Reproduktion, teratogene Reaktionen

Die neueren epidemiologischen Studien bezüglich schädigender Einflüsse niederfrequenter Felder auf die Reproduktion betrachteten im Wesentlichen berufliche Expositionen und Expositionen durch elektrische Geräte, v.a. Heizdecken. Dabei wurden die Fruchtbarkeit [Hjo 99; Mur 98], spontane Aborte [Bel 98], plötzlicher Kindstod [Gra 00] und teratogene Reaktionen [Sha 99] untersucht. Diese Studien waren aufgrund grober Expositionsbestimmungen, geringer Teilnehmerzahlen oder anderer methodischer Einschränkungen nur zur Erfassung sehr deutlicher Zusammenhänge geeignet.

Bei den neueren Untersuchungen an Säugetieren, zumeist Ratten und Mäusen, zeigen die Ergebnisse von zwei Studien [Huu 98b; Mul 98] einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Exposition und bestimmten Parametern wie dem Auftreten von Skelettveränderungen bei den Föten eines bestimmten Mäusestammes (nicht aber bei einem anderen Stamm [Huu 98a]). Beim Großteil der Arbeiten konnten dagegen keine Einflüsse auf die Reproduktion bzw. keine teratogenen Reaktionen festgestellt werden [Bre 99; Huu 98a; Rya 99; Rya 00; Daw 98]. Für die Expositionen wurden magnetische Wechselfelder mit Flussdichten von wenigen μT bis in den mT-Bereich verwendet, wobei die Netzfrequenz (50 Hz bzw. 60 Hz), die ersten Harmonischen (Oberwellen) sowie höhere Frequenzen, wie sie z.B. durch Monitore erzeugt werden können (Sägezahn, 10 kHz und 20 kHz), zum Einsatz kamen. Die Expositionen erfolgten kontinuierlich oder intermittierend (z.B. eine Stunde an/aus im Wechsel). Untersucht wurden neben Spermatogenese und Östrus-Zyklus der Elterngeneration teratogene Effekte, Gewicht und Anzahl der Feten u.v.m.

Insgesamt geben die Ergebnisse der neueren epidemiologischen Studien und *in vivo* Untersuchungen keinen wissenschaftlichen Hinweis auf negative Einflüsse niederfrequenter Felder, wie sie durch die Grenzwerte zugelassen werden, auf die Reproduktion.

A 2.2.3 Einflüsse auf das kardiovaskuläre System

Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse von Probandenstudien zur Variabilität des Herzschlags in Abhängigkeit von einer nächtlichen Magnetfeldexposition mit einigen $10 \mu\text{T}$ [Sas 98, intermittierende Exposition; Sai 99] wurde die Hypothese aufgestellt, dass langfristige Expositionen mit niederfrequenten Magnetfeldern das Risiko von bestimmten Herzerkrankungen, wie z.B. akuter Herzinfarkt erhöhen. Dabei wird angenommen, dass die Exposition die autonome Kontrolle des Herzens verringert. Herzerkrankungen, die auf langfristige Veränderungen des Gewebes, wie z.B. bei Arteriosklerose, zurückzuführen sind, sollten nicht betroffen sein. Eine epidemiologische Studie [Sav 99] fand einen Zusammenhang zwischen der Dauer der Beschäftigung an einem Arbeitsplatz mit wahrscheinlich höherer Exposition und dem Auftreten von Todesfällen, die auf akute Herzrhythmusstörungen bzw. akuten Herzinfarkt zurückzuführen sind. Vor allem die indirekte retrospektive Expositionserfassung über lange Zeiträume und die Zuordnung und Interpretation der Todesursachen beschränken aber die Aussagekraft der Studie. Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse ist zu bedenken,

dass keine plausible Erklärung dafür vorliegt, wie eine akute, reversible Beeinflussung der Variabilität des Herzschlags zu einem höheren Risiko nach z.T. Jahrzehnten führen könnte. Eine weitere, gut kontrollierte Laborstudie zeigte keinen Einfluss einer nächtlichen Magnetfeldexposition (127 μT , 60 Hz) auf die Variabilität des Herzschlags [Gra 00a]. Möglicherweise tritt die Reaktion nur bei gleichzeitiger Störung des Schlafes durch andere Faktoren auf [Gra 00b].

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Frage, ob Einflüsse auf das kardiovaskuläre System auftreten, sind insgesamt als wissenschaftlicher Hinweis zu werten. Ob eine gesundheitlich relevante Reaktion vorliegt, kann aus Sicht der SSK nur mittels weiterer Forschung geklärt werden.

A 2.2.4 Einflüsse auf den Melatoninhaushalt

Das Hormon Melatonin wird in der Zirbeldrüse gebildet. Die Freisetzung folgt einem Tag-Nacht-Rhythmus. Am Tage ist die Melatoninkonzentration im Blut gering und in der Nacht hoch. Die Bildung und Freisetzung in den Blutkreislauf wird bei Licht unterdrückt. Die inter- und intraindividuelle Variationen der Melatoninkonzentration sind sehr groß und werden von Faktoren wie Alter, Geschlecht, Lebensgewohnheiten (z.B. Rauchen) bestimmt. Melatonin dient als interner Taktgeber für physiologische Vorgänge und zeigt entsprechend vielfältige Wirkungen. Im Zusammenhang mit Krebserkrankungen werden vor allem die hemmende Reaktion auf die Zellteilung sowie die Eigenschaft des Melatonins als Radikalfänger betrachtet.

Bereits vor der Diskussion über eine Beeinflussung durch elektromagnetische Felder wurden Hypothesen aufgestellt, wonach eine Verringerung der Melatoninbildung mit einer Förderung der Krebsentwicklung einhergehen könnte. Nach einer zweiten Hypothese könnte eine verringerte Melatoninproduktion einen negativen Einfluss auf das psychische Wohlbefinden haben. Allerdings haben die älteren Studien weder überzeugend einen Einfluss von Magnetfeldexpositionen auf den Melatoninhaushalt des Menschen zeigen können, noch sprachen die Studienergebnisse insgesamt für einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Feldern und Endpunkten wie Krebs oder Beeinträchtigung des psychischen Wohlbefindens. Die Ergebnisse von Tierversuchen, die im Wesentlichen an Nagetieren durchgeführt wurden, haben kein einheitliches Bild ergeben. In den neueren Arbeiten konnte überwiegend kein Zusammenhang bei Tieren wie auch bei Probanden gefunden werden [Yel 98; Bak 99; Lös 98; Joh 98; Hei 99; Probandenversuche: Hon 01 (bis ca. 10 μT); Gra 00 (30 μT); Ake 99 (50 Hz, 1 μT)]. In einer Untersuchung an Mäusen [chronische Exposition, 15 μT , Reaktion nach drei Generationen; Pic 98] und einer an Sibirischen Zwerghamstern [akute Reaktion bei 100 μT ; Will 99;] zeigte sich im Zusammenhang mit der Exposition eine Verringerung des Melatoninspiegels. Bei einer Probandenstudie wurde eine Verzögerung des nächtlichen Anstieges der Melatoninkonzentration bei vorhergehender Exposition mit einem zirkular polarisierten Feld von 20 μT beobachtet [Woo 98].

Bei Beschäftigten an Arbeitsplätzen mit zeitlich stabiler Magnetfeldexposition bzw. mit Exposition mit einem elliptisch polarisierten Magnetfeld konnte im Gegensatz zu Beschäftigten an Arbeitsplätzen mit zeitlich variablerer Magnetfeldexposition bzw. mit Exposition mit linear polarisierten Feldern ein Einfluss auf die Melatoninkonzentration im Blut gezeigt werden [Bur 99; Bur 00]. Eine Studie zeigte bei Näherinnen, die während der Arbeitszeit einem erhöhten Magnetfeld ausgesetzt sind, eine verringerte nächtliche Melatoninproduktion im Vergleich zu Büroangestellten [Juu 00].

Die bisherigen Studienergebnisse liefern ein sehr uneinheitliches Bild bei Tierversuchen, jedoch keinen Hinweis für eine gesundheitliche Beeinträchtigung beim Menschen. Aus Sicht der SSK sollten die offenen Fragen durch entsprechende Untersuchungen geklärt werden.

A 2.2.5 Einflüsse auf das zentrale Nervensystem (ZNS) und Beeinflussung kognitiver Funktionen

Die derzeit gültigen Grenzwerte für niederfrequente Felder orientieren sich an den Reizwirkungen in erregbaren Geweben. Das Phänomen der Magnetophosphene (magnetfeldinduzierte Lichterscheinung im Auge), die oberhalb von 2000 μT wahrgenommen werden können, wurde bisher nicht als kritisch für die Grenzwertfestlegung betrachtet, da Magnetophosphene selbst keine gesundheitliche Relevanz besitzen. In neueren Konzeptentwürfen werden Grenzwerte z.T. an Magnetophosphenen ausgerichtet [GNL 00], unter anderem, weil sie als Hinweise auf mögliche Beeinflussungen des ZNS gewertet werden [Rei 00]. Weitere Untersuchungen sollten klären, inwieweit Magnetophosphene tatsächlich als Hinweise auf gesundheitliche Beeinträchtigung des ZNS zu sehen sind.

Die Ergebnisse neuerer Probandenstudien deuten auf eine Beeinflussung kognitiver Funktionen durch die Exposition mit 50 Hz- bzw. 60 Hz-Magnetfeldern hin [Pre 98 (600 μT); Cra 99 (100 μT)]. Andere Studien zeigten an anderen Parametern keine entsprechende Beeinflussung [Gra 99 (14 μT und 28 μT)].

In diesem Zusammenhang sind auch Tierversuche an Mäusen und Ratten zu beachten, bei denen eine Veränderung des räumlichen Lernverhaltens nach Exposition mit niederfrequenten Magnetfeldern beobachtet wurde [Lai 98: 60 Hz, 1000 μT ; Sie 98a: 50 Hz, 750 μT ; Sie 98b: 50 Hz, Schwelle zwischen 7,5 μT und 75 μT].

Hinsichtlich der Frage nach einer Beeinflussung kognitiver Funktionen und ggf. der Relevanz einer solchen Beeinflussung besteht Forschungsbedarf.

A 2.2.6 Untersuchungen zu Beeinflussungen des Schlafes

Zu möglichen Beeinflussungen des Schlafes durch magnetische 50 Hz-Felder liegen widersprüchliche Studien vor. Graham und Cook [Gra 99] berichten über eine Beeinträchtigung des Schlafes bei intermittierenden, nicht jedoch bei sinusförmigen Feldern einer Stärke von ca. 30 μT , Akerstedt et al. [Ake 99] hingegen über eine akute Reaktion von sinusförmigen Feldern von 1 μT . In einer umfangreicheren Schlafstudie in den Wohnungen der Probanden mit nächtlichen Expositionen gegenüber elektrischen 50 Hz-Feldern von 15 V/m-280 V/m alleine oder in Kombination mit magnetischen Feldern von 1,4 μT -7,7 μT wurde über ein verbessertes Aufwachbefinden berichtet, eine statistisch signifikante Beeinflussung der Schlafqualitätsparameter konnte nicht gefunden werden [Mül 00].

Die Ergebnisse sind kontrovers und werden lediglich als wissenschaftlicher Hinweis auf eine Beeinflussung des Schlafes durch elektromagnetische Felder bewertet.

A 2.2.7 Psychische Beeinflussungen wie z.B. Depression und Suizid

Die meisten der früheren Untersuchungen zu psychischen Beeinflussungen sind aufgrund methodischer Limitierungen nicht geeignet, Aussagen über einen Zusammenhang zu geben. Eine neuere epidemiologische Studie [Wji 00] zeigt einen statistischen Zusammenhang zwischen

Suizid und der Exposition am Arbeitsplatz. Allerdings wurden bei dieser Studie die wichtigsten bekannten Faktoren, die mit Suizid in Verbindung stehen, z.B. Drogenkonsum, psychische Erkrankungen, familiärer und sozialer Stress, nicht erfasst.

Die vorliegenden Ergebnisse sind nicht als Hinweis für einen kausalen Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern zu werten.

A 2.2.8 Elektrosensibilität

Bereits eine frühere europaweite Studie hat gezeigt, dass die Anzahl von Personen, die sich als elektrosensibel bezeichnen, regional sehr unterschiedlich ist und ein Nord-Süd-Gefälle aufweist [Ber 97]. Ein Nachweis, dass schwache Magnetfelder Krankheitssymptome verursachen könnten, war bisher nicht möglich. Laboruntersuchungen ergaben, dass Symptome mit der subjektiven Überzeugung über das Vorhandensein von Feldern und nicht mit deren tatsächlichem Auftreten korreliert waren [Wen 94].

In Untersuchungen zur Wahrnehmbarkeit schwacher elektrischer und magnetischer 50 Hz-Felder (100 V/m bzw. 4 μ T) ergaben sich bei einem zweiseitigen statistischen Test, also der Einbeziehung sowohl richtiger als auch falscher Antworten, statistisch signifikante Ergebnisse. Die Untergruppe der elektrosensiblen Personen unterschied sich jedoch nicht von der Kontrollgruppe, ebenso konnten keine Unterschiede bezüglich einer Beeinflussung der Schlafqualität gefunden werden [Mül 00].

Gruppen von Personen, die über Gesundheitsbeeinträchtigungen klagen, die sie auf die Einwirkung elektromagnetischer Felder zurückführen, sind sehr inhomogen, sowohl in Bezug auf ihre soziologischen Eigenschaften und das Beschwerdebild als auch bezüglich objektiv erfassbarer Empfindlichkeitsparameter. Das bedeutet, dass Elektrosensibilität medizinisch nach wie vor ein Arbeitsbegriff ist und sich auch indirekt nicht über eine Symptom- oder Risikogruppencharakterisierung erfassen lässt.

Der Leidensdruck der betroffenen Personen kann jedoch erheblich sein und die Überzeugung von einer kausalen Rolle elektromagnetischer Felder so groß werden, dass sich elektrosensible Personen zu gravierenden Änderungen der Lebensumstände entschließen. Im Zuge der multidisziplinären Behandlung Betroffener ist die Reduzierung von Feldern einer der angewendeten Ansätze [Hil 98]. Ein kausaler Zusammenhang zu elektromagnetischen Feldern kann daraus jedoch nicht abgeleitet werden.

Die bisherigen Ergebnisse lassen es nicht zu, die Elektrosensibilitäts-Hypothese zu verwerfen. Sie weisen jedoch auch darauf hin, dass außer der hypothetischen Rolle der elektromagnetischen Felder auch andere Faktoren eine wesentliche Bedeutung haben müssen. Die bisherigen Ergebnisse reichen derzeit nicht aus, um einen ausreichenden wissenschaftlich begründeten Verdacht darzustellen. Weitere Forschung ist jedoch gerechtfertigt.

A 3 Bewertung wissenschaftlicher Studien hochfrequenter elektromagnetischer Felder seit 1998

Die neueren Studien beziehen sich aus Aktualitätsgründen hauptsächlich auf Felder der Mobilfunkkommunikation, wie sie z.B. auch von einer britischen Expertengruppe zu Mobilfunk [IEG 00] bewertet wurden. Im Gegensatz zu den niederfrequenten Feldern sind für hochfrequente Felder epidemiologische Studien mit Expositionen durch die relativ junge Mobilfunktechnologie kaum oder beruflich bedingter Expositionen ebenfalls nicht zahlreich vorhanden. Die betrachteten Arbeiten sind von Untersuchungen an Zellen bis hin zum Menschen steigend geordnet.

A 3.1 Interaktionen hochfrequenter elektromagnetischer Felder mit Zellen und subzellulären Strukturen

A 3.1.1 Moleküle und Membranen

Die Quantenenergie der hochfrequenten elektromagnetischen Felder ist so gering, dass eine Ionisierung von Atomen und Molekülen aus physikalischen Gründen nicht möglich ist. Experimentell konnten bislang verschiedene, physikalische Hypothesen nicht bestätigt werden, wie z.B. die stochastische Resonanz, kooperative Effekte und nicht lineare Interaktionen in thermodynamischen Prozessen bei niedrigen Expositionsintensitäten [Beh 99]. Nichtthermische Effekte durch Resonanzphänomene konnten bisher auch nicht bestätigt werden.

An künstlichen Membranen, d.h. planaren Lipid-Bilayermembranen, konnte gezeigt werden, dass elektromagnetische Felder mit einer Frequenz von 900 MHz (mit 217 Hz gepulst) einen Stromfluss durch die Membran verursachten [Mey 00]. Ein Strom durch die Membran von lebenden Muskelzellen trat bei vergleichbaren Bedingungen dagegen nicht auf [Lin 99]. Theoretische Betrachtungen [Mey 00] ergaben, dass die elektrischen Feldstärken an den künstlichen Membranen bei der verwendeten Versuchsanordnung um zwei Größenordnungen höher waren, als sie normalerweise an lebenden Zellen auftreten. Die untypisch hohen elektrischen Felder könnten über sehr lokale, thermische Wechselwirkungen eine Ionenpermeabilität oder durch lokale Spitzfelder einen Stromfluss durch die Membran über den Mechanismus der Elektroporation ermöglicht haben. Die Untersuchungen verdeutlichen die grundsätzliche Problematik, dass Felder geringer Intensität durch den Versuchsaufbau beeinflusst werden können und damit das Ergebnis verändern. Deswegen sind weitere Untersuchungen unter gut kontrollierten Bedingungen erforderlich.

A 3.1.2 Kalzium

Kalziumionen sind nicht nur bei vielen intrazellulären biochemischen Prozessen, sondern auch bei der Weiterleitung von Informationen in Form von Aktionspotentialen im neuronalen Gewebe oder Funktion der Muskelzellen sehr wichtig. In den 80er Jahren konnten verschiedene Arbeitsgruppen zeigen, dass niederfrequent amplitudenmodulierte Hochfrequenzfelder einen Einfluss auf die Stabilität des Kalziumgleichgewichtes, gemessen als Kalziumefflux (Isotop $^{45}\text{Ca}^{2+}$), bei sehr engen Fensterfrequenzen haben [UNE 93].

Eine Überprüfung der Fenster mit der Modulationfrequenz 16 Hz für den Kalziumefflux oder eines möglichen Fensters bei der technisch verwendeten GSM Pulsfrequenz 217 Hz, wurde in

den letzten Jahren mit genaueren Messmethoden (Patch Clamp, Fluoreszenzindikator Fura-2) durchgeführt. Bei den für GSM üblichen gepulsten Hochfrequenzfeldern konnte mit der sensitiven Patch Clamp Messtechnik kein Einfluss auf den Kalziumionentransport durch die Membran von Herzmuskelzellen festgestellt werden [Lin 99]. Mit derselben Technik wurde ebenfalls bei der Modulationsfrequenz 16 Hz (Basisfrequenz 900 MHz), der Kalziumtransport an kultivierten Nervenzellen untersucht. Es zeigte sich keine feldbedingte Veränderung der Kalziumströme [Mey 98]. Feldbedingte intrazelluläre Konzentrationsveränderungen, Kalziumoszillationen oder Gesamtkonzentration, die an Lymphozyten mit der Fluoreszenztechnik gemessen wurden, wurden von hochfrequenten Feldern der GSM-Technologie kaum beeinflusst, d.h. die Untersuchungen ergaben keinen statistisch signifikanten Zusammenhang [Gol 00].

Aus den o.g. Fakten lässt sich zusammenfassen, dass mit modernen Analysetechniken die älteren signifikanten Ergebnisse zum Kalziumgleichgewicht nicht bestätigt, aber, da ein anderer Endpunkt untersucht wurde, auch nicht widerlegt wurden. Weitere Forschung ist daher gerechtfertigt.

A 3.2 Untersuchungen zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Menschen und Tiere

A 3.2.1 Verhalten bei Tieren

Aus Untersuchungen der 60er und 70er Jahre ist bekannt, dass eine Temperaturerhöhung des Körpers Verhalten, Lernen und Gedächtnis verändert. Die Schwelle für Veränderungen des Lernverhaltens liegt bei Nagetieren bei einer Körpertemperaturerhöhung von 1°C (2,5 W/kg-8 W/kg spezifische Absorptionsrate, SAR, für den Ganzkörper). Die wenigen Versuche, die bezüglich des räumlichen Lernens durchgeführt wurden, zeigten unterschiedliche Ergebnisse, was mit speziesspezifischen Verhaltensunterschieden erklärt werden kann. Experimente zum räumlichen Lernen bei Ratten [Wan 00] zeigten expositionsbedingte Veränderungen bei Ganzkörper-SAR-Werten von 1,2 W/kg. Die 2,45 GHz-Felder waren gepulst. Bei den dabei erreichten SAR-Spitzenwerten von 2400 W/kg im Puls ist nicht auszuschließen, dass thermisch bedingt Höreffekte auftraten, die bei den Tieren zu Irritationen geführt haben könnten. Vergleichbare Verhaltensexperimente wurden von Sienkiewicz et al. [Sie 00] mit Feldern durchgeführt, die dem Mobilfunk ähnlich waren (900 MHz, 217 Hz gepulst) und einer Ganzkörper-SAR von 0,05 W/kg entsprachen. Bei diesen Untersuchungen zeigten sich zwischen den exponierten und den nicht exponierten Tieren keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Mit einer explorativen Feldstudie wurde der Einfluss elektromagnetischer Felder von Mobilfunkanlagen auf die Gesundheit, Leistung und das Verhalten von Rindern [StM 01] untersucht. Die Studie weist im Ansatz und der Durchführung schwere methodische Mängel auf. Der grundsätzliche Studienansatz ist nicht geeignet, die aufgeworfenen Fragen zu beantworten. Auch eine Rinderviruserkrankung als eine bedeutende Einflussgröße hat die Ergebnisse stark beeinflusst. Eine weitergehende Schlussfolgerung, dass die Verhaltensänderungen beim Wiederkäuen auf die hochfrequenten elektromagnetischen Felder zurückzuführen wären, kann aus der Studie nicht gezogen werden.

A 3.2.2 Elektroenzephalogramm beim Menschen

Ein möglicher direkter Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf das menschliche Gehirn kann mit Registrierungen der elektrischen Hirnaktivität untersucht werden. Es muss jedoch hervorgehoben werden, dass nur akute neuronale Reaktionen gemessen werden können und eine Aussage zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen daraus nicht abgeleitet werden kann. Da die Variabilität im Ruhe-EEG (im wachen Zustand, Augen geschlossen) zwischen einzelnen Personen, sowie auch beim Einzelnen selbst sehr hoch ist, wurden auch reizkorrelierte, gemittelte Hirnpotentiale, die zur Darstellung der funktionellen Integrität des neuronalen Systems dienen, untersucht.

Erste Experimente von v. Klitzing [Kli 95] zeigten einen Einfluss gepulster Hochfrequenzfelder (kein GSM-Signal) auf das sogenannte Alpha-Frequenzband des spontanen EEG. Von mehreren Gruppen wurden diese Experimente, auch mit erweitertem Versuchsprotokoll, wiederholt. Reiser et al. [Rei 95] fanden unter Exposition mit GSM-Signalen, dass die Energie der Hirnaktivität im Frequenzband Beta1 verändert war. Hietanen et al. [Hie 00] fanden bei der Analyse ihrer Daten nur bei einem von 19 Probanden eine Energieveränderung, jedoch in einem anderen Frequenzband. Das Ergebnis, das nicht als abnormale Veränderung im EEG anzusehen war, wurde von der Arbeitsgruppe als statistischer Zufall gewertet. Keinen Einfluss auf das Ruhe-EEG haben Studien von Röschke und Mann [Rös 97], Splitter et al. [Spl 97] und Krafczyk [Kra 98] gezeigt.

In diesen Wiederholungsstudien wurden weitere Parameter, wie die Vigilanz (Wachheit), durch visuelle oder akustische Stimulation ausgelöste (evozierte) Potentiale und Latenzzeiten untersucht. Diese Parameter, die Rückschlüsse auf die Integrität neuronaler Prozesse zulassen, wurden durch die Exposition nicht beeinflusst.

Einen abschwächenden Effekt elektromagnetischer Felder von GSM-Handys auf die Bereitschaftspotentiale bei komplexeren visuell-motorischen Aufgaben beschreiben Freude et al. [Fre 98; Fre 00]. Die Autoren sehen in den gefundenen Reaktionen keine gesundheitliche Relevanz. Urban et al. [Urb 98] untersuchten mit vergleichbaren Expositionsparametern einen möglichen Einfluss auf die visuell evozierten Potentiale. Die Amplituden und die Latenzen wurden durch das Feld nicht verändert. Die EEG-Frequenzbänder während eines auditorischen Tests (auditory memory task) zeigten unter GSM-Exposition durch Handys in einem von vier Frequenzbereichen eine veränderte Energieamplitude [Kra 00]. Diese Studie, die nur mit 16 Probanden durchgeführt wurde, bedarf einer Bestätigung.

Mann et al. [Man 98] und Wagner et al. [Wag 98] untersuchten einen möglichen Einfluss der Mobilfunkfelder auf das Schlaf-EEG. Von denselben Autoren konnte ein Einfluss der Felder auf den Schlaf mit verschiedenen Expositionsquellen und damit Feldverteilungen und Intensitäten nicht reproduziert werden. Borbely et al. [Bor 99] exponierten Probanden 8 Stunden lang mit einem Pseudo-GSM-Signal in einem 15 Minuten an/aus-Zyklus. Sie fanden Veränderungen in den typischen Phasen im Schlaf-EEG, die auf eine verbesserte Schlafqualität (bei einer Teilkörper-SAR von 1 W/kg) hinweisen. Anzumerken ist, dass die hier verwendeten Feldexpositionen denen eines Handys entsprechen und weder mit den Feldintensitäten noch den Intensitäten der Exposition durch Basisstationen vergleichbar sind.

Es kann zusammengefasst werden, dass die bisherigen Studien nicht im Ergebnis übereinstimmen, aber dennoch Hinweise auf expositionsbedingte Änderungen neurophysiologischer Prozesse geben. Insgesamt sprechen die Experimente zu Ruhe-EEGs eher gegen eine Beeinflussung der spontanen Hirnaktivität. Die beschriebenen Veränderungen bei den komplexeren

evozierten Potentialen sind im Einzelnen noch nicht wiederholt und bestätigt. Daher sind weitere Untersuchungen notwendig.

A 3.2.3 Schlaf

In diesem Zusammenhang werden oft die Abschlussberichte der „Schwarzenburg-Studie“ erwähnt. Mit mehreren Versuchsansätzen wurde die Bevölkerung in Schwarzenburg (Schweiz), die seit Jahrzehnten z.B. über Schlafstörungen als Folge eines Kurzwellensenders klagte, untersucht [Alt 95]. Wiederholt konnte in Querschnittsstudien in der gleichen Population gezeigt werden, dass Durchschlafstörungen in Bevölkerungsgruppen, die näher an dem Sender wohnten, häufiger auftraten als in Bevölkerungsgruppen im Umland. Diese räumliche Assoziation lässt sich auch in kurzen Zeitreihen bestätigen. Die Aussagekraft dieser Studie ist geringer als die der o.g. kontrollierten Laborexperimente, da die Studie nicht doppelblind durchgeführt wurde und die Befindlichkeitsstörungen nur anhand einer Fragebogenaktion erfasst wurden. Es existieren keine individuell korrelierten Messungen, was zu einer Missklassifizierung, einer Über- oder Unterschätzung der effektiven Exposition, führen könnte. Deshalb sind die o.g. Ergebnisse der Einzelstudie allenfalls als unbestätigte Hinweise einzuordnen. Zur Abklärung, ob es Schlafstörungen durch hochfrequente Felder gibt, sind kontrollierte, doppelblind durchgeführte Schlafexperimente geeigneter, um zwischen physischen und psychischen Ursachen der Störung unterscheiden zu können.

A 3.2.4 Kognitive Funktionen beim Menschen

Ziel dieser Studien ist es, einen vermuteten Einfluss elektromagnetischer Felder auf kognitive Funktionen zu untersuchen. Mit Verhaltensexperimenten kann ein Feldeinfluss auf die aktive intellektuelle Informationsverarbeitung (kognitive Leistung) untersucht werden. Preece et al. [Pre 99] haben eine Studie durchgeführt, bei der sowohl ein analog als auch ein digital arbeitendes Mobiltelefon verwendet wurden. Das Versuchsdesign enthielt eine Reihe verschiedener Parameter, z.B. die Reaktionszeit. Bei Benutzung des analogen Telefons konnte eine Verkürzung der Reaktionszeit bei Aufmerksamkeitstests deutlicher gefunden werden, als bei digitalen Telefonen. Die Autoren stellten die Hypothese auf, dass diese verkürzte Reaktionszeit durch eine lokale Erwärmung, mit der daraus folgenden verbesserten Durchblutung der funktionsrelevanten Hirnareale im Schläfenbereich, zustande gekommen sein kann. Für die Hypothese, dass die Reaktion auf einer Verbesserung der Kognition durch die Produktion von Stressproteinen beruht, fehlen experimentelle Hinweise.

Koivisto et al. [Koi 00a; Koi 00b] untersuchten ebenfalls in kognitiven Tests verschiedene Reaktionszeiten unter Nutzung eines GSM-Telefons mit Maximalleistung. In diesen Tests stellten sich verschiedene statistisch signifikante Assoziationen bei den Reaktionszeitanalysen heraus. Koivisto et al. führten die Reaktionen ebenfalls auf eine lokale thermische Beeinflussung zurück. Wegen unterschiedlichen Versuchsdesigns und unterschiedlicher Detailergebnisse stellt die Arbeit keine Bestätigung der Ergebnisse von Preece et al. dar.

Die Vielzahl an untersuchten, unterschiedlichen Reaktionszeittypen, die bei Exposition zum Teil verkürzt, aber andere auch verlängert waren, lässt keine eindeutige Bewertung zu, gibt aber Hinweise auf eine mögliche Beeinflussung von physiologischen Prozessen. Es ist weitere Forschung notwendig, um zu klären, ob bei der Nutzung von Handys die Leistungsfähigkeit des Gehirns beeinflusst wird.

A 3.2.5 Blut-Hirn-Schranke bei Ratten

Die Blut-Hirn-Schranke schützt u.a. das Gehirn vor unkontrollierter Aufnahme von Substanzen. Es ist bekannt, dass bei Überwärmung des Gehirns die Blut-Hirn-Schrankenfunktion nicht mehr gewährleistet ist. Diese Überwärmung kann mit Handys nicht erreicht werden. Ob gepulste hochfrequente elektromagnetische Felder, wie sie vom Mobiltelefon ausgesendet werden, dennoch die Integrität der Schranke beeinflussen, ist noch nicht beantwortet. Derzeit existieren einzelne Studien, z.B. von der Gruppe um Salford und Persson [Sal 94; Per 97] die eine erhöhte Durchlässigkeit für das Protein Albumin bei sehr geringen SAR-Werten, deutlich unterhalb der von ICNIRP empfohlenen Basisgrenzwerte, beschrieben haben. Die Ergebnisse bei den unterschiedlichen Expositionsparametern, d.h. verschiedene Feldintensitäten und Pulsfrequenzen, sind nicht konsistent und deuten auf keine Intensitäts-Wirkungsbeziehung hin. Die Studie von Fritze et al. [Fri 97] zeigte, dass bei Intensitäten wie sie bei der Nutzung von Mobiltelefonen auftreten, keine Änderungen der Albuminkonzentrationen im Gehirn feststellbar waren. Ebenfalls keine Änderung der Schrankenfunktion gegen Albumin zeigten Tsurita et. al [Tsu 00] bei Ratten, die 2 oder 4 Wochen lang eine Stunde täglich mit 1439 MHz (TDMA⁶⁾), 2 W/kg, exponiert wurden.

Schirmacher et al. [Schi 00] sahen an einem *in vitro* Blut-Hirn-Schrankenmodell eine Permeabilitätsänderung für Saccharose bei 1,8 GHz (0,3 W/kg). Da es sich um ein künstliches Modell handelte, sollte diese Einzelstudie unabhängig im Tierversuch wiederholt werden. In weiteren Experimenten sollten bekannte, für das Gehirn toxische Substanzen auf ihr Permeabilitätsverhalten unter Feldeinwirkung untersucht werden.

Es kann zusammengefasst werden, dass die Ergebnisse zu einer expositionsbedingten Permeabilitätsänderung der Blut-Hirn-Schranke kein konsistentes Bild ergeben und lediglich als Hinweise zu werten sind. Die offenen Fragen erfordern in Zukunft vorsorglich weitere Untersuchungen zu dieser Thematik.

A 3.2.6 Melatonin bei Tieren und bei Menschen

Ein Einfluss niederfrequenter Magnetfelder auf das Melatonin wird seit 1987 mit Aufstellung der Melatoninhypothese bezüglich Brustkrebs diskutiert [Ste 87, siehe Kapitel Niederfrequente Felder 2.2.4]. Melatonin kann u.a. freie Radikale abfangen, die zum Zelltod führen können. Das onkostatistische Potential von Melatonin sowie der Einfluss auf das Immunsystem sind bekannt und werden im Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldern diskutiert. Bis jetzt gibt es keinen Hinweis, dass hochfrequente elektromagnetische Felder des Mobilfunks die Melatoninkonzentration verändern (siehe z.B. Experimente von Vollrath et al. [Vol 97] und Lerchl et al. [Ler 00] an Dsungarischen Hamstern unter Ganzkörperexposition). Die Analyse der Melatoninkonzentrationen bei Rindern zeigte im Verlauf der Nacht keine Änderung bei den als exponiert eingestuften Tieren [StM 01].

Im Blut von wachen Probanden konnte u.a. auch nach mehrstündiger Mobiltelefonnutzung keine Änderung der Melatoninkonzentration gemessen werden [deS 99; Man 98].

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wird die Melatoninhypothese nicht gestützt.

⁶⁾ TDMA: Time Division Multiple Access

A 3.2.7 Blutparameter und Immunsystem

Änderungen im blutbildenden System haben eine direkte gesundheitliche Relevanz. In der Vergangenheit fand man unterschiedliche Reaktionen. In einer Studie von Chou et al. [Cho 92] wurde das Blut (Blutbild, immunologische und blutchemische Indizes) von fast lebenslang exponierten Ratten untersucht. Bei gepulsten Feldern mit niedriger Intensität (2,45 GHz; 0,15 W/kg-0,4 W/kg) ergaben sich bei den untersuchten Blutwerten keine Veränderungen. Dagegen stehen Ergebnisse von Jensch [Jen 97, s.u.], der bei Untersuchungen an exponierten trächtigen Ratten bei 6 GHz-Feldern, die deutlich oberhalb der Grenzwerte lagen, eine Abnahme der Monozyten fand. Dasdag et al. [Das 00] fanden keine Änderungen der Blutwerte bei Ratten, die mit Mobilfunkfeldern (mit 0,155 W/kg) exponiert wurden.

1999 sind zwei Publikationen erschienen, die über einen Einfluss hochfrequenter Felder mit Frequenzen oberhalb des Mobilfunkbereiches (im Bereich von 8,5 GHz-18 GHz) auf das Immunsystem von Mäusen berichteten. Die Exposition (SAR 2 mW/kg-5 mW/kg) bewirkte eine erhöhte Aktivität der Makrophagen [Fes 99]. Ergänzend zu dieser Studie im selben Labor haben Novoselova et al. [Nov 99] gezeigt, dass diese Reaktion weiterhin gesteigert werden kann, wenn die Nahrung mit Antioxidanzien angereichert wird. Diese Einzelergebnisse können als Hinweis gedeutet werden. Ob diese Reaktion beim Menschen auftritt, muss durch weitere Studien geklärt werden.

Im Hinblick auf neue technische Anwendungen, die diesen Frequenzbereich nutzen werden, sind, unabhängig von den vorliegenden Ergebnissen, weitere Untersuchungen notwendig.

A 3.2.8 Reproduktion und Entwicklung

Es ist bekannt, dass eine Erhöhung der Körpertemperatur bei der Ontogenese einen negativen Einfluss auf die Entwicklung der Nachkommen haben kann. In der bereits erwähnten Arbeit von Jensch [Jen 97] wurde der Einfluss auf Ratten und ihre Nachkommen erst bei sehr hohen Expositionen, d.h. weit oberhalb der gesetzlichen Grenzwerte mit einer Frequenz von 915 MHz (100 W/m^2) bzw. mit einer Frequenz von 2,45 GHz (200 W/m^2) untersucht. Bei diesen Frequenzen bzw. hohen Intensitäten zeigten sich keine Unterschiede. Bei Expositionen mit 6 GHz (350 W/m^2) zeigten die Muttertiere eine leichte, aber signifikante Abnahme der Monozyten. Die Nachkommen aus dieser Gruppe waren in den ersten 5 Wochen etwas leichter und zeigten subtile neurophysiologische Veränderungen wie z.B. ein verzögertes Öffnen der Augen. Die Autoren sehen die feldbedingten Veränderungen bei 6 GHz, mit Intensitäten die für die Grenzwert- bzw. Vorsorgediskussion aufgrund der sehr hohen Intensitäten nicht relevant sind, als minimal an.

Eine deutliche Abnahme der Anzahl der Nachkommen bei Mäusen, die schwachen Feldern ($1,7 \text{ mW/m}^2$ - 10 mW/m^2) von Funk- und Fernsehsendern ausgesetzt waren, berichteten Magras und Xenos [Mag 97]. Methodisch zeigt die Studie Schwächen, es fehlten parallele Kontrollen. So wurden nach Ablauf der mehrmonatigen Expositionsperiode die Daten der fünf aufeinanderfolgenden Würfe eines Paares mit denen eines ersten Wurfes am Studienende korreliert. Der Einfluss anderer Faktoren auf die Fruchtbarkeit ist aufgrund erheblicher methodischer Mängel bei dieser Einzelstudie nicht auszuschließen.

In der bereits erwähnten explorativen Feldstudie zu Rindern [StM 01] zeigte sich eine Korrelation der aufgetretenen Missbildungen bei den Kälbern mit der Exposition. Die Virusinfekti-

on BVD⁷⁾, die ebenfalls zu Missbildungen führen kann, trat hauptsächlich bei den Stallungen auf, die als exponiert eingestuft waren. Die methodischen Mängel der Studie lassen jedoch keine Aussage zu feldbedingten Einflüssen zu.

Diese o.g. Studien sind sehr mangelhaft und werden deshalb nicht als Hinweis gewertet.

A 3.3 Hochfrequente elektromagnetische Felder und Krebs

A 3.3.1 Untersuchungen zu krebsrelevanten Proteinen, Krebsentstehung und -promotion

Die Energie der hochfrequenten elektromagnetischen Felder ist zu gering, um über DNA-Strangbrüche direkt Krebs zu initiieren. Die hochfrequenten elektromagnetischen Felder verfügen damit über kein direktes genotoxisches oder mutagenes Potential. Sie können daher allenfalls auf die Krebspromotion oder Krebsprogression einwirken.

Auf zellulärer Ebene wurde der Einfluss hochfrequenter Felder auf das Verhalten des krebsrelevanten Enzyms Ornithindecaboxylase (ODC) untersucht. Untersuchungen an Zellkulturen haben gezeigt, dass durch modulierte Hochfrequenzfelder ([Lit 93]: 915 MHz, 50 Hz-60 Hz Modulation; [Pen 97]: 835 MHz, 6 Hz-600 Hz Modulation) die Aktivität der ODC bis auf das Doppelte ansteigt. Dieser Anstieg war jedoch nur möglich, wenn die Modulationsfrequenzen zwischen 50 Hz und 60 Hz lagen. Die SAR betrug in beiden Studien 2,5 W/kg. Bei der Bewertung der Studien ist zu berücksichtigen, dass das Enzym jedoch für die Tumorpromotion erst relevant ist, wenn die Aktivität bis zum 500-fachen der normalen Aktivität in den Geweben gesteigert ist.

Eine weitere Hypothese zur Rolle der elektromagnetischen Felder im Hinblick auf den Verlauf von Krebserkrankungen kann ein Feldeinfluss auf die Genexpression und damit die Bildung von Proteinen, wie z.B. Hitzestressproteine sein. Während bei genetisch veränderten Nematoden eine Veränderung in der Produktion der Hitzestressproteine, die die Zellen vor Stress oder Schädigung schützen sollen, gefunden wurde [deP 00; Dan 98], konnten Fritze et al. [Fri 97] im Gehirn von Ratten keine Reaktion auf die Bildung von Hitzestressproteinen finden (900 MHz gepulst GSM, SAR im Gehirn 0,03 W/kg oder 1,5 W/kg; kontinuierliche Felder 7,5 W/kg). Das Tumor-Suppressor-Protein TP53, das von Zellen nach negativen Umwelteinflüssen gebildet wird, wurde von Li et al. [Li 99] in Bindegewebszellen unter Exposition mit kontinuierlichen 837 MHz-Feldern untersucht. Bei SAR-Werten von 0,9 W/kg und 9 W/kg zeigte sich kein Unterschied im Proteingehalt im Vergleich zu den Kontrollzellen.

Zahlreicher sind *in vitro* und *in vivo* Untersuchungen zu Genexpressionen. Die verwendeten unterschiedlichen Expositionsparameter bezüglich der Frequenzen, Modulationen und Intensitäten, verhindern jedoch den Vergleich der Ergebnisse. Die Mehrzahl der Tierexperimente wurde bei spezifischen Absorptionsraten durchgeführt, die oberhalb der zulässigen Grenzwerte liegen. Zur Bewertung kommt erschwerend dazu, dass in Zellversuchen die Expression untersuchter Protoonkogene, z.B. *c-jun* oder *c-fos*, in einer Untersuchung leicht gestiegen oder nicht verändert wurden und in einer anderen Untersuchung genau das umgekehrte Verhalten beobachtet wurde [Iva 97; Gos 99].

Aufsehen erregten die Studien von Lai und Singh [Lai 95, Lai 96], die mit der Comet-Assay-Methode nach Exposition mit 2,45 GHz (1,2 W/kg) DNA-Einzelstrangbrüche in Hirnzellen

⁷⁾ BVD: Bovine Virusdiarrhoe

nachweisen konnten. Diese Ergebnisse wurden jedoch von Malyapa et al. [Mal 97a] (SAR 0,7 W/kg und 1,9 W/kg) nicht bestätigt. Vijayalaxmi et al. [Vij 00] stellten ebenfalls mit dem Comet-Assay keinen Einfluss der Felder (2,45 GHz; 2,1 W/kg) auf das Strangbruchverhalten der DNA von Lymphozyten fest. In vergleichbaren Experimenten, die mit modulierten Mobilfunkfeldern bei 836 MHz (SAR 0,6 W/kg) durchgeführt wurden, konnten keine DNA-Einzelstrangbrüche dokumentiert werden [Mal 97b]. Die Resultate des Comet Assays mit Lymphoblastoiden [Phi 98], zeigten widersprüchliche Ergebnisse. Die Zellen wurden mit zwei verschiedenen Mobilfunksystemen bei zwei nicht thermischen Intensitätsbereichen (2,4 mW/kg und 24 mW/kg) exponiert. Von den vier Kombinationen zeigte sich nur bei einer (24 mW/kg; iDEN[®]) eine signifikante erhöhte Rate an DNA-Brüchen, bei den anderen drei jedoch eine signifikant gesunkene DNA-Bruchrate im Vergleich zu den Kontrollen. Der gewählte methodische Ansatz ist äußerst fehleranfällig und lässt deshalb keine eindeutige Bewertung zu.

Verschiedene Untersuchungsmethoden zur Genotoxizität, wie z.B. Chromosomenaberrationen, Mikrokernbildung und Schwesterchromatidaustausch (SCE) haben keinen eindeutigen Beweis ergeben, dass hochfrequente elektromagnetische Felder unterhalb der Grenzwerte genotoxisch wirksam sind. Vijayalaxmi et al. [Vij 01] exponierten 24 Stunden lang menschliche Lymphozyten *in vitro* bei 835 MHz (FDMA⁸⁾) mit SAR-Werten zwischen 4,4 W/kg oder 5,0 W/kg und fanden keine signifikanten Unterschiede bei der Induktion von Chromosomenaberrationen oder Mikrokernen im Vergleich zu den scheinexponierten Zellproben. Maes et al. [Mae 00] untersuchten Chromosomenaberrationen und SCE bei humanen Lymphozyten, die *in vitro* mit Feldern einer Frequenz von 455,7 MHz und einer SAR von 6,5 W/kg exponiert wurden. Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied zu den Kontrollen.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Untersuchungen zu krebsrelevanten Proteinen, Krebsentstehung und Krebspromotion ein sehr uneinheitliches Bild liefern. Inwieweit die einzelnen und nicht reproduzierten Hinweise eine Bedeutung für gesundheitliche Beeinflussungen haben, muss durch weitere Forschung geklärt werden.

A 3.3.2 Spontane und initiierte Tumorbildung

Die ersten Tierstudien zur Bildung spontaner Tumoren bei chronischer Exposition wurden bereits in der 70er und 80er Jahren durchgeführt. Aufgrund der unzureichenden Dosimetrie und der schwachen Histopathologie sind diese Studien wissenschaftlich nicht aussagekräftig. Ratten, die 25 Monate lang mit gepulsten Mikrowellen (2,45 GHz) schwacher Intensität (zwischen 0,15 W/kg und 0,4 W/kg) exponiert wurden, zeigten häufiger bösartige, unterschiedliche Primärtumoren als die Kontrolltiere. Da jedoch die Überlebensrate gegenüber den Kontrolltieren unverändert war, ist die Aussage spekulativ, dass die statistische Signifikanz einen biologischen Einfluss wiedergibt. Bei gutartigen Tumoren war kein Unterschied zu finden [Cho 92]. Studien von Toler [Tol 97] bzw. Frei [Fre 98] konnten bei Expositionen mit gepulsten 435 MHz- bzw. 2,45 GHz-Feldern keine Reaktion auf die Brustkrebsentwicklung sehen.

Ob hochfrequente elektromagnetische Felder mit genotoxischen Stoffen synergistisch interagieren und vorzeitig zu Krebs führen können, ist Gegenstand zahlreicher Studien. Eine Überhitzung kann ebenfalls die Kanzerogenität von Substanzen erhöhen. Deshalb ist die Dosimetrie bei den Untersuchungen ein wichtiger Punkt, um abschätzen zu können, ob eine übermäßige lokale Erwärmung auftrat.

⁸⁾ FDMA: Frequency Division Multiple Access

Auch neuere Experimente zur Tumorpromotion im Frequenzbereich, der für den Mobilfunk üblich ist, konnten keine tumorpromovierende Reaktion finden [Ima 98a; Ima 98b; Cha 99]. Die Studie von Adey et al. [Ade 99] zeigte ebenfalls keine promovierende Reaktion der hochfrequenten Felder. Es deutete sich sogar an, dass gepulste Felder eher eine tumorinhibierende Reaktion bei chemisch induzierten Hirntumoren bei Ratten zur Folge hatten, die Felder analoger Funkssysteme dagegen nicht. Diese Tendenz war jedoch statistisch nicht signifikant. Für eine statistisch abgesicherte Aussage zu der in der Studie beobachteten Tumordinhibition würden mehr Daten benötigt. Hihashikubo et al. [Hih 99] verwendete ebenfalls ein Tiermodell für Hirntumoren (9L Gliosarcoma). Kontinuierliche (835,62 MHz) und frequenzmodulierte (847,74 MHz) Felder, die eine SAR im Rattenhirn von $0,75 \pm 0,25$ W/kg erzeugten, bewirkten keine signifikanten Unterschiede zu den scheinexponierten Tieren.

Studien mit genmanipulierten Mäusen unterscheiden sich im Tiermodell von den o.g. Studien zur Krebspromotion. Repacholi et al. [Rep 97] exponierten genetisch veränderte Mäuse, die prädisponiert sind, Lymphome zu entwickeln mit GSM-Feldern (0,01 W/kg-4,2 W/kg). Auch wenn noch nicht bekannt ist, ob und in welcher Weise die Daten von genmanipulierten Mäusen auf den Menschen übertragbar sind, erhält man doch aus derartigen Experimenten Hinweise auf mögliche Reaktionen. Die Studie weist allerdings dosimetrische Ungenauigkeiten und histologische Unvollständigkeiten auf. Den Hinweisen wird in Wiederholungsstudien mit genetisch veränderten Mäusen nachgegangen.

Weitere Studien zur Tumorentwicklung sollten durchgeführt werden.

A 3.3.3 Epidemiologische Studien

Epidemiologische Studien, die einen Zusammenhang zwischen bestimmten Erkrankungen und der Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern untersuchten, sind nicht zahlreich und weisen alle dosimetrische Mängel auf. Die Aussagekraft der Studien ist daher gering.

Personen, die am Arbeitsplatz hochfrequenten Feldern ausgesetzt gewesen sein könnten, wurden in einer epidemiologischen Studie nach ihrer Berufsbezeichnung in vier Expositionsklassen eingeteilt und über den Zeitraum von 20 Jahren auf Hirntumoren und Lymphome bzw. Leukämie hin untersucht. In der Kohortenstudie zeigte sich keine Assoziation zwischen den untersuchten Krebsarten und der beruflich bedingten Exposition [Mor 00].

In einer Fallkontrollstudie befragten Hardell et al. [Har 99] Patienten mit Hirntumoren. Es zeigte sich kein erhöhtes Risiko, allgemein an Hirntumoren zu erkranken, sondern lediglich ein erhöhtes, allerdings statistisch nicht signifikantes Risiko für Tumoren (temporaler und occipitaler Lobus) auf der Kopfseite, an der nach Angabe der Personen am meisten telefoniert wurde. Dieses erhöhte Risiko wurde jedoch nur für das schwedische analoge Mobilfunksystem gefunden. Da sich bei der Analyse aller Fälle kein statistisch signifikanter Zusammenhang zeigte, kann sich diese Assoziation auch zufällig ergeben haben.

In einer Studie zu Hirntumoren und GSM-Handys von Muscat et al. [Mus 00] wurde die mittlere Dauer der Handy-Nutzung mit 2,8 Jahren für die Erkrankten und 2,7 Jahren für die Kontrollgruppe errechnet. Für diesen Zeitraum wurde keine statistisch signifikante Assoziation zum Auftreten von Hirntumoren allgemein gefunden. Hirntumoren zeigten sich häufiger auf der Seite, die auch beim Telefonieren benutzt wurde, was sich aber nicht als statistisch signifikant abgesichert herausstellte. Betrachtet man die Tumoren im temporalen und occipitalen Lobus (Schläfen- und Hinterkopfbereich), so zeigte sich die Tendenz, dass diese häufiger auf

der gegenüberliegenden Kopfhälfte auftraten. Auch dieses Ergebnis ist jedoch nicht statistisch signifikant. Im Gegensatz zur Studie von Hardell et al. lagen die Risikoschätzer (relatives Risiko im Vergleich zur Kontrollgruppe) unterhalb der Zahl 1 – mit Ausnahme des seltenen Neuroepithelioms (OR⁹⁾ 2,1; 95%-Konfidenzintervall 0,9 bis 4,7).

Ein größeres Personenkollektiv (782 Fälle, 799 Kontrollen) stand Inskip et al. [Ins 01] für eine Interviewstudie zur Verfügung. Das relative Risiko für Hirntumoren betrug 1,0 (95%-Konfidenzintervall 0,6 bis 1,5) wenn das Telefon mehr als 100 Stunden benutzt wurde, d.h. es zeigte sich keine statistische Assoziation. Ebenfalls keine Erhöhung der Tumorerkrankung zeigte sich, wenn das Telefon 60 Minuten oder mehr pro Tag, oder regelmäßig über 5 Jahre benutzt wurde. Eine erhöhte Tumorfrequenz bezogen auf die beim Telefonieren bevorzugte Kopfseite wurde nicht festgestellt.

2001 wurden die Ergebnisse der nationalen dänischen Kohortenstudie veröffentlicht [Joh 01]. 420 095 Nutzer von digitalen wie analogen Mobiltelefonen wurden für die Studie berücksichtigt. Mit Hilfe des dänischen Krebsregisters konnten 3391 Krebsfälle in die statistische Auswertung einbezogen werden. Die standardisierte Inzidenzrate (SIR) war bei Krebs des Gehirns oder Nervensystems (SIR=0,95, 95%-Konfidenzintervall 0,81-1,12), der Speicheldrüse (SIR=0,72, 95%-Konfidenzintervall 0,29-1,49) oder Leukämie (SIR=0,97, 95%-Konfidenzintervall 0,78-1,21) kleiner als 1,0. Damit besteht kein statistisch signifikanter Zusammenhang, dass das mobile Telefonieren Krebserkrankungen im Hals- und Kopfbereich erhöht.

Die krankenhausbasierende Fall-Kontroll-Studie von Stang et al. [Sta 01] zeigte ein statistisch signifikantes erhöhtes Risiko an einem Uveal Melanom zu erkranken, wenn eine berufsbedingte Exposition durch Funkgeräte (OR=3,0, 95%-Konfidenzintervall 1,4-6,3) und Mobiltelefone (OR=4,2, 95%-Konfidenzintervall 1,2-14,5) vorlag. Die bevölkerungsbasierende Studie zeigte keine vergleichbaren Assoziationen zu den hochfrequenten elektromagnetischen Feldern. Die Aussagekraft dieser Studie ist jedoch aufgrund der extrem kleinen Fallzahl gering. Eine deutliche Schwäche der Studie ist die Dosimetrie bezüglich der Frequenzbereiche und Sendeleistungen der Funksprechgeräte sowie der Expositionsdauer. Andere berufsbedingte Einflüsse wurden nicht abgeschätzt.

Es ist bis jetzt kein Mechanismus bekannt, wie hochfrequente Felder das Risiko zu Hirntumorerkrankungen beeinflussen könnten. Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die o.g. Studien keinen Hinweis geben, dass der Gebrauch von Mobiltelefonen zu einer Erhöhung an Hirntumoren führt. Es muss dabei angemerkt werden, dass das grundsätzliche Problem der Expositionsabschätzung in den Studien nicht gelöst werden konnte. Auch sind die Beobachtungszeiträume noch viel zu kurz, um eine Beeinflussung vollständig ausschließen zu können.

Genauere Hinweise können von einer multinationalen Studie der WHO erwartet werden, die einen Zusammenhang von Tumoren im Kopf-Hals-Bereich und Mobiltelefonnutzung untersucht. Dabei werden verschiedene Nationen mit unterschiedlichen Funksystemen und ein großes Kollektiv einbezogen. Die Ergebnisse werden voraussichtlich nicht vor 2004 vorliegen. Die Interviewstudie kann jedoch auch die generellen Unsicherheiten zu den dosimetrischen Angaben nicht lösen.

⁹⁾ OR: Odds Ratio

Literatur

Literatur zu Kapitel A 1:

- [Ber 88] Bernhardt, J.H.: The Establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects, *Radiat. Environ. Biophysics* 1988, 27, 1-27.
- [Cho 85] Chou, C.-K., Yee, K.-C., Guy, A.W.: Auditory response in rats exposed to 2,45 MHz electromagnetic fields in a circularly polarized waveguide, *Bioelectromagnetics*, 1985 (6), 323-326.
- [ICN 98] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics* 1998 74 (4):494-522.
- [Lin 01] Lindeblatt G., Silny J.: A Model of the Electrical Volume Conductor in Region of the Eye in the EMF range, *Phys. in Med. and Biol.* (accepted)

Literatur zu Kapitel A 2:

- [Wer 79] Wertheimer und Leeper: Electrical wiring configurations and childhood cancer, *American Journal of Epidemiology*, 1979 (109), 273-284.

A 2.1.1 Tierexperimentelle Studien zu Krebs

- [And 99] Anderson et al.: Effect of 13 week magnetic field exposures on DMBA-initiated mammary gland carcinomas in female Sprague-Dawley rats, *Carcinogenesis*, 1999 (20/8), 1615-1620.
- [Boo 99a] Boorman et al.: Chronic toxicity oncogenicity evaluation of 60 Hz (Power frequency) magnetic fields in F344/N rats, *Toxicologic Pathology*, 1999 (27/3), 267-278.
- [Boo 99b] Boorman et al.: Effect of 26 week magnetic field exposures in a DMBA initiation-promotion mammary gland model in Sprague-Dawley rats, *Carcinogenesis*, 1999 (20/5), 899-904.
- [Boo 00] Boorman et al.: Magnetic fields and mammary cancer in rodents: A critical review and evaluation of published literature, *Radiation Research*, 2000 (153/5), 617-626.
- [Dev 00] Devevey et al.: Absence of the effects of 50 Hz magnetic fields on the progression of acute myeloid leukaemia in rats, *International Journal of Radiation Biology*, 2000 (76/6), 853-862.
- [DiG 99] DiGiovanni et al.: Lack of effect of a 60 Hz magnetic field on biomarkers of tumor promotion in the skin of SENCAR mice, *Carcinogenesis*, 1999 (20/4), 685-689.
- [Har 98] Harris et al.: A test of lymphoma induction by long-term exposure of E mu- Pim1 transgenic mice to 50 Hz magnetic fields, *Radiation Research*, 1998 (149/3), 300-307.
- [Kum 98] Kumlin et al.: Effects of 50 Hz magnetic fields on UV-induced skin tumorigenesis in ODC-transgenic and non-transgenic mice, *International Journal of Radiation Biology*, 1998 (73/1), 113-121.
- [Man 97] Mandeville et al.: Evaluation of the potential carcinogenicity of 60 Hz linear sinusoidal continuous-wave magnetic fields in Fischer F344 rats, *FASEB Journal*, 1997 (11), 1127-1136.

- [Man 00] Mandeville et al.: Evaluation of the Potential Promoting Effect of 60 Hz Magnetic Fields on N-Ethyl-N-Nitrosourea Induced Neurogenic Tumors in Female F344 Rats, *Bioelectromagnetics*, 2000 (21/2), 84-93.
- [McC 98] McCormick et al.: Exposure to 60 Hz magnetic fields and risk of lymphoma in PIM transgenic and TSG-p53 (p53 knockout) mice, *Carcinogenesis*, 1998 (19/9), 1649-1653.
- [McC 99] McCormick et al.: Chronic toxicity oncogenicity evaluation of 60 Hz (Power frequency) magnetic fields in B6C3F(1) mice, *Toxicologic Pathology*, 1999 (27/3), 279-285.
- [Mev 98] Mevissen et al.: Acceleration of mammary tumorigenesis by exposure of 7,12-dimethylbenz[a]anthracen-treated female rats in a 50-Hz, 100- μ T magnetic field: Replication study, *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 1998 (53/5), 401-418.
- [Mor 99] Morris et al.: Clinical progression to transplanted largegranular lymphocytic leukemia in Fischer 344 rats exposed to 60 Hz magnetic fields, *Bioelectromagnetics*, 1999 (20), 48-56.
- [Sas 98] Sasser et al.: Lack of a co-promoting effect of a 60 Hz magnetic field on skin tumorigenesis in SENCAR mice, *Carcinogenesis*, 1998 (19/9), 1617-1621.
- [Yas 97] Yasui et al.: Carcinogenicity test of 50 Hz sinusoidal magnetic fields in rats, *Bioelectromagnetics*, 1997 (18), 531-540.

A 2.1.2 Epidemiologische Studien zu Krebs bei Kindern

- [Ahl 00] Ahlbom et al.: A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia, *British Journal of Cancer*, 2000 (83/5), 692-698.
- [Auv 00] Auvinen et al.: Extremely low-frequency magnetic fields and childhood acute lymphoblastic leukemia: an exploratory analysis of alternative exposure metrics, *American Journal of Epidemiology*, 2000 (152/1), 20-31.
- [Bia 00] Bianchi et al.: Overhead electricity power lines and childhood leukemia: a registration-based, case-control study, *Tumori*, 2000 (86), 195-198.
- [Doc 99] Dockerty et al.: Electromagnetic field exposures and childhood leukemia in New Zealand, *Lancet*, 1999 (354), 1931-1933.
- [Fey 00] Feychting et al.: Parental occupational exposure to magnetic fields and childhood cancer (Schweden), *Cancer Causes Control*, 2000 (11), 151-156.
- [Gre 99] Green et al.: A case-control study of childhood leukemia in Southern Ontario, Canada, and exposure to magnetic fields in residences, *International Journal of Cancer*, 1999 (82) 161-170.
- [Grn 00] Greenland et al.: A pooled analysis of magnetic fields, wire codes and childhood leukemia, *Epidemiology*, 2000 (11/6), 624-634.
- [Hat 98] Hatch et al.: Association between childhood acute lymphoblastic leukemia and use of electric appliances during pregnancy and childhood, *Epidemiology*, 1998 (9), 234-245.
- [Lin 97] Linet et al.: Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic in children, *N Engl J Med*, 1997, 1-7.
- [McB 99] McBride et al.: Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada, *American Journal of Epidemiology*, 1999 (149), 831-842.

- [Sch 01] Schüz et al.: Residential magnetic fields as a risk factor for childhood acute leukemia: results from a German population-based case-control study, *International Journal of Cancer*, 2001 (91/5), 728-735.
- [Sor 99] Sorahan et al.: Maternal occupational exposure to electromagnetic fields before, during, and after pregnancy in relation to risks of childhood cancers: findings from the Oxford Survey of Childhood Cancers, 1953-1981 deaths, *American Journal of Industrial Medicine*, 1999 (35), 348-357.
- [UK 99] UK Childhood Cancer Study Investigators, Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer, *Lancet*, 1999 (354), 1925-1931.

A 2.1.3 Epidemiologische Studien zu Krebs bei Erwachsenen

- [Coc 99] Cocco et al.: Occupational risk factors for cancer of the central nervous system (CNS) among US women, *American Journal of Industrial Medicine*, 1999 (36/1), 70-74.
- [Coo 98] Coogan und Achengrau: Exposure to power frequency magnetic fields and risk of breast cancer in the upper cape cod cancer incidence study, *Archives of Environmental Health*, 1998 (53/5), 359-367.
- [Fey 98] Feychting et al.: Magnetic fields and breast cancer in Swedish adults residing near high-voltage power lines, *Epidemiology*, 1998 (9), 392-397.
- [For 00] Forssén et al.: Occupational and residential magnetic field exposure and breast cancer in females, *Epidemiology*, 2000 (11/1), 24-29.
- [Gam 98] Gammon et al.: Electric blanket use and breast cancer risk among younger women, *American Journal of Epidemiology*, 1998 (148), 556-563.
- [Joh 98] Johansen und Olsen: Risk of cancer among Danish utility workers - A nationwide cohort study, *American Journal of Epidemiology*, 1998 (147/6), 548-555.
- [Kli 99] Kliukiene et al.: Incidence of breast cancer in a Norwegian cohort of women with potential workplace exposure to 50 Hz magnetic fields, *American Journal of Industrial Medicine*, 1999 (36/1), 147-154.
- [Lad 00] Laden et al.: Electric blanket use and breast cancer in the Nurses' Health Study, *American Journal of Epidemiology*, 2000 (152/1), 41-49.
- [Pol 99] Pollán und Gustavsson: High-risk occupations for breast cancer in the Swedish female working population, *American Journal of Public Health*, 1999 (89/6), 875-881.
- [Rod 98] Rodvall et al.: Occupational exposure to magnetic fields and brain tumours in Central Sweden, *European Journal of Epidemiology*, 1998 (14/6), 563-569.
- [Vil 00a] Villeneuve et al.: Non-Hodgkin's lymphoma among electric utility workers in Ontario: the evaluation of alternate indices of exposure to 60 Hz electric and magnetic fields, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2000 (57/4), 249-257.
- [Vil 00b] Villeneuve et al.: Leukemia in electric utility workers: The evaluation of alternative indices of exposure to 60 Hz electric and magnetic fields, *American Journal of Industrial Medicine*, 2000 (37/6), 607-617.
- [Wre 99] Wrensch et al.: Adult glioma in relation to residential power frequency electromagnetic field exposures in the San Francisco Bay area, *Epidemiology*, 1999 (10/5), 523-527.
- [Zhe 00] Zheng et al.: Exposure to electromagnetic fields from use of electric blankets and other in-home electrical appliances and breast cancer risk, *American Journal of Epidemiology*, 2000 (151/), 1103-1111.

A 2.2.1 Epidemiologische Studien zu neurodegenerativen Erkrankungen

- [Fey 98] Feychting et al.: Dementia and occupational exposure to magnetic fields, *Scan J Work environ Health*, 1998, (824/1), 46-53.
- [Gra 99] Graves et al.: Occupational exposure to electromagnetic fields and Alzheimer disease, *Alzheimer Disease & Associated Disorders*, 1999 (13/3), 165-170.
- [Joh 98] Johansen und Olsen: Mortality from amyotrophic lateral sclerosis, other chronic disorders, and electric shocks among utility workers, *American Journal of Epidemiology*, 1998 (148), 362-368.
- [Joh 99] Johansen et al.: Multiple sclerosis among utility workers, *Neurology*, 1999 (52/6), 1279-1282.
- [Joh 00] Johansen et al.: Exposure to electromagnetic fields and risk of central nervous system disease in utility workers, *Epidemiology*, 2000 (11/5), 539-543.
- [Sav 98a] Savitz et al.: Electrical occupations and neurodegenerative disease: analysis of U.S. mortality data, *Archives of Environmental Health*, 1998 (53/1), 71-74.
- [Sav 98b] Savitz et al.: Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers, *Epidemiology*, 1998 (9/4), 398-404.

A 2.2.2 Einflüsse auf die Reproduktion, teratogene Reaktionen

- [Bel 98] Belanger et al.: Spontaneous abortion and exposure to electric blankets and heated water beds, *Epidemiology*, 1998 (9), 36-42.
- [Bre 99] Brent: Reproductive and teratologic effects of low-frequency electromagnetic fields: A review of in vivo and in vitro studies using animal models, *Teratology*, 1999 (59/4), 261-286.
- [Daw 98] Dawson et al.: Evaluation of potential health effects of 10 kHz magnetic fields: A rodent reproductive study, *Bioelectromagnetics*, 1998 (19/3), 162-171.
- [Gra 00] Grainger et al.: Electric and magnetic fields of 50 Hz are not associated with sudden infant death syndrome, *International Journal of Environmental Health Research*, 2000 (10/1), 85-87.
- [Hjo 99] Hjollund et al.: Extremely low frequency magnetic fields and fertility: a follow up study of couples planning first pregnancies, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 1999 (56/4), 253-255.
- [Huu 98a] Huuskonen et al.: Effects of gestational exposure to a video display terminal-like magnetic field (20-kHz) on CBA/S mice, *Teratology*, 1998 (58/5), 190-196.
- [Huu 98b] Huuskonen et al.: Effects of low-frequency magnetic fields on fetal development in CBA/Ca mice, *Bioelectromagnetics* 1998 (19/8), 477-485.
- [Mul 98] Mulligan und Persinger: Perinatal exposures to rotating magnetic fields 'demasculinize' neuronal density in the medial preoptic nucleus of male rats, *Neuroscience Letters*, 1998 (253/1), 29-32.
- [Mur 98] Mur et al.: Demographic evaluation of the fertility of aluminium industry workers: influence of exposure to heat and static magnetic fields, *Human Reproduction*, 1998 (13/7), 2016-2019.
- [Rya 99] Ryan et al.: Multigeneration reproductive toxicity assessment of 60-Hz magnetic fields using a continuous breeding protocol in rats, *Teratology*, 1999 (59/3), 156-162.

- [Rya 00] Ryan et al.: Evaluation of the developmental toxicity of 60 Hz magnetic fields and harmonic frequencies in Sprague-Dawley rats, *Radiation Research*, 2000 (153/5), 637-641.
- [Sha 99] Shaw et al.: Maternal periconceptional use of electric bed-heating devices and risk for neural tube defects and orofacial clefts, *Teratology*, 1999 (60/3), 124-129.

A 2.2.3 Einflüsse auf das kardiovaskuläre System

- [Gra 00a] Graham et al.: Exposure to strong ELF magnetic fields does not alter cardiac autonomic control mechanisms, *Bioelectromagnetics*, 2000 (21), 413-421.
- [Gra 00b] Graham et al.: Cardiac autonomic control mechanisms in power-frequency magnetic fields: A multistudy analysis, *Environmental Health Perspectives*, 2000 (108/8), 737-741.
- [Sai 99] Sait et al.: A study of heart rate variability in human subjects exposed to occupational levels of 50 Hz circularly polarised magnetic fields, *Medical Engineering & Physics*, 1999 (21/5), 361-369.
- [Sas 98] Sastre et al.: Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythm, *Bioelectromagnetics*, 1998 (19/2), 98-106.
- [Sav 99] Savitz et al.: Magnetic field exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers, *American Journal of Epidemiology*, 1999 (149/2), 135-142.

A 2.2.4 Einflüsse auf den Melatoninhaushalt

- [Ake 99] Akerstedt et al.: A 50-Hz electromagnetic field impairs sleep, *Journal of Sleep Research*, 1999 (8/1), 77-81.
- [Bak 99] Bakos et al.: Urinary 6-sulphatoxymelatonin excretion of rats is not changed by 24 hours of exposure to a horizontal 50-Hz, 100- μ T magnetic field, *Electro- and Magnetobiology*, 1999 (18/1), 23-31.
- [Bur 99] Burch et al.: Reduced excretion of a melatonin metabolite in workers exposed to 60 Hz magnetic fields, *American Journal of Epidemiology*, 1999 (150/1), 27-36.
- [Bur 00] Burch et al.: Melatonin metabolite levels in workers exposed to 60-Hz magnetic fields: work in substations and with 3-phase conductors, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2000 (42/2), 136-142.
- [Gra 00] Graham et al.: Multi-night exposure to 60 Hz magnetic fields: Effects on melatonin and its enzymatic metabolite, *Journal of Pineal Research*, 2000 (28/1), 1-8.
- [Hei 99] Heikkinen et al.: Chronic exposure to 50-Hz magnetic fields or 900-MHz electromagnetic fields does not alter nocturnal 6-hydroxymelatonin sulfate secretion in CBA/S mice, *Electro- and Magnetobiology*, 1999 (18/1), 33-42.
- [Hon 01] Hong et al.: Chronic exposure to ELF magnetic fields during night sleep with electric sheet: Effects on diurnal melatonin rhythms in men, *Bioelectromagnetics*, 2001 (22/2), 138-143.
- [Joh 98] John et al.: 60 Hz magnetic field exposure and urinary 6-sulphatoxymelatonin levels in the rat, *Bioelectromagnetics*, 1998 (19/3), 172-180.
- [Juu 00] Juutilainen et al.: Nocturnal 6-hydroxymelatonin sulfate excretion in female workers exposed to magnetic fields, *Journal of Pineal Research*, 2000 (28), 97-104.
- [Lös 98] Löscher et al.: Exposure of female rats to a 100-micro T 50 Hz magnetic field does not consistent changes in nocturnal levels of melatonin, *Radiation Research*, 1998 (150/5), 557-567.

- [Pic 98] Picazo et al.: Inhibition of melatonin in the plasma of third-generation male mice under the action of ELF magnetic fields, *Electro- and Magnetobiology*, 1998 (7/1), 75-85.
- [Wil 99] Wilson et al.: Effects of 60 Hz magnetic field exposure on the pineal and hypothalamic pituitary-gonadal axis in the Siberian hamster (*Phodopus sungorus*), *Bioelectromagnetics*, 1999 (20/4), 224-232.
- [Woo 98] Wood et al.: Changes in human plasma melatonin profiles in response to 50 Hz magnetic field exposure, *Journal of Pineal Research*, 1998 (25/2), 116-127.
- [Yel 98] Yellon und Truong: Melatonin rhythm onset in the adult Siberian hamster: Influence of photoperiod but not 60-Hz magnetic field exposure on melatonin content in the pineal gland and in circulation, *Journal of Biological Rhythms*, 1998 (13/1), 52-59.

A 2.2.5 Einflüsse auf das zentrale Nervensystem (ZNS) und Beeinflussung kognitiver Funktionen

- [Cra 99] Crasson et al.: 50 Hz magnetic field exposure influence on human performance and psychophysiological parameters: Two double-blind experimental studies, *Bioelectromagnetics*, 1999 (20/8), 474-486.
- [GNL 00] Gezondheidsraad, Niederlande: Exposure to electromagnetic fields (0 Hz - 10 MHz), 2000.
- [Gra 99] Graham et al.: Human exposure to 60-Hz magnetic fields: neurophysiological effects, *International Journal of Psychophysiology*, 1999 (3/2), 169-175.
- [Lai 98] Lai et al.: Acute exposure to a 60 Hz magnetic field affects rats water-maze performance, *Bioelectromagnetics*, 1998 (19/2), 117-122.
- [Pre 98] Preece et al.: The effect of a 50 Hz magnetic field on cognitive function in humans, *International Journal of Radiation Biology*, 1998 (74/4), 463-470.
- [Rei 00] Reilly (Task Leader), Draft: Interim Guidelines for Limiting Human Exposure to Electric and Magnetic Fields Based on Established Mechanisms: 0 - 3 kHz, IEEE, SCC 28, SC3, 06.2000.
- [Sie 98a] Sienkiewicz et al.: Deficits in spatial learning after exposure of mice to a 50 Hz magnetic field, *Bioelectromagnetics*, 1998 (19/2), 79-84.
- [Sie 98b] Sienkiewicz et al.: 50 Hz magnetic field effects on the performance of a spatial learning task by mice, *Bioelectromagnetics*, 1998 (19/8), 486-493.

A 2.2.6 Untersuchungen zu Beeinflussungen des Schlafes

- [Ake 99] Akerstedt et al.: A 50-Hz electromagnetic field impairs sleep, *Journal of Sleep Research*, 1999 (8/1), 77-81.
- [Gra 99] Graham und Cook: Human sleep in 60 Hz magnetic fields, *Bioelectromagnetics*, 1999 (20/5), 277-283.
- [Mül 00] Müller, C. H.: Niederfrequente elektrische und magnetische Felder und Elektrosensibilität in der Schweiz. Dissertation, ETH Nr. 13903 Zürich 2000.

A 2.2.7 Psychische Beeinflussungen wie z.B. Depression und Suizid

- [Wji 00] van Wjingaarden et al.: Exposure to electromagnetic fields and suicide among electric utility workers: a nested case-control study, *Occupational and Environmental Medicine*, 2000 (57/4), 258-263.

A 2.2.8 Elektrosensibilität

- [Ber 97] Bergqvist, U., Vogel, E., Aringer, L., Cunningham, J., Gobba, F., Leitgeb, N., Miro, L., Neubauer, G., Ruppe, I., Vecchia, P., Wadman, C.: Possible Health Implications of Subjective Symptoms and Electromagnetic Fields. CEC DG V Report, Arbeitslivinstitutet, Stockholm 1997.
- [Hil 98] Hillert, L.: Hypersensitivity to Electricity: Management and Intervention Programs. COST 244 Proc. Graz 1998, 17-30.
- [Mül 00] Müller, C. H.: Niederfrequente elektrische und magnetische Felder und Elektrosensibilität in der Schweiz. Dissertation, ETH Nr. 13903 Zürich 2000.
- [Wen 94] Wennberg, A., Franzen, O., Paulsson, L. E.: Electromagnetic Field Provocations of Subjects wie Electromagnetic Hypersensitivity. COST 244 Proc. Graz 1994, DG XIII/72/95, 133-139

Literatur zu Kapitel A3:

- [IEG 00] Independent Expert Group on Mobile Phones, Mobile Phones and Health, Stewart-Report, 2000.

A 3.1.1 Moleküle und Membranen

- [Beh 99] Behari: Issues in electromagnetic field-biointeractions, Indian Journal of Biochemistry & Biophysics, 1999 (36/5), 352-360.
- [Lin 99] Linz, von Westphalen, Streckert, Hansen and Meyer: Membrane Potential and Currents of Isolated Heart Muscle Cells Exposed to Pulsed Radio Frequency Fields, Bioelectromagnetics 1999 (20/8), 497-511.
- [Mey 00] Meyer, Linz and Achenbach: Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf planare Lipidmembranen und Zellmembranen lebender Zellen, Athermische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme - Expertengespräch, BGFE Tagungsband, 2000, 26-35.

A 3.1.2 Kalzium

- [Lin 99] Linz, von Westphalen, Streckert, Hansen and Meyer: Membrane Potential and Currents of Isolated Heart Muscle Cells Exposed to Pulsed Radio Frequency Fields, Bioelectromagnetics 1999 (20/8), 497-511.
- [Gol 00] Gollnick, Lerchl, Meyer: Der Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Kalziumhomöostase in verschiedenen Zellen, Athermische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme - Expertengespräch, BGFE Tagungsband, 2000, 19-25.
- [Mey 98] Meyer, Hambach, Achenbach and Linz: The Influence of amplitude-modulated radio-frequency fields on the calcium current into human neuroblastoma cells, BEMS, Abstract Book of the 20th Annual Meeting, 1998 A-7-4, 39.
- [UNE 93] UNEP/IRPA/WHO: Electromagnetic Fields (300 Hz-300 GHz) Geneva, World Health Organisation, Environmental Health Criteria 137, 1993.

A 3.2.1 Verhalten bei Tieren

- [Sie 00] Sienkiewicz, Blackwell, Haylock, Saunders and Cobb: Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice, *Bioelectromagnetics*, 2000 (21/3), 51-158.
- [StM 01] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU): Untersuchungen zum Einfluss elektromagnetischer Felder von Mobilfunkanlagen auf Gesundheit, Leistung und Verhalten von Rindern. (2001) Materialien 158, Ed.: Volmer, Hecht, Herzog, Wenzel, Wöhr, Klemp, Unsheim, Wuschek.
- [Wan 00] Wang and Lai: Acute exposure to pulsed 2450 MHz microwaves affects water-maze performance of rats, *Bioelectromagnetics*, 2000 (21), 52-56.

A 3.2.2 Elektroenzephalogramm beim Menschen

- [Bor 99] Borbely, Huber, Graf, Fuchs, Gallmann and Achermann: Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram, *Neuroscience Letters*, 1999 (275/3), 207-210.
- [Fre 98] Freude, Ullsperger, Eggert and Ruppe: Effects of microwaves emitted by cellular phones on human slow brain potentials *Bioelectromagnetics*, 1998 (19/6) 384-387.
- [Fre 00] Freude, Ullsperger, Eggert and Ruppe: Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials, *European Journal of Applied Physiology and Occupational Phys*, 2000 (81/1-2), 18-27.
- [Hie 00] Hietanen, Kovala and Hamalainen: Human brain activity during exposure to radiofrequency fields emitted by cellular phones, *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, 2000 (26/2), 87-92.
- [Kli 95] von Klitzing: Low-frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man, *Phys. Med.*, 1995 (11), 77-80.
- [Kra 00] Krause, Sillanmäki, Koivisto, Häggqvist, Saarela, Revonsuo, Laine and Hämäläinen: Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during a memory task, *Neuroreport*, 2000 (11/4), 761-764.
- [Kra 98] Krafczyk: Keine Änderung der elektrischen Hirnaktivität durch Handy-Strahlung EEG-Messung des Einflusses von Mobiltelefonen, *Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins*, 1998 (19), 11-16.
- [Man 98] Mann, Röschke, Connemann and Beta: No effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on heart rate variability during human sleep, *Neuropsychobiology*, 1998 (38/4), 251-256.
- [Rei 95] Reiser, Dimpfel and Schober: The influence of electromagnetic fields on human brain activity, *European Journal of Medical Research*, 1995 (1), 27-32.
- [Rös 97] Röschke und Mann: No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram, *Bioelectromagnetics*, 1997 (18/2), 172-176.
- [Spl 97] Splittler, Calabrese und Gehlen: Einfluß elektromagnetischer Felder auf die menschliche Gehirntätigkeit, *Medizintechnik Referate*, 1997 (117/5), 176-178.
- [Urb 98] Urban, Lukás and Roth: Does acute exposure to the electromagnetic field emitted by a mobile phone influence visual evoked potentials? A pilot study. *Cent Eur J Public Health*, 1998 (6/4), 288-290.
- [Wag 98] Wagner, Röschke, Mann, Hiller and Frank: Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: A polysomnographic study using standardized conditions, *Bioelectromagnetics*, 1998 (19/3), 199-202.

A 3.2.3 Schlaf

- [Alt 95] Altpeter, Krebs, Pfluger, Känel von, Blattmann, Emmenegger, Cloetta, Rogger, Gerber, Manz, Coray, Baumann, Staerk, Griot, Abelin: Study of Health Effects of the Shortwave Transmitter Station of Schwarzenburg, Berne Switzerland, BEW Publication Series Study, 1995 (55), 1-156.

A 3.2.4 Kognitive Funktionen beim Menschen

- [Koi 00a] Koivisto, Revonsuo, Krause, Haarala, Sillanmäki, Laine and Hämäläinen: Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans, *Neuroreport*, 2000 (11/2), 413-415.
- [Koi 00b] Koivisto, Krause, Revonsuo, Laine and Hämäläinen: The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory, *Neuroreport*, 2000 (11/8), 1641-1643.
- [Pre 99] Preece, Iwi, Davies-Smith, Wesnes, Butler, Lim and Varey: Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man, *International Journal of Radiation Biology*, 1999 (75/4), 447-456.

A 3.2.5 Blut-Hirn-Schranke bei Ratten

- [Fri 97] Fritze, Sommer, Schmitz, Mies, Hossmann, Kiessling and Wiessner: Effect of global system for mobile communication (GSM) microwave exposure on blood-brain barrier permeability in rat, *Acta Neuropathologica*, 1997 (94/5), 465-470.
- [Per 97] Persson, Salford and Brun: Blood-brain barrier permeability in rats exposed to electromagnetic fields used in wireless communication, *Wireless Networks*, 1997 (3), 455-461.
- [Sal 94] Salford, Brun, Eberhardt and Persson: Permeability of the Blood-Brain Barrier Induced by 915 MHz Electromagnetic Radiation, Continuous Wave and Modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz, *Microscopy Research and Technique*, 1994 (27/6), 535-542.
- [Schi 00] Schirmacher, Winters, Fischer, Goeke, Galla, Kullnick, Ringelstein and Stögbauer: Electromagnetic fields (1.8 GHz) increase the permeability to sucrose of the blood-brain barrier in vitro, *Bioelectromagnetics*, 2000, (21/5) 338-345.
- [Tsu 00] Tsurita, Nagawa, Ueno, Watanabe and Taki: Biological and morphological effects on the brain after exposure of rats to a 1439 MHz TDMA field, *Bioelectromagnetics*, 2000 (21/5), 364-371.

A 3.2.6 Melatonin bei Tieren und bei Menschen

- [Ler 00] Lerchl, Brendel, Streckert, Bitz und Hannsen: Untersuchungen zur Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Dsungarische Hamster (*phodopus sungorus*), Athermische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme - Expertengespräch, BGFE Tagungsband, 2000, 42-46.
- [Man 98] Mann and Röschke: Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on the neuroendocrine system, *Neuroendocrinology*, 1998 (67/2), 139-144.
- [deS 99] De Seze, Ayoub, Peray, Miro and Touitou: Evaluation in humans of the effects of radiocellular telephones on the circadian patterns of melatonin secretion, a chronobiological rhythm marker, *Journal of Pineal Research*, 1999, (27/4) 237-242.
- [Ste 87] Stevens RG: Electric Power use and Breast Cancer: a Hypothesis *American Journal of Epidemiology*, 1987 (125/4), 556-561.

- [StM 01] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU): Untersuchungen zum Einfluss elektromagnetischer Felder von Mobilfunkanlagen auf Gesundheit, Leistung und Verhalten von Rindern. (2001) Materialien 158, Ed.: Volmer, Hecht, Herzog, Wenzel, Wöhr, Klempt, Unsheim, Wuschek.
- [Vol 97] Vollrath, Spessert, Kratzsch, Keiner and Hollmann: No short-term effects of high-frequency electromagnetic fields on the mammalian pineal gland, *Bioelectromagnetics*, 1997 (18/5) 376-387.

A 3.2.7 Blutparameter und Immunsystem

- [Cho 92] Chou, Guy, Kunz, Johnson, Crowley and Krupp: Long-term, low-level microwave irradiation of rats, *Bioelectromagnetics*, 1992 (13), 469.
- [Das 00] Dasdag, Akdag, Ayyildiz, Demirtas, Yayla and Sert: Do cellular phones alter blood parameters and birth weight of rats? *Electro- and Magnetobiology*, 2000, (19/1), 107-113.
- [Fes 99] Fesenko, Makar, Novoselova and Sadovnikov: Microwaves and cellular immunity. I. Effect of whole body microwave irradiation on tumor necrosis factor production in mouse cells, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1999 (49/1), 29-36.
- [Jen 97] Jensch: Behavioral teratologic studies using microwave radiation: is there an increased risk from exposure to cellular phones and microwave ovens?, *Reprod Toxicol*, 1997 (11), 601.
- [Nov 99] Novoselova, Fesenko, Makar and Sadovnikov: Microwaves and cellular immunity II. Immunostimulating effects of microwaves and naturally occurring antioxidant nutrients, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1999 (49/1), 37-41.

A 3.2.8 Reproduktion und Entwicklung

- [Jen 97] Jensch: Behavioral teratologic studies using microwave radiation: is there an increased risk from exposure to cellular phones and microwave ovens?, *Reprod Toxicol*, 1997 (11), 601.
- [Mag 97] Magras, Xenos: RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice, *Bioelectromagnetics*, 1997, (18/6), 455-461.
- [StM 01] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU): Untersuchungen zum Einfluss elektromagnetischer Felder von Mobilfunkanlagen auf Gesundheit, Leistung und Verhalten von Rindern. (2001) Materialien 158, Ed.: Volmer, Hecht, Herzog, Wenzel, Wöhr, Klempt, Unsheim, Wuschek.

A 3.3.1 Untersuchungen zu krebsrelevanten Proteinen, Krebsentstehung und -promotion

- [Dan 98] Daniells, Duce, Thomas, Sewell, Tattersall and De Pomerai: Transgenic nematodes as biomonitors of microwave-induced stress, *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 1998 (399/1), 55-64.
- [deP 00] de Pomerai, Daniells, David, Allan, Duce, Mutwakil, Thomas, Sewell, Tattersall, Jones and Candido: Cell biology-Non-thermal heat-shock response to microwaves, *Nature*, 2000 (405/6785), 417-418.

- [Fri 97] Fritze, Wiessner, Kuster, Sommer, Gass, Hermann, Kiessling and Hossmann: Effect of global system for mobile communication microwave exposure on the genomic response of the rat brain, *Neuroscience*, 1997 (81/3), 627-639.
- [Gos 99] Goswami, Albee, Parsian, Baty, Moros, Pickard, Roti, Hunt: Proto-oncogene mRNA levels and activities of multiple transcription factors in C3H 10T1/2 murine embryonic fibroblasts exposed to 835.62 and 847.74 MHz cellular phone communication frequency radiation, *Radiation Research*, 1999 (151/3), 300-309.
- [Iva 97] Ivaschuk, Jones, Ishida-Jones, Haggren, Adey, Phillips: Exposure of nerve growth factor-treated PC12 rat pheochromocytoma cells to a modulated radio-frequency field at 836.55 MHz: Effects on c-jun and c-fos expression *Bioelectromagnetics*, 1997 (18/3), 223-229.
- [Lai 95] Lai und Singh: Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells, *Bioelectromagnetics*, 1995 (16/4), 207-210.
- [Lai 96] Lai and Singh: Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation, *International Journal of Radiation Biology*, 1996 (69/4), 13-521.
- [Li 99] Li, Chou, McDougall, Dasgupta, Wu, Ren, Lee, Han and Momand J: TP53 tumor suppressor protein in normal human fibroblasts does not respond to 837 MHz microwave exposure, *Radiation Research*, 1999 (151/6), 710-716.
- [Lit 93] Litovitz, Krause, Penafiel, Elson and Mullins: The Role of Coherence Time in the Effect of Microwaves on Ornithine Decarboxylase Activity, *Bioelectromagnetics*, 1993 (14), 395-403.
- [Mae 00] Maes, Collier, Verschaeve: Cytogenetic investigations on microwaves emitted by a 455.7 MHz car phone, *Folia Biologica* 2000 (46/5), 175-180.
- [Mal 97a] Malyapa, Ahern, Straube, Moros, Pickard and Roti: Measurement of DNA damage after exposure to 2450 MHz electromagnetic radiation, *Radiation Research*, 1997 (148/6), 608-617.
- [Mal 97b] Malyapa, Ahern, Straube, Moros, Pickard and Roti: Measurement of DNA damage after exposure to electromagnetic radiation in the cellular phone communication frequency band (835.62 and 847.74 MHz), *Radiation Research*, 1997 (148/6), 618-627.
- [Pen 97] Penafiel, Litovitz, Krause, Desta and Mullins: Role of modulation on the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity in L929 cells, *Bioelectromagnetics*, 1997 (18), 132.
- [Phi 98] Phillips, Ivaschuk, Ishida-Jones, Jones, Campbell-Beachler, Haggren: DNA damage in Molt-4 T-lymphoblastoid cells exposed to cellular telephone radio-frequency fields in vitro, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1998 (45/1), 103-110.

- [Vij 00] Vijayalaxmi, Leal, Szilagy, Prihoda, Meltz: Primary DNA damage in human blood lymphocytes exposed *in vitro* to 2450 MHz radiofrequency radiation, *Radiation Research*, 2000, (153/4), 479-486.
- [Vij 01] Vijayalaxmi, Pickard, Bisht, Leal, Meltz, Roti Roti, Straube, Moros: Cytogenetic Studies in Human Blood Lymphocytes Exposed *In Vitro* to Radiofrequency Radiation at a Cellular Telephone Frequency (835,62 MHz, FDMA), *Radiation Research*, 2001 (155), 113-121.

A 3.3.2 Spontane und initiierte Tumorbildung

- [Ade 99] Adey, Byus, Cain, Higgins, Jones, Kean, Kuster, MacMurray, Stagg, Zimmerman, Phillips and Haggren: Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumors of the central nervous system in Fischer 344 rats chronically exposed to 836 MHz modulated microwaves, *Radiation Research*, 1999 (152/3), 293-302.
- [Cha 99] Chagnaud, Moreau and Veyret: No effect of short-term exposure to GSM-modulated low-power microwaves on benzo(A)pyrene-induced tumours in rat, *International Journal of Radiation Biology*, 1999 (75/10), 1251-1256.
- [Cho 92] Chou, Guy, Kunz, Johnson, Crowley and Krupp: Long-term, low-level microwave irradiation of rats, *Bioelectromagnetics*, 1992 (13), 469.
- [Fre 98] Frei, Jauchem, Dusch, Merritt, Berger and Stedham: Chronic, low-level (1.0 W/kg) exposure of mice prone to mammary cancer to 2450 MHz microwaves, *Radiation Research*, 1998 (150/5), 568-576.
- [Hih 99] Hishikubo, Culbreth, Spitz, LaRegina, Pickard, Straube, Moros, Roti: Radiofrequency electromagnetic fields have no effect on the *in vivo* proliferation of the 9L brain tumor, *Radiation Research*, 1999 (152/6), 665-671.
- [Ima 98a] Imaida, Taki, Watanabe, Kamimura, Ito, Yamaguchi, Ito and Shirai: The 1.5 GHz electromagnetic near-field used for cellular phones does not promote rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay, *Japanese Journal of Cancer Research*, 1998 (89/10), 995-1002.
- [Ima 98b] Imaida, Taki, Yamaguchi, Ito, Watanabe, Wake, Aimoto, Kamimura, Ito and Shirai: Lack of promoting effects of the electromagnetic near-field used for cellular phones (929.2 MHz) on rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay, *Carcinogenesis*, 1998 (19/2), 311-314.
- [Rep 97] Repacholi, Basten, Gebiski, Noonan, Finnie and Harris: Lymphomas in E mu-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields, *Radiation Research*, 1997 (147/5), 631-640.
- [Tol 97] Toler, Shelton, Frei, Merritt and Stedham: Long-term, low-level exposure of mice prone to mammary tumors to 435 MHz radiofrequency radiation, *Radiation Research*, 1997 (148), 227-234.

A 3.3.3 Epidemiologische Studien

- [Har 99] Hardell, Nasman, Pahlson, Hallquist and Mild: Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: A case-control study, *International Journal of Oncology*, 1999 (15/1), 113-116.
- [Ins 01] Inskip, Tarone, Hatch, Wilcosky, Shapiro, Selker, Fine, Black, Loeffler, Linet: Cellular-Telephone Use and Brain Tumors, *N Engl J Med*, 2001 (344), 79-86.

- [Joh 01] Johansen, Boice, McLaughlin, Olsen: Cellular telephones and cancer – A nationwide cohort study in Denmark, *Journal of the National Cancer Institute*, 2001 (93/3), 203-207.
- [Mor 00] Morgan, Kelsh, Zhao, Exuzides, Heringer, Negrete: Radiofrequency exposure and mortality from cancer of the brain and lymphatic/hematopoietic systems, *Epidemiology*, 2000 (11/2), 118-127.
- [Mus 00] Muscat, Malkin, Thompson, Shore, Stellman, McRee, Neugut, Wynder: Handheld cellular telephone use and risk of brain cancer, *Jama-Journal of the American Medical Association*, 2000 (284/23), 3001-3007.
- [Sta 01] Stang, Anastassiou, Ahrens, Broman, Bornfeld, Jockel: The possible role of radiofrequency radiation in the development of uveal melanoma, *Epidemiology*, 2001 (12/1), 7-12.

A 4 Grenzwerte

Auszüge aus der Empfehlung der Strahlenschutzkommission

„Schutz der Bevölkerung bei Exposition durch elektromagnetische Felder (bis 300 GHz)“

und der

ICNIRP-„Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)“,

veröffentlicht in: Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 23 (1999):

Für die Begrenzung der Exposition durch elektromagnetische Felder muss zwischen Basisgrenzwerten und abgeleiteten Grenzwerten (Referenzwerten) unterschieden werden.

– *Basisgrenzwerte*

Grenzwerte der Exposition durch elektromagnetische Felder, die auf gesicherten Schwellenwerten der unmittelbar im Gewebe wirksamen physikalischen Einflussgrößen unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren beruhen, werden als „Basisgrenzwerte“ bezeichnet. Je nach den Frequenzen der Felder sind die wirksamen physikalischen Größen die elektrische Feldstärke bzw. die zugehörige Stromdichte und die spezifische Energieabsorptionsrate im Gewebe. Jedoch können bei exponierten Personen nur die Feldstärken bzw. die Leistungsflussdichte in Luft, außerhalb des Körpers, ohne weiteres gemessen werden.

– *Abgeleitete Grenzwerte*

Da die Verfahren zur Überprüfung der Einhaltung der Basisgrenzwerte zu aufwendig sind, werden zur Expositionsbeurteilung „abgeleitete Grenzwerte“ eingeführt. Zu ihrer Formulierung werden unmittelbar messbare Größen verwendet, die in der Umgebung des Menschen ermittelt werden können. Einige abgeleitete Grenzwerte sind aus den entsprechenden Basisgrenzwerten unter Nutzung von Messverfahren und/oder Berechnungsverfahren hergeleitet worden, wobei häufig ungünstige Expositionsbedingungen ("worst case") angenommen werden, die zu einer konservativen Abschätzung führen. Andere beziehen sich auf die Wahrnehmung und auf schädliche indirekte Wirkungen der Exposition durch elektromagnetische Felder.

Die abgeleiteten Größen sind: elektrische Feldstärke, magnetische Flussdichte und Leistungsflussdichte außerhalb des Körpers sowie die im Körper fließenden Ströme.

Die Einhaltung des abgeleiteten Grenzwerts bedeutet in jedem Falle die Einhaltung des entsprechenden Basisgrenzwerts. Übersteigt der gemessene oder berechnete Wert den abgeleiteten Grenzwert, so folgt daraus nicht unbedingt, dass auch der Basisgrenzwert überschritten wird. Allerdings ist es immer dann, wenn ein abgeleiteter Grenzwert überschritten wird, er-

forderlich, die Übereinstimmung mit dem relevanten Basisgrenzwert zu prüfen und festzustellen, ob zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Neben einer ausführlichen Dokumentation über die Basisgrenzwerte sowie die abgeleiteten Grenzwerte kontinuierlicher Sinusfelder enthält die Empfehlung noch Begrenzungen für eine gepulste Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder, abgeleitete Grenzwerte für Kontaktströme, die bei Berührung leitfähiger Objekte unter Feldeinfluss auftreten können, sowie Hinweise für die Risikobewertung bei gleichzeitiger Exposition durch Felder mit verschiedenen Frequenzen.

Die Grenzwertempfehlungen beziehen sich nicht direkt auf Vorschriften für die Begrenzung der Emission technischer Geräte. Sie behandeln auch keine Techniken, wie Methoden zur Messung oder Berechnung physikalischer Größen, die elektromagnetische Felder charakterisieren; eingehende Beschreibungen messtechnischer Ausrüstungen und Messverfahren zur genauen Bestimmung solcher physikalischer Größen findet man in technischen Normen.

Die vorliegenden Grenzwertempfehlungen betreffen nicht die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten. Deren Einhaltung schließt Störungen von oder Wirkungen auf medizinische Geräte, wie Metallprothesen, Herzschrittmacher, Defibrillatoren und Cochlea-Implantate, nicht unbedingt aus. Störungen von Herzschrittmachern können bei Werten auftreten, die unterhalb der abgeleiteten Grenzwerte liegen. Festlegungen hierzu sind nicht Gegenstand dieser Empfehlungen.

Die Begrenzungen gelten ferner nicht für die medizinische Anwendung elektrischer, magnetischer oder elektromagnetischer Felder.

Tabelle 3 Basisgrenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder bei Frequenzen bis zu 10 GHz bzw. zwischen 10 und 300 GHz

Frequenzbereich 0- 10 GHz ^{a)}	Stromdichte für Kopf und Rumpf (mA/m ²) (Effektivwerte)	Durchschnitt- liche Ganz- körper-SAR (W/kg)	Lokale SAR (Kopf und Rumpf) (W/kg)	Lokale SAR (Gliedermaßen) (W/kg)
bis 1 Hz	8	-	-	-
1 - 4 Hz	8/f	-	-	-
4 Hz - 1 kHz	2	-	-	-
1 - 100 kHz	f/500	-	-	-
100 kHz -10 MHz	f/500	0,08	2	4
10 MHz -10 GHz	-	0,08	2	4
Frequenzbereich 10 - 300 GHz ^{b)}	Leistungsflussdichte (W/m ²)			
	10			

^{a)} Anmerkungen:

1. f ist die Frequenz in Hertz.
2. Aufgrund der elektrischen Inhomogenität des menschlichen Körpers sollten die Stromdichten über einen Querschnitt von 1 cm² senkrecht zur Stromrichtung gemittelt werden.
3. Für Frequenzen bis 100 kHz können die Spitzenwerte für die Stromdichten erhalten werden, indem der Effektivwert mit $\sqrt{2}$ (~1,414) multipliziert wird. Für Pulse der Dauer t_p sollte die auf die Basisgrenzwerte anzuwendende Frequenz über $f=1/(2 t_p)$ ermittelt werden.
4. Für Frequenzen bis 100 kHz und für gepulste Magnetfelder können die mit den Pulsen verbundenen maximalen Stromdichten aus den Anstiegs- und Abfallzeiten sowie der maximalen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte berechnet werden. Die induzierte Stromdichte lässt sich dann mit den entsprechenden Basisgrenzwerten vergleichen.
5. Sämtliche SAR-Werte sind über beliebige 6-Minuten-Zeitintervalle zu mitteln.
6. Die zu mittelnde Gewebemasse für lokale SAR-Werte beträgt 10 g eines beliebigen zusammenhängenden Körpergewebes; die so ermittelten SAR-Maximalwerte sollten für die Expositionsermittlung verwendet werden.
7. Für Pulse der Dauer t_p sollte die auf die Basisgrenzwerte anzuwendende Frequenz über $f = 1/(2 t_p)$ ermittelt werden. Darüber hinaus wird für den Frequenzbereich von 3 bis 10 GHz und für die lokale Exposition des Kopfes ein zusätzlicher Basisgrenzwert empfohlen, um durch thermoelastische Expansion bedingte Höreffekte einzuschränken oder zu vermeiden. Danach sollte die SA bei gepulsten Expositionen 10 mJ/kg bei Beschäftigten und 2 mJ/kg für die Normalbevölkerung nicht überschreiten, gemittelt über je 10 g Gewebe.
8. Die Basisgrenzwerte für die Stromdichte sollen akute Wirkungen im zentralnervösen Gewebe in Kopf und Rumpf vermeiden. In anderen Körpergeweben können bei entsprechender Exposition höhere Stromdichtewerte auftreten.

^{b)} Anmerkungen:

1. Leistungsflussdichten sind über eine beliebige Teilfläche von 20 cm² der exponierten Fläche und über einen $68/f^{1,05}$ -minütigen Zeitraum (wobei f in GHz anzugeben ist) zu mitteln, um die mit steigender Frequenz geringer werdenden Eindringtiefen auszugleichen.
2. Räumliche Maximal-Leistungsflussdichten, gemittelt über 1 cm², sollten das 20-fache der obigen Werte nicht überschreiten.

Tabelle 4 Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder (ungestörte Effektivwerte)^a

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke (V m ⁻¹)	Magnetische Feldstärke (A m ⁻¹)	B-Feld (µT)	Äquivalente Leistungsdichte bei ebenen Wellen S _{eq} (W m ⁻²)
bis 1 Hz	—	3,2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	—
1-8 Hz	10 000	3,2 x 10 ⁴ /f ²	4 x 10 ⁴ /f ²	—
8-25 Hz	10 000	4000/f	5000/f	—
0,025-0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	—
0,8-3 kHz	250/f	5	6,25	—
3-150 kHz	87	5	6,25	—
0,15-1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	—
1-10 MHz	87/f ^{1/2}	0,73/f	0,92/f	—
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	1,375f ^{1/2}	0,0037f ^{1/2}	0,0046f ^{1/2}	f/200
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

^a Anmerkungen:

1. f wie in der Frequenzbereichs-Spalte wiedergegeben.
2. Vorausgesetzt, dass die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden und schädliche indirekte Wirkungen ausgeschlossen werden können, dürfen die Werte für die Feldstärke überschritten werden.
3. Für Frequenzen zwischen 100 kHz und 10 GHz sind S_{eq}, E², H² und B² über einen beliebigen 6-Minuten-Zeitraum zu mitteln.
4. Für Spitzenwerte bei Frequenzen bis 100 kHz siehe Tabelle 4, Anmerkung 3.
5. Für Spitzenwerte bei Frequenzen über 100 kHz siehe Abbildung 1 und 2. Zwischen 100 kHz und 10 MHz werden die Spitzenwerte der Feldstärken durch Interpolation zwischen dem 1,5-fachen Spitzenwert bei 100 kHz und dem 32-fachen Spitzenwert bei 10 MHz erhalten. Für Frequenzen über 10 MHz wird vorgeschlagen, dass der Spitzenwert der äquivalenten Leistungsdichte ebener Wellen, gemittelt über die Pulsdauer, das 1000-fache der S_{eq}-Grenzwerte nicht überschreitet, bzw. dass die Feldstärke das 32-fache der in der Tabelle angegebenen Feldstärken-Expositionsweite nicht überschreitet.
6. Für Frequenzen über 10 GHz sind S_{eq}, E², H² und B² über einen beliebigen 68/f^{1,05}-Minuten-Zeitraum zu mitteln (f in GHz).
7. Für Frequenzen < 1 Hz sind keine E-Feld-Werte angegeben, da es sich effektiv um statische elektrische Felder handelt. Bei den meisten Menschen wird die störende Wahrnehmung elektrischer Oberflächenladungen bei Feldstärken unter 25 kV m⁻¹ nicht auftreten. Funkenentladungen, die Stress oder Belästigungen verursachen, sollten vermieden werden.