



UMWELT-MATERIALIEN
NR. 162

Nichtionisierende Strahlung



Hochfrequente
Strahlung
und Gesundheit



BUWAL Bundesamt für Umwelt,
Wald und Landschaft

**UMWELT-MATERIALIEN
NR. 162**

Nichtionisierende Strahlung

**Hochfrequente
Strahlung
und Gesundheit**

**Bewertung von wissenschaftlichen Studien
an Menschen im Niedrigdosisbereich**

Avec résumé en français
Con riassunto in italiano
With summary in English

**Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL
Bern, 2003**

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
*Das BUWAL ist ein Amt des Eidg. Departements für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)*

Auftraggeber

BUWAL

Autoren

Dr. Martin Rösli, Dr. Regula Rapp, Institut für
Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel,
Leitung: Prof. Dr. med. Ursula Ackermann-Liebrich

Zitierung

Rösli, M.; Rapp, R. 2003
Hochfrequente Strahlung und Gesundheit
BUWAL Umwelt-Materialien Nr. 162
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern

Fachliche Begleitung BUWAL

Dr. Jürg Baumann, Felix Heckendorn, Martin Reidy

Titelfotos

© BUWAL/Docuphot und Emanuel Ammon/AURA

Webseite BUWAL-Sektion NIS

Webseite des BUWAL zum Fachgebiet nichtionisierende
Strahlung: www.elektrosmog-schweiz.ch

Datenbank ELMAR

Detaillierte Zusammenfassungen und Bewertungen der
meisten, im vorliegenden Bericht verarbeiteten, wissen-
schaftlichen Publikationen finden sich in der Datenbank
ELMAR (**e**lectromagnetic radiation) unter:
www.elektrosmog-schweiz.ch/gesundheit

Bezug pdf-Dokument

www.buwalshop.ch

Bezugsquelle

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
Dokumentation
3003 Bern
Fax + 41 (0)31 324 02 16
E-Mail: docu@buwal.admin.ch
Internet: www.buwalshop.ch

Bestellnummer und Preis

UM-162-D / CHF 18.-- (inkl. MWSt)

© BUWAL 2003

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5	6 Methodik	61
Vorwort	7	6.1 Ziel	61
Zusammenfassung	9	6.2 Studienauswahl	61
Résumé	14	6.3 Kriterien für die Bewertung der wissenschaftlichen Studien	62
Riassunto	19	6.4 Spezifische Hinweise zur Beurteilung der Kausalität	64
Summary	24	6.5 Vergleich verschiedener Expositionsmasse	66
1 Einleitung	29	6.6 Struktur des Ergebnisteils dieses Berichtes	69
2 Physikalische und technische Grundlagen	31	7 Gesundheitliche Auswirkungen	71
2.1 Physikalische Grundlagen	31	7.1 Physiologische Wirkungen	71
2.2 Technische Anwendungen von Hochfrequenzstrahlung	33	7.1.1 Hormonsystem	71
2.3 Technik der Mobilkommunikation	35	7.1.2 Immunsystem	75
2.3.1 Mobiltelefonie der 1. Generation (Natel C)	35	7.1.3 Gehirnphysiologie	77
2.3.2 Mobiltelefonie der 2. Generation (GSM)	35	7.1.4 Reizwahrnehmung und Reizverarbeitung	85
2.3.3 Mobilfunksysteme in den USA	39	7.1.5 Mikrowellen-Hören	91
2.3.4 Andere drahtlose Kommunikationstechniken	40	7.1.6 Herz-Kreislaufsystem	92
3 Wechselwirkung von Hochfrequenzstrahlung mit Menschen	41	7.2 Wirkungen auf das Befinden	95
3.1 Absorption	41	7.2.1 Wohlbefinden allgemein	96
3.2 Induzierung von elektrischen Strömen	43	7.2.2 Kopfschmerzen	101
3.3 Andersartige Wechselwirkungen im Niedrigdosisbereich	43	7.2.3 Schlaf	104
4 Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung	45	7.2.4 Psychisches Befinden	109
4.1 Expositionsabschätzungen in Studien am Menschen	45	7.2.5 Elektromagnetische Hypersensibilität	110
4.2 Vergleich von Expositionssituationen	46	7.3 Kanzerogene Wirkungen	112
4.2.1 Exposition gegenüber der Strahlung von Mobilfunkbasisstationen	46	7.3.1 Genotoxizität	113
4.2.2 Exposition gegenüber der Strahlung von Mobiltelefonen	48	7.3.2 Leukämien, maligne Lymphome	115
4.2.3 Schnurlostelefone	51	7.3.3 Tumore des Zentralnervensystems	123
4.2.4 Exposition gegenüber der Strahlung von Radio- und TV-Sendern	51	7.3.4 Brustkrebs	130
4.2.5 Vergleich von typischen Expositionssituationen im Hochfrequenz-Bereich	53	7.3.5 Augentumore	132
5 Grenzwerte	57	7.3.6 Weitere Tumorarten	133
5.1 Grundlage der Grenzwerte	57	7.4 Nicht-kanzerogene Wirkungen	137
5.2 ICNIRP-Richtlinien	58	7.4.1 Infertilität/Abort	137
5.3 Schweizerische Grenzwerte	59	7.4.2 Mortalität	140
		7.5 Indirekte Wirkungen	142
		7.5.1 Verkehrsunfälle	142
		7.5.2 Interferenzerscheinungen bei medizinischen Implantaten	143
		Anhang	145
		Verzeichnisse	147
		1 Abkürzungen und Glossar	147
		2 Literatur	153

Abstracts

E

The risk of high frequency radiation to human health at the levels permitted in Swiss legislation (or quoted in international recommendations) is evaluated based on over 200 scientific papers. The work focuses on those scientific studies in which the direct effects on humans of exposure to mobile telephones, radio transmitters and other equipment were investigated. For each of these effects, an assessment was made, (a) of the evidence for its existence (i.e. established, probable, possible, improbable or not assessable), (b) of its significance for human health (i.e. serious, reduced well-being or unknown), and (c) of the intensity threshold above which it was observed. The survey shows that no conclusive assessment of the risk to human health may be made on the basis of present scientific data. The preliminary conclusions are: no new – established – effects on health were identified at low dose rates; while biological effects from mobile telephones are probable, their relevance to human health is at present unknown; moreover, mobile telephones may possibly involve a higher risk of contracting brain tumours; for radiation from broadcast transmitters at intensities close to the Swiss installation limit value, adverse health effects and/or reduced well-being are judged to be possible. No conclusive studies are available on mobile telephone base stations. In many cases, no conclusions can be drawn on whether the effects observed are causally related to the radiation. The study recommends a continued precautionary approach to high frequency radiation, together with intensified research on its effects on human health.

Keywords:

non-ionising radiation,
high frequency
radiation,
low dose range,
non-thermal,
health,
risk evaluation,
human studies,
mobile telephone,
transmitter

D

Basierend auf einer Bewertung von über 200 wissenschaftlichen Studien wird beurteilt, ob hochfrequente Strahlung, wie sie heute gemäss schweizerischer Gesetzgebung und internationalen Empfehlungen zulässig ist, für den Menschen ein Gesundheitsrisiko darstellt. Der Analyse liegen diejenigen wissenschaftlichen Untersuchungen zu Grunde, die direkt am Menschen durchgeführt wurden. Als Expositionsquellen werden Mobiltelefone, Sendeanlagen und andere Strahlungsquellen eingeschlossen. Für jeden untersuchten biologischen Effekt wird bewertet, wie hoch die Evidenz für dessen Vorhandensein ist (gesichert, wahrscheinlich, möglich, unwahrscheinlich, nicht beurteilbar), welche Bedeutung er für die Gesundheit des Menschen hat (gravierend, Einschränkung des Wohlbefindens, Gesundheitsrelevanz unklar) und ab welcher Intensität er beobachtet wurde. Die Analyse ergibt, dass die Frage nach dem Gesundheitsrisiko bei der aktuellen wissenschaftlichen Datenlage nicht abschliessend beantwortet werden kann. Vorläufiges Fazit: Neue, gesicherte gesundheitliche Auswirkungen im Niedrigdosisbereich wurden nicht gefunden. Beim Gebrauch von Mobiltelefonen treten jedoch wahrscheinlich biologische Effekte auf, deren Gesundheitsrelevanz allerdings unklar ist. Möglich erscheint bei Mobiltelefonen eine Erhöhung des Risikos für Hirntumore. Bei Rundfunksendern werden gesundheitliche Folgen oder eine Einschränkung des Wohlbefindens bis in den Bereich des schweizerischen Anlagegrenzwertes als möglich eingestuft. Zu Mobilfunkbasisstationen liegen bisher keine aussagekräftigen Untersuchungen vor. Bei vielen Befunden lässt sich heute keine Aussage darüber machen, ob die beobachteten Wirkungen tatsächlich auf die Strahlung zurückzuführen sind. Es wird weiterhin ein vorsorglicher Umgang mit hochfrequenter Strahlung und eine verstärkte Erforschung der gesundheitlichen Wirkungen empfohlen.

Stichwörter:

nichtionisierende
Strahlung,
hochfrequente
Strahlung,
Niedrigdosisbereich,
nicht thermisch,
Gesundheit,
Risikobewertung,
Humanstudien,
Mobiltelefon,
Sendeanlage

F**Mots-clés:**

rayonnement non ionisant, rayonnement à haute fréquence, faible intensité, athermique, santé, évaluation des risques, études portant sur l'homme, téléphone mobile, installation émettrice

Le risque que présente pour l'homme le rayonnement à haute fréquence, utilisé dans les limites permises par la législation suisse et les recommandations internationales, est évalué sur la base de plus de 200 études scientifiques. L'analyse est fondée sur des études ayant porté directement sur l'homme. Les sources d'exposition comprennent les téléphones mobiles, les installations émettrices et d'autres sources de rayonnement. Chaque effet biologique examiné est évalué quant à son existence (prouvée, probable, possible, improbable, non évaluable), son importance pour la santé de l'homme (sérieux, limitation du bien-être, impact sanitaire peu clair) et à l'intensité à partir de laquelle il a été observé. L'analyse montre que la question du risque sanitaire ne peut pas être totalement résolue en l'état actuel des données scientifiques. A titre provisoire on peut dire: de nouveaux effets sanitaires dont l'existence est prouvée n'ont pas pu être mis en évidence dans le domaine des intensités faibles. Lors d'utilisation de téléphones mobiles apparaissent toutefois des effets biologiques probables dont l'impact sanitaire est toutefois peu clair. Il est possible que l'utilisation de téléphones mobiles augmente le risque de tumeurs du cerveau. Dans le cas des émetteurs radio, il est considéré comme possible que des intensités allant jusqu'à la valeur limite de l'installation, en vigueur en Suisse, aient des conséquences sanitaires et limitent le bien-être. Il n'existe pas d'études concluantes relatives aux stations de base de téléphonie mobile. Pour de nombreuses observations, le lien de causalité avec le rayonnement ne peut être établi à ce jour. Il convient donc de maintenir le principe de précaution en matière de rayonnement non ionisant à haute fréquence et d'accentuer la recherche sur les effets sanitaires.

I**Parole chiave:**

radiazioni non ionizzanti, radiazioni ad alta frequenza, intervallo delle dosi deboli, non termico, salute, valutazione dei rischi, studi effettuati direttamente sull'uomo, telefoni cellulari, impianti di trasmissione

Sulla base di oltre 200 studi scientifici è stato valutato se le radiazioni ad alta frequenza ammesse ai sensi della legislazione svizzera e delle raccomandazioni internazionali, costituiscano un rischio per la salute dell'uomo. La presente ricerca si basa sugli studi scientifici effettuati direttamente sull'uomo. Quale fonte di esposizione sono stati presi in considerazione i telefoni cellulari, gli impianti di trasmissione nonché altre fonti di radiazioni. Per il manifestarsi di ogni effetto biologico esaminato è stato valutato il grado di evidenza (sicuro, probabile, possibile, improbabile, non valutabile), la rilevanza per la salute delle persone (grave, limitazione del benessere fisico, rilevanza per la salute dubbia) e l'intensità a partire dalla quale questi effetti sono stati osservati. Dall'analisi è risultato che con i dati scientifici attualmente a disposizione non è possibile dare una risposta definitiva alla questione sul rischio per la salute. Conclusione provvisoria: nell'intervallo delle dosi deboli non è stato riscontrato alcun nuovo effetto sicuro sulla salute. Utilizzando i telefoni cellulari si verificano tuttavia degli effetti biologici probabili, la cui rilevanza per la salute non è però ancora chiara. In caso di utilizzazione dei telefoni cellulari un aumento del rischio di tumori al cervello pare possibile. Nel caso delle emittenti radiofoniche le ripercussioni sulla salute o una limitazione del benessere fisico vengono classificate come possibili per le intensità che rimangono nell'ambito previsto dal valore limite svizzero dell'impianto. Per le stazioni di base di telefonia mobile non si dispone finora di nessuna indagine interpretabile. Molti risultati non consentono infatti attualmente di affermare se gli effetti osservati siano effettivamente da imputare alle radiazioni. Si raccomanda di continuare ad avere un approccio preventivo nell'ambito delle radiazioni ad alta frequenza e di rafforzare la ricerca sulle ripercussioni sulla salute.

Vorwort

Ende 1999 hat der Bundesrat die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) erlassen. Die NISV enthält unter anderem Immissionsgrenzwerte, die dafür sorgen sollen, dass Mensch und Umwelt vor schädlichen und lästigen Einwirkungen nichtionisierender Strahlung (NIS) geschützt sind. Grundlage für die Festlegung von Immissionsgrenzwerten muss einerseits der Stand der Wissenschaft, andererseits die Erfahrung über schädliche oder lästige Auswirkungen sein.

Bei der Vorbereitung der NISV zeigte sich, dass weder die wissenschaftlichen Kenntnisse noch Alltagserfahrungen für eine abschliessende Beurteilung der Gesundheitsrisiken von NIS ausreichten. Zwar waren schädliche Auswirkungen bei hohen Strahlungsintensitäten allgemein anerkannt, für niedrige NIS-Belastungen war die wissenschaftliche Basis für eine Risikoanalyse jedoch ungenügend. Der Bundesrat hat sich damals entschlossen, bei der Festlegung der Immissionsgrenzwerte im Einklang mit internationalen Organisationen nur die wissenschaftlich allgemein anerkannten Schädigungen zu berücksichtigen.

Der Bundesrat hat es damit jedoch nicht bewenden lassen. Im Sinne der Vorsorge hat er festgelegt, dass die Strahlung dort, wo sich Menschen lange Zeit aufhalten, strenger begrenzt wird, nämlich so weit, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. Diesen Grundsatz hat er in Form von so genannten Anlagegrenzwerten in der NISV konkretisiert. Im Wohnbereich, an Arbeitsplätzen, auf Kinderspielflächen und an weiteren Orten wird dadurch die Strahlung von Sendeanlagen rund zehnmal strenger begrenzt als durch die Immissionsgrenzwerte allein.

Die Erforschung der biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von NIS geht weiter. Mit dem vorliegenden Bericht dokumentiert das BUWAL den Stand der NIS-Forschung im Hochfrequenzbereich per Ende 2002. Das Ergebnis ist ernüchternd: Auch drei Jahre nach Inkrafttreten der NISV ist die Datenlage für eine Beurteilung der Gesundheitsrisiken durch Hochfrequenzstrahlung nicht wesentlich besser geworden. Positiv ist, dass nach streng wissenschaftlichen Massstäben keine neuen Gesundheitsrisiken unterhalb der Immissionsgrenzwerte nachgewiesen wurden. Weiterhin Anlass zu Sorge geben jedoch Hinweise – nicht Beweise – auf eine Gefährdung der Gesundheit und eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens bei NIS-Belastungen unterhalb der Immissionsgrenzwerte, teilweise bis hinunter in den Bereich der Anlagegrenzwerte.

Um diese Hinweise zu ordnen, wird im vorliegenden Bericht ein neuer Weg beschritten: Untersuchungsergebnisse werden nicht mehr wie bisher lediglich als ‚nachgewiesene Gesundheitsgefährdung‘ versus ‚nicht nachgewiesene Gesundheitsgefährdung‘ klassiert. Neu wird nach einem differenzierten Schema bewertet, ob ein beobachteter Effekt sicher, wahrscheinlich oder nur möglicherweise auf die hochfrequente Strahlung zurückzuführen ist und wie bedeutsam ein solcher Effekt für die Gesundheit oder das Wohlbefinden des Menschen ist. Die Diskussion, ob und wie die als ‚möglich‘ oder ‚wahrscheinlich‘ eingestuftten Gesundheitseffekte bei der Grenzwertfestlegung künftig zu berücksichtigen sind, muss erst noch ge-

führt werden. Der vorliegende Bericht liefert dazu die wissenschaftlich begründete Auslegeordnung.

Eine Garantie, dass die Grenzwerte der NISV für Hochfrequenzstrahlung – sowohl Immissions- als auch Anlagegrenzwerte – den vom Umweltschutzgesetz geforderten Schutz mit Sicherheit gewährleisten, kann auch heute niemand abgeben. Eine konsequente Fortführung der vorsorglichen Begrenzung von NIS-Belastungen ist daher unbedingt angezeigt.

Gerhard Leutert
Chef der Abteilung
Luftreinhaltung und NIS

Zusammenfassung

Hauptziel dieses Berichtes ist die Beurteilung des Gesundheitsrisikos durch hochfrequente nichtionisierende Strahlung im Niedrigdosisbereich nach dem heutigem Stand der Wissenschaft. Als Niedrigdosisbereich gilt der Intensitätsbereich unterhalb der Immissionsgrenzwerte der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) bzw. bei Mobiltelefonen der Bereich unterhalb des von der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) empfohlenen Grenzwertes für die lokale spezifische Absorptionsrate. Die thermischen Wirkungen sind hinreichend bekannt und werden im vorliegenden Bericht nicht behandelt.

Als Basis für die Literaturrecherche wurden ausschliesslich wissenschaftliche Studien an Menschen herangezogen. Bei den über 200 berücksichtigten Arbeiten handelt es sich um experimentelle und epidemiologische Studien sowie um Publikationen zur Exposition, Dosimetrie, zu technischen Hintergründen und Grenzwertfestlegungen. Sie wurden in einschlägigen Literaturdatenbanken mit standardisierten Suchkriterien gesucht. Die Vollständigkeit der Literaturrecherche wurde anhand von Übersichtsberichten und Übersichtsartikeln überprüft.

Für jede bisher untersuchte biologische Wirkung im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber nichtionisierender Strahlung wurde auf der Basis aller zum jeweiligen Effekt verfügbaren Studien die **Evidenz** für das Vorhandensein des Effektes auf einer differenzierten fünfstufigen Skala wie folgt bewertet:

- **Gesichert:** Ein Effekt wird als gesichert erachtet, wenn er einer streng wissenschaftlichen Beweisführung standhält, d.h. mehrfach unabhängig repliziert worden ist, ein plausibles Wirkungsmodell besteht und er nicht im Widerspruch zu anderen Forschungsergebnissen steht.
- **Wahrscheinlich:** Ein Effekt wird als wahrscheinlich klassiert, wenn er mehrfach relativ konsistent und unabhängig festgestellt wurde. Die Qualität der Studien ist so weit überzeugend, dass andere Faktoren mit grosser Sicherheit ausgeschlossen werden können. Ein plausibler Wirkungsmechanismus fehlt.
- **Möglich:** Als möglich werden Effekte erachtet, die vereinzelt in Studien beobachtet wurden. Die Ergebnisse sind insgesamt jedoch nicht konsistent und sind möglicherweise auf methodische Schwächen in den Studien zurückzuführen. Die wissenschaftlichen Hinweise werden durch Einzelfallberichte gestützt.
- **Unwahrscheinlich:** Es gibt keine Hinweise für eine Assoziation, aber mehrfache Hinweise für deren Abwesenheit. Es bestehen keine theoretisch plausiblen Wirkungsmodelle.
- **Nicht beurteilbar:** Die Datenlage ist zu spärlich für eine Aussage. Es gibt zuweilen Einzelbefunde, häufig auch kontroverse Resultate. Die Methodik der jeweiligen Studien wird als zu wenig genügend bewertet, um daraus Folgerungen abzuleiten.

Des Weiteren wurden die bisher untersuchten Wirkungen bezüglich ihrer **Gesundheitsrelevanz** in drei Gruppen klassiert:

- **Gravierend:** Der Effekt stellt eine drastische Einschränkung der Lebensqualität dar. Er ist lebensbedrohlich und reduziert die Lebenserwartung. Diese Kategorie

umfasst alle Krebserkrankungen, genotoxische Effekte, Aborte und Missbildungen bei Säuglingen sowie erhöhte Mortalität.

- **Einschränkung des Wohlbefindens:** Die Lebensqualität bzw. das Wohlbefinden sind erheblich eingeschränkt. Das Symptom ist nicht direkt lebensbedrohlich. Unter diese Kategorie fallen unspezifische Gesundheitssymptome, insbesondere Kopfschmerzen, Schlafstörungen, psychisches Befinden, elektromagnetische Hypersensibilität sowie Mikrowellen-Hören.
- **Nicht beurteilbar:** Die Effekte sind physiologisch messbar. Die beobachteten Veränderungen bewegen sich in der normalen Bandbreite gesunder Menschen. Sie sind per se kein Gesundheitsrisiko und stellen keine Beeinträchtigung der Lebensqualität dar, da sie in der Regel nicht wahrgenommen werden können. Es ist unklar, ob sie längerfristig zu einem Gesundheitsrisiko führen. Zu dieser Gruppe gehören Schwankungen im Hormon-, Immun- und Herzkreislaufsystem, Veränderungen im EEG sowie veränderte Reizwahrnehmung und Reizverarbeitung.

Für Effekte, die als gesichert, wahrscheinlich oder möglich eingestuft werden, wurde aus den vorliegenden Studienergebnissen eine untere Expositionsschwelle für deren Auftreten abgeschätzt. Damit die Studien zu Mobiltelefonen und stationären Sendeanlagen überhaupt verglichen werden können, mussten die unterschiedlichen Dosismasse vereinheitlicht werden. Als gemeinsames Dosismasse wurde die maximale SAR₁₀ verwendet. Diese Grösse gibt an, wieviel Strahlung im Körper kleinräumig an der höchstbelasteten Stelle absorbiert wird (lokale spezifische Absorptionsrate, gemittelt über 10 g Körpergewebe, in W/kg). Die SAR₁₀ ist in einigen Untersuchungsberichten direkt verfügbar, in den übrigen wurde sie näherungsweise abgeschätzt.

Eine Zusammenstellung der Bewertung findet sich in Tabelle 1. Es gibt nur wenige Wirkungen im Niedrigdosisbereich, die als **gesichert** gelten. Es ist unbestritten, dass Hochfrequenzstrahlung die Funktion technischer Geräte beeinträchtigen kann. Gesundheitliche Folgen kann dies insbesondere bei medizinischen Implantaten (z.B. Herzschrittmachern, Hörimplantaten) haben. Konsistent nachgewiesen wurde auch die Wahrnehmung von Geräuschen (Mikrowellen-Hören), wenn bei gepulster Strahlung eine gewisse Energie pro Puls überschritten wird. Bei Radaranlagen kann dieses Phänomen auch bei Einhaltung der Immissionsgrenzwerte auftreten; bei der GSM-Mobilfunkstrahlung gibt es dafür jedoch keinerlei Hinweise. Ebenfalls als erwiesen gilt, dass das Unfallrisiko erhöht ist, wenn beim Autofahren telefoniert wird, unabhängig davon, ob eine Freisprechanlage benutzt wird oder nicht. Dies ist jedoch nicht eine Folge der Strahlung, sondern der Ablenkung.

Es wird als **wahrscheinlich** erachtet, dass die Exposition gegenüber einem Mobiltelefon die Reaktionszeiten tendenziell verkürzt und die Hirnströme verändert. Am konsistentesten wurde eine Amplitudenerhöhung im alpha-Band der Hirnströme beobachtet. Schlafphasen, die von den Messungen der Hirnströme abgeleitet wurden, waren bei Exposition gegenüber einem Mobiltelefon in mehreren Studien verändert. Die Effekte traten bei so tiefen Strahlungsintensitäten auf, dass sie nicht mit

dem konventionellen thermischen Wirkungsmodell erklärbar sind. Mehrfach nachgewiesen wurde auch eine Zunahme von unspezifischen Symptomen bei häufiger Nutzung des Mobiltelefons. Dazu gehören Kopfschmerzen, Schmerzempfinden, Unbehagen, Müdigkeit, Schwindel und Brennen auf der Haut. Ob und inwiefern auch andere Einflüsse als die Strahlung zu diesen Befunden beigetragen haben, kann mit den vorliegenden Studien nicht beurteilt werden. Möglich wäre, dass mobiles Telefonieren infolge schlechter Verbindungsqualität häufig als anstrengend erlebt wird, oder dass Mobiltelefonbenützer unspezifische Symptome (insbesondere Kopfschmerzen) nach dem Telefongebrauch selektiv anders wahrnehmen als Personen, die keine Mobiltelefone benutzen. Allenfalls sind die Symptome stressbedingt, und der häufige Mobiltelefongebrauch ist lediglich ein Indikator für das erhöhte Stressniveau einer Person.

Es gibt einige Studien, die in der Umgebung von TV- und Radiosendern höhere Leukämie- und/oder Lymphomraten beobachteten als erwartet. Die Studienresultate sind jedoch nicht einheitlich, und manche Studien haben methodische Mängel. Eine Erhöhung des Risikos für die genannten Krebsarten wird daher nur als **möglich**, nicht als wahrscheinlich, erachtet. Ebenfalls möglich erscheint ein erhöhtes Hirntumorrisiko im Zusammenhang mit dem Gebrauch von Mobiltelefonen. Plausible Einzelbefunde gibt es des Weiteren zur elektromagnetischen Hypersensibilität gegenüber hochfrequenter Strahlung und zu Schlafstörungen in der Umgebung von Sendeanlagen.

Kein Einfluss der niedrigdosierten Hochfrequenzstrahlung wurde bisher auf die Gesamtmortalität und alle in der Tabelle 1 nicht explizit erwähnten Tumorarten gefunden. Diese Effekte sind daher als **unwahrscheinlich** zu betrachten.

Für viele weitere gesundheitliche Folgen der niedrigdosierten Hochfrequenzstrahlung ist die wissenschaftliche Basis für eine Beurteilung zu gering. Dazu gehören Einflüsse auf das Hormon-, Immun- und Herz-Kreislaufsystem, das psychische Befinden, vermehrte Fehlgeburten, Genotoxizität sowie Brust-, Augen und Hodentumore.

Die wissenschaftliche Literatur wurde zusätzlich unter dem Gesichtspunkt analysiert, ob es Hinweise gibt, dass gewisse Strahlungscharakteristiken biologisch besonders wirksam sind. Das könnten beispielsweise eine bestimmte Modulation (z.B. Pulsierung), die Frequenz oder Polarisation sein. Diesbezügliche Hinweise sind spärlich und widersprüchlich. Eine experimentelle Studie, die den Einfluss der Strahlungscharakteristik auf Hirnströme systematisch untersuchte, ergab für gepulste Strahlung einen grösseren Effekt als für kontinuierliche Strahlung. Epidemiologische Studien fanden hingegen tendenziell einen stärkeren Zusammenhang für die Benützung von analogen (nicht gepulsten) Telefonen im Vergleich zu derjenigen von digitalen (gepulsten) Telefonen.

Schlussfolgerungen: Die wissenschaftliche Datenlage für die Beurteilung der Gesundheitsgefährdung der Bevölkerung durch hochfrequente nichtionisierende Strah-

lung im Niedrigdosisbereich ist unbefriedigend. Langzeitstudien an Menschen in ihrer natürlichen Umgebung gibt es nur wenige. Bisher wurde erst eine wissenschaftliche Studie zu Gesundheitseffekten bei Menschen publiziert, die in der Nähe von Mobilfunkbasisstationen wohnen; diese Studie genügt allerdings minimalsten wissenschaftlichen Anforderungen nicht. Experimentelle Studien belegen unmittelbare Wirkungen der Hochfrequenzstrahlung, die nicht mit dem Erwärmungsansatz erklärt werden können.

Beim derzeitigen Stand der Kenntnisse lassen sich folgende vorläufigen Schlussfolgerungen ziehen:

- Neue **gesicherte** gesundheitliche Effekte im Dosisbereich unterhalb der von der ICNIRP empfohlenen Grenzwerte und damit auch unterhalb der Immissionsgrenzwerte der NISV liegen nicht vor.
- Im Zusammenhang mit der Exposition durch Mobiltelefone sind einige Effekte als **wahrscheinlich** zu betrachten. Es handelt sich in erster Linie um Effekte, deren Gesundheitsrelevanz unklar ist. Sie treten bei einer lokalen SAR₁₀ im Bereich von 20 mW/kg bis 2 W/kg, und somit unterhalb des von der ICNIRP empfohlenen Grenzwertes von 2 W/kg auf. Eine grobe Abschätzung ergibt, dass die Strahlung von stationären Sendeanlagen eine Intensität im Bereich zwischen dem schweizerischen Anlagegrenzwert und dem Immissionsgrenzwert aufweisen müsste, um eine vergleichbare SAR₁₀ zu erzeugen. Dies lässt den generellen Schluss zu, dass die bei der Exposition durch Mobiltelefone als wahrscheinlich eingestuften Effekte unterhalb der schweizerischen Anlagegrenzwerte nicht zu erwarten sind.
- Effekte, die nur als **möglich** eingestuft werden, gibt es sowohl im Zusammenhang mit Mobiltelefonen als auch mit Rundfunksendern. Für die Strahlung von Mobiltelefonen liegt die Expositionsschwelle im gleichen Bereich wie oben beschrieben (SAR₁₀ zwischen 20 mW/kg und 2 W/kg), für die Strahlung von Rundfunksendern bei einer Feldstärke im Bereich des schweizerischen Anlagegrenzwertes.
- Es liegt eine Vielzahl von wissenschaftlich beobachteten Effekten vor, bei denen zur Zeit **nicht beurteilt** werden kann, ob sie kausal auf die Strahlung zurückzuführen sind. Einige dieser Effekte beinhalten ein gravierendes gesundheitliches Potenzial, bei anderen ist diese Frage offen.

Angesichts dieser Hinweise kann nicht abschliessend beurteilt werden, ob die Grenzwerte der ICNIRP und die darauf basierenden Immissionsgrenzwerte der NISV vor langfristigen Schäden genügend Schutz bieten. Dies gilt auch für Expositionen im Bereich der Anlagegrenzwerte der NISV, bestehen doch auch in diesem Dosisbereich noch Hinweise auf mögliche Wirkungen mit gesundheitlicher Relevanz. Aus wissenschaftlicher Sicht sind daher weiterhin ein vorsorgeorientierter Ansatz im Umgang mit nichtionisierender Strahlung und eine Verstärkung der Forschung erforderlich.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Evidenz für gesundheitliche Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung im Niedrigdosisbereich. Angaben zur Expositionsschwelle in mW/kg oder W/kg sind als grobe Anhaltspunkte zu verstehen. Sie beziehen sich auf die im Körper maximal auftretende lokale spezifische Absorptionsrate SAR₁₀.

EVIDENZ	WIRKUNG			EXPOSITIONS-QUELLE	EXPOSITIONS-SCHWELLE
	Gravierend	Einschränkung des Wohlbefindens	Gesundheitsrelevanz unklar		
Gesichert (konsistente Befunde)		Interferenz bei Implantaten		Elektronische Geräte (z.B. Mobiltelefon)	
		Mikrowellen-Hören		Radaranlagen	Energieflussdichte pro Puls >20 mJ/m ²
Wahrscheinlich (mehrfache Hinweise auf Effekte)			Hirnströme	Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
			Beschleunigte Reaktionszeiten	Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
		Unspezifische Symptome (Kopfschmerzen, Müdigkeit, Konzentrations-schwierigkeiten, Unbehagen, brennende Haut, etc.)		Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
			Schlafphasen	Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
Möglich (einzelne Hinweise auf Effekte)		Schlafqualität		Radiosender	im Bereich des Anlagengrenzwertes
		Elektromagnetische Hypersensibilität		Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
	Leukämien/ Lymphome			TV-/Radiosender	im Bereich des Anlagengrenzwertes
	Hirntumore			Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
Unwahrscheinlich (mehrfache Hinweise auf Abwesenheit)	Mortalität			Mobiltelefon	
	weitere Tumortypen			Diverse	
Nicht beurteilbar (wenig Daten)			Hormonsystem	Diverse	
			Immunsystem	Diverse	
			Bluthochdruck, Pulsvariabilität, Elektrokardiogramm	Radiosender	
		Psychisches Befinden		Diverse	
		Unspezifische Symptome (Schlafstörungen, Kopfschmerzen, etc.)		Mobilfunkbasisstation	
	Abort			Diathermiegeräte	
	Genotoxizität			Berufliche Exposition	
	Brustkrebs			Diverse	
	Augentumore			Mobiltelefon	
	Hodentumore			Radarpistolen	

Résumé

L'objectif principal du présent rapport réside dans l'évaluation, en fonction des connaissances scientifiques actuelles, du risque sanitaire engendré par l'exposition au rayonnement non ionisant à haute fréquence de faible intensité. Par faible intensité, on entend des intensités inférieures aux valeurs limites d'immission de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) ou, pour les téléphones mobiles, inférieures à la valeur limite du taux d'absorption spécifique local, recommandée par la Commission internationale pour la protection contre le rayonnement non ionisant (ICNIRP). Les effets thermiques sont suffisamment connus et ne sont pas traités dans le présent rapport.

La recherche bibliographique a exclusivement pris en compte les études scientifiques portant sur l'homme. Les travaux retenus, plus de 200, sont des études expérimentales et épidémiologiques ainsi que des publications relatives à l'exposition, à la dosimétrie, aux données techniques et à la fixation de valeurs limites. Ils ont été recherchés dans des bases de données bibliographiques spécialisées au moyen de critères de recherche standards. Le caractère exhaustif de la recherche a été vérifié grâce à des articles de synthèse.

L'existence de chaque effet biologique étudié par rapport à une exposition au rayonnement non ionisant a été évaluée au moyen d'une échelle à cinq niveaux, en tenant compte de toutes les études faites en relation avec ledit effet:

- **Prouvée:** un effet est considéré comme prouvé lorsqu'il peut être démontré de manière scientifique, c'est-à-dire s'il est reproductible de manière indépendante, s'il existe un modèle d'interaction plausible et s'il n'est pas en contradiction avec d'autres données scientifiques.
- **Probable:** un effet est considéré comme probable lorsqu'il a été constaté à plusieurs reprises, de manière relativement cohérente et indépendante. La qualité de l'étude est telle que d'autres facteurs peuvent être exclus avec une assez grande certitude. Il n'existe pas de modèle d'interaction plausible.
- **Possible:** les effets sont considérés comme possibles lorsqu'ils ont été observés de manière sporadique dans les études. Les résultats ne sont cependant pas cohérents dans leur globalité et peuvent peut-être provenir d'insuffisances méthodologiques des études. Les données scientifiques sont corroborées par des rapports de cas.
- **Improbable:** il n'existe pas d'indications relatives à une association mais plusieurs indications relatives à son absence. Il n'existe pas de modèles d'interaction théoriquement plausibles.
- **Non évaluable:** la quantité de données disponibles est insuffisante pour permettre une évaluation. Il existe quelques résultats, souvent controversés. La méthodologie des études correspondantes est jugée insuffisante pour pouvoir en tirer des conclusions.

Par ailleurs, les effets examinés ont été classés en trois groupes en fonction de leur **impact sanitaire**:

- **Sérieux:** l'effet représente une limitation radicale de la qualité de vie. Il est délétère et réduit l'espérance de vie. Cette catégorie comprend les maladies cancé-

reuses, les effets génotoxiques, les avortements et les malformations des nouveaux-nés ainsi qu'une augmentation de la mortalité.

- **Limitation du bien-être:** la qualité de vie ou le bien-être sont fortement limités. Le symptôme n'est pas directement délétère. Font partie de cette catégorie les symptômes de maladies non spécifiques, en particulier les maux de tête, les troubles du sommeil, l'état psychique, l'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques ainsi que les sensations auditives liées aux micro-ondes.
- **Non évaluable:** les effets sont mesurables du point de vue physiologique. Les changements observés se situent dans le cadre des réponses « adaptatives » des personnes en bonne santé. Ils ne présentent pas de risque sanitaire en eux-mêmes et ne restreignent pas la qualité de vie car, en général, ils sont imperceptibles. On ignore s'ils représentent un risque sanitaire à long terme. Font partie de ce groupe les fluctuations des systèmes hormonal, immunitaire et circulatoire, les variations de l'EEG ainsi que les changements dans la perception et le traitement des stimulations externes.

L'exposition minimale nécessaire à l'apparition d'un effet a été estimée, sur la base des résultats des études, pour chacun des effets classés comme prouvés, probables ou possibles. Afin de pouvoir comparer les études relatives aux téléphones mobiles et aux installations émettrices stationnaires, il a fallu unifier les différentes indications dosimétriques. Ce faisant, on a choisi d'exprimer les doses par le TAS₁₀ maximal (en anglais SAR₁₀). Cette grandeur indique la quantité de rayonnement localement absorbée par l'organisme à l'endroit le plus exposé (taux d'absorption spécifique local moyenné sur 10 grammes de tissu organique, en W/kg). Le TAS₁₀ figure dans certaines études, pour les autres il a été estimé.

Le Tableau 2 présente un résumé de l'évaluation. Il n'existe que quelques rares effets pouvant être considérés comme **prouvés** dans le domaine des faibles intensités. Il est incontestable que le rayonnement à haute fréquence peut perturber le fonctionnement d'appareils techniques, ce qui peut avoir des conséquences sur la santé, en particulier dans le cas d'implants médicaux (p.ex. stimulateur cardiaque, implants auditifs). Il a également été prouvé que des sensations auditives anormales liées aux micro-ondes pulsés apparaissent lorsque les impulsions du rayonnement dépassent un certain seuil énergétique. Dans le cas des installations radar, ce phénomène peut apparaître même lorsque les valeurs limites d'immission sont respectées; pour ce qui est du rayonnement de la téléphonie mobile GSM, il n'existe toutefois aucune sorte d'indice. Par ailleurs, on considère comme prouvé que le risque d'accident augmente lorsqu'on téléphone en conduisant, indépendamment du fait qu'on utilise une installation « mains libres » ou non. Ce risque n'est cependant pas dû au rayonnement mais à la distraction.

Il est considéré comme **probable** que l'exposition au téléphone mobile réduise les temps de réaction et modifie l'activité électrique du cerveau. L'élément le plus probant qui a pu être constaté consiste en une élévation de l'amplitude dans la bande alpha de l'EEG. Dans diverses études, les phases de sommeil déduites de l'EEG apparaissent modifiées suite à l'exposition à un téléphone mobile. Les effets sont

apparus à des intensités de rayonnement si faibles qu'ils ne peuvent pas être expliqués par le modèle d'action thermique conventionnel. Il a également été démontré à diverses reprises qu'une utilisation fréquente du téléphone mobile provoquait une augmentation de symptômes non spécifiques comme les maux de tête, la sensibilité à la douleur, les malaises, la sensation de fatigue, les vertiges, les échauffements de la peau. Les présentes études ne permettent pas de dire si et dans quelle mesure des facteurs autres que le rayonnement ont contribué à ces effets. On peut penser au fait que les téléphones mobiles sont souvent perçus comme fatigants lorsque la liaison est de mauvaise qualité ou que les utilisateurs de téléphones mobiles perçoivent les symptômes non spécifiques (en particulier les maux de tête) autrement que les personnes qui n'en utilisent pas. Peut-être les symptômes sont-ils dus au stress, l'utilisation fréquente du téléphone mobile étant simplement un indicateur du stress élevé d'une personne.

Certaines études ont révélé un taux de leucémies ou de lymphomes accru à proximité d'émetteurs de radio et de télévision. Les résultats des études ne sont cependant pas cohérents et certaines études présentent des insuffisances méthodologiques. L'augmentation du risque des cancers nommés est seulement considérée comme **possible** et non comme probable. Apparaît également comme possible un risque accru de tumeurs du cerveau associé à l'utilisation du téléphone mobile. Il existe en outre des résultats sporadiques plausibles en rapport avec l'hypersensibilité au rayonnement à haute fréquence et les troubles du sommeil dans les environs d'installations émettrices.

On n'a pas remarqué d'influence du rayonnement à haute fréquence de faible intensité sur la mortalité globale et tous les types de tumeurs non explicitement évoqués au Tableau 2. Les effets correspondants sont donc à considérer comme **improbables**.

Pour de nombreux autres effets sanitaires liés au rayonnement à haute fréquence de faible intensité, la base scientifique est trop restreinte pour permettre une évaluation. En font partie les influences sur les systèmes hormonal, immunitaire et circulatoire, l'état psychique, les avortements répétés, la génotoxicité ainsi que les tumeurs du sein, des yeux et des testicules.

L'analyse de la littérature scientifique a en outre été effectuée dans le but de voir si des effets biologiques pouvaient être liés à certaines caractéristiques du rayonnement, comme une modulation donnée (p.ex. le mode pulsé), la fréquence ou la polarisation. Les données y relatives sont rares et contradictoires. Une étude expérimentale ayant analysé systématiquement l'influence des caractéristiques du rayonnement sur l'activité électrique du cerveau a montré que l'effet était plus grand dans le cas du rayonnement pulsé que dans celui du rayonnement continu. Des études épidémiologiques ont en revanche mis en évidence que l'association tendait à croître avec des téléphones analogiques (non pulsés) plutôt qu'avec des téléphones digitaux (pulsés).

Conclusions: les données scientifiques permettant d'évaluer le risque sanitaire pour la population engendré par le rayonnement non ionisant à haute fréquence de faible intensité sont insuffisantes. Les études longue durée portant sur l'homme dans son environnement naturel sont peu nombreuses. Jusqu'ici une seule étude scientifique portant sur les effets exercés sur des personnes habitant à proximité de stations de base de téléphonie mobile a été publiée; cette étude ne remplit toutefois pas les exigences scientifiques minimales. Des études expérimentales montrent que le rayonnement à haute fréquence exerce des effets directs, ne pouvant pas être expliqués par le modèle thermique.

En l'état actuel des connaissances on peut tirer les conclusions provisoires suivantes:

- Il n'existe pas de nouveaux effets sanitaires dont l'existence est **prouvée** aux intensités inférieures aux valeurs limites recommandées par l'ICNIRP et donc aussi inférieures aux valeurs limites d'immission de l'ORNI.
- Certains effets associés à l'exposition aux téléphones mobiles sont à considérer comme **probables**. Il s'agit, en premier lieu, d'effets dont l'impact sanitaire n'a pas pu être éclaircie. Ils apparaissent pour des valeurs du TAS₁₀ situées entre 20 mW/kg et 2 W/kg, et donc à des valeurs inférieures au taux fixé par l'ICNIRP, qui est de 2 W/kg. Une estimation approximative conduit à admettre que le rayonnement provenant des stations émettrices stationnaires devrait avoir une intensité située entre la valeur limite de l'installation, en vigueur en Suisse et la valeur limite d'immission pour produire un TAS₁₀ comparable. On peut en conclure qu'il n'y a pas lieu de craindre des effets considérés comme probables de l'exposition aux téléphones mobiles, lorsque les intensités sont inférieures aux valeurs limites de l'installation, en vigueur en Suisse.
- Les effets qui ne sont considérés que comme **possibles** existent tant avec les téléphones mobiles qu'avec les émetteurs radio. Dans le cas du rayonnement des téléphones mobiles, le seuil d'exposition se situe dans le même domaine que celui cité plus haut (TAS₁₀ entre 20 mW/kg et 2 W/kg) et, en rapport avec le rayonnement des émetteurs radio, il se situe à une intensité de champ proche de la valeur limite de l'installation, en vigueur en Suisse.
- Pour de nombreux effets scientifiquement observés le lien de causalité avec le rayonnement **ne peut être établi** à ce jour. Certains de ces effets renferment un important potentiel sanitaire, pour d'autres la question reste ouverte.

Compte tenu de ces informations, il n'est pas possible de conclure que les valeurs limites de l'ICNIRP et les valeurs limites d'immission de l'ORNI, fondées sur les précédentes, offrent une protection suffisante contre les atteintes à long terme. Cela vaut également pour les expositions aux intensités proches des valeurs limites de l'installation de l'ORNI, car il existe également des indications relatives à des risques sanitaires potentiels pour ces intensités-là. D'un point de vue scientifique, il convient donc de maintenir le principe de précaution en matière de rayonnement non ionisant et d'accentuer la recherche.

Tableau 2: Résumé de l'évidence pour des effets sanitaires engendrés par le rayonnement à haute fréquence de faible intensité. Les données relatives au seuil d'exposition, exprimées en mW/kg ou W/kg, sont à considérer comme approximatives. Elles se réfèrent au taux d'absorption spécifique local maximal TAS₁₀.

EXISTENCE	EFFET			SOURCE D'EXPOSITION	SEUIL D'EXPOSITION
	Sérieux	Limitation du bien-être	Impact sanitaire peu clair		
Prouvée (résultats cohérents)		Interférences avec les implants		Appareils électroniques (p. ex. téléphone mobile)	
		Sensations auditives liées aux micro-ondes		Installations radar	Densité de flux énergétique par impulsion >20 mJ/m ²
Probable (effets mentionnés à diverses reprises)			Activité électrique du cerveau	Téléphone mobile	20 mW/kg–2 W/kg
			Temps de réaction accélérés	Téléphone mobile	20 mW/kg–2 W/kg
		Symptômes non spécifiques (maux de tête, sensation de fatigue, pertes de concentration, malaises, échauffements de la peau, etc.)		Téléphone mobile	20 mW/kg–2 W/kg
			Phases de sommeil	Téléphone mobile	20 mW/kg–2 W/kg
Possible (effets mentionnés sporadiquement)		Qualité du sommeil		Emetteur radio	voisin de la valeur limite de l'installation
		Hypersensibilité aux ondes électromagnétiques		Téléphone mobile	20 mW/kg–2 W/kg
	Leucémies / Lymphomes			Emetteur TV/ radio	voisin de la valeur limite de l'installation
	Tumeurs du cerveau			Téléphone mobile	20 mW/kg–2 W/kg
Improbable (absence mentionnée à diverses reprises)	Mortalité			Téléphone mobile	
	Autres types de tumeurs			Diverses	
Non évaluable (données peu nombreuses)			Système hormonal	Diverses	
			Système immunitaire	Diverses	
			Hypertension, pouls instable, électrocardiogramme	Emetteur radio	
		Etat psychique		Diverses	
		Symptômes non spécifiques (troubles du sommeil, maux de tête, etc.)		Stations de base de téléphonie mobile	
	Avortement			Appareils diathermiques	
	Génotoxicité			Exposition professionnelle	
	Cancer du sein			Diverses	
	Tumeurs oculaires			Téléphone mobile	
	Tumeurs des testicules			Pistolets radar	

Riassunto

Il presente rapporto ha come obiettivo principale di effettuare una valutazione allo stato delle conoscenze scientifiche attuali del rischio per la salute veicolato dalle radiazioni non ionizzanti ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli. Per intervallo delle dosi deboli si intende l'intervallo di intensità inferiore ai valori limite di immissione dell'ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI) oppure, nel caso dei telefoni cellulari l'intervallo di intensità inferiore al valore limite per il tasso di assorbimento specifico locale, raccomandato dalla Commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP). Per contro, il presente rapporto non tratta gli effetti termici già noti.

Quale base per la ricerca bibliografica sono state utilizzate esclusivamente indagini scientifiche condotte su persone. Gli oltre 200 lavori presi in considerazione comprendono studi sperimentali e epidemiologici nonché pubblicazioni concernenti l'esposizione, la dosimetria, il contesto tecnico e le determinazioni dei valori limite. La loro ricerca è stata effettuata nelle banche dati bibliografiche del settore utilizzando dei criteri di ricerca standardizzati. La completezza della ricerca bibliografica è stata verificata sulla scorta di rapporti e articoli sinottici.

Per ogni effetto biologico esaminato finora in relazione con l'esposizione alle radiazioni non ionizzanti, l'**evidenza** della sua esistenza è stata valutata come segue sulla base di tutti gli studi disponibili per un determinato effetto, utilizzando una scala differenziata a cinque livelli:

- **sicura**: un effetto viene considerato sicuro se regge a una argomentazione rigorosamente scientifica, vale a dire se è stato riprodotto più volte in maniera indipendente, se ne esiste un modello plausibile e se non è in contraddizione con i risultati di altre ricerche;
- **probabile**: un effetto viene classificato come probabile, se è stato riscontrato più volte in modo relativamente coerente e indipendente. La qualità delle indagini è talmente convincente da potere escludere con sicurezza altri fattori. Manca infatti un meccanismo di azione plausibile;
- **possibile**: vengono considerati possibili gli effetti che sono stati osservati in studi isolati. Nel loro insieme i risultati non sono però coerenti e sono probabilmente da far risalire alle carenze metodologiche degli studi in questione. Le indicazioni scientifiche sono sostenute da rapporti concernenti casi singoli;
- **improbabile**: non vi è nessuna indicazione che consenta una associazione, bensì parecchie indicazioni della loro assenza. Non esiste nessun modello teorico plausibile dell'effetto;
- **non valutabile**: i dati a disposizione sono troppo scarsi per poter essere interpretati. A volte ci sono delle perizie singole, spesso anche dei risultati contestati. La metodica dei rispettivi studi è stata valutata e ritenuta insufficiente per poter trarre delle conclusioni.

Gli effetti esaminati finora vengono inoltre classificati in tre gruppi a seconda della loro **rilevanza per la salute**:

- **grave**: l'effetto costituisce una limitazione drastica della qualità della vita. Esso costituisce una minaccia per la vita e ne riduce la durata probabile. Questa cate-

goria comprende tutte le malattie cancerose, gli effetti genotossici, gli aborti spontanei e le malformazioni nei neonati nonché la mortalità elevata;

- **limitazione del benessere fisico:** la qualità della vita e il benessere sono considerevolmente limitati. Il sintomo non costituisce una minaccia diretta per la vita. Rientrano in questa categoria i sintomi non specifici di malattie, specialmente le cefalee, i disturbi del sonno, le condizioni di salute psichica, l'ipersensibilità alle radiazioni elettromagnetiche nonché l'effetto uditivo delle microonde;
- **non valutabile:** gli effetti sono misurabili fisiologicamente. Le variazioni osservate si situano nella banda delle fluttuazioni normali per una persona sana. Di per sé non sono un rischio per la salute e non costituiscono una riduzione della qualità della vita, poiché normalmente non possono essere percepite. Non è accertato se a lungo termine esse possano rappresentare un rischio per la qualità della vita. Fanno parte di questo gruppo le fluttuazioni nel sistema ormonale, immunitario e cardiovascolare, le variazioni nell'EEG come pure la variazione nella percezione degli stimoli e nella loro elaborazione.

Per effetti considerati sicuri, probabili o possibili, è stata valutata una soglia inferiore di esposizione sulla base dei risultati ottenuti. Per potere almeno paragonare tra loro gli studi concernenti i telefoni cellulari e quelli relativi agli impianti di trasmissione stazionari, si è dovuto uniformare le differenti misure della dose. Quale misura comune della dose è stato impiegato il SAR₁₀ massimo. Questa grandezza indica quanta radiazione viene assorbita dal corpo nella zona più esposta (tasso di assorbimento specifico locale, valore medio su 10 g di tessuto corporeo, in W/kg). Nei rapporti di alcuni studi il SAR₁₀ è disponibile direttamente, negli altri è stato stimato approssimativamente.

La tabella 4 riassume i parametri della valutazione. Nell'intervallo delle dosi deboli solo pochi effetti vengono considerati **sicuri**. È indubbio che le radiazioni ad alta frequenza possano pregiudicare il funzionamento di apparecchi tecnici. Ciò può avere ripercussioni sulla salute, in particolare nel caso di dispositivi medici impiantati nel corpo umano (p.es. pace-maker, protesi auditive). Dimostrata in modo coerente è stata anche la percezione di rumori (effetto uditivo delle microonde), quando nel caso di radiazioni pulsate viene superata una determinata quantità di energia per impulso. Nel caso di impianti radar questo fenomeno può verificarsi anche se vengono rispettati i valori limite di immissione, mentre per le radiazioni prodotte dalla telefonia cellulare GSM non vi sono indicazioni in tal senso. È assodato che telefonare al volante comporta un elevato rischio di incidenti, indipendentemente dal fatto che venga o meno utilizzato un dispositivo che lasci le mani libere. Tuttavia ciò non è una conseguenza delle radiazioni bensì del fatto di essere distratti al volante.

Si ritiene **probabile** che l'esposizione alle radiazioni emesse da un telefono cellulare riduca tendenzialmente i tempi di reazione e modifichi le correnti cerebrali. L'aumento dell'amplitudine nella banda alfa delle correnti cerebrali è stato osservato in modo del tutto coerente. Parecchi studi hanno dimostrato che in seguito all'esposizione alle radiazioni emesse da un telefono cellulare le fasi di sonno, determinate misurando le correnti cerebrali, sono risultate modificate. Gli effetti si sono verificati a livelli di intensità di radiazione tanto bassi da non poter essere spiegati

con il modello convenzionale dell'effetto termico. Più volte dimostrato è stato anche l'aumento di sintomi non specifici in caso di utilizzazione frequente del telefono cellulare. Fanno parte di questi sintomi le cefalee, la sensazione di dolore, il malessere, la stanchezza, le vertigini e il bruciore della pelle. Sulla base degli studi disponibili non si può però valutare se e in quale misura anche altri influssi, diversi dalle radiazioni, abbiano contribuito a questi risultati. Potrebbe darsi che a causa della cattiva qualità del collegamento il fatto di telefonare con un cellulare venga spesso sentito come faticoso, oppure che, dopo aver telefonato, gli utenti del cellulare percepiscano selettivamente i sintomi non specifici (soprattutto le cefalee) in modo diverso rispetto alle persone che non utilizzano il telefono cellulare. Tutt'al più i sintomi potrebbero essere dovuti allo stress e il frequente impiego del telefono cellulare sarebbe semplicemente un indicatore dell'elevato livello di stress di una persona.

In alcune indagini si è riscontrato che nelle vicinanze di emittenti televisive e radiofoniche il tasso di leucemia e/o di linfomi è più elevato della norma. I risultati degli studi non sono però omogenei e parecchi di essi presentano carenze metodologiche. L'aumento del rischio per i tipi di cancro menzionati viene perciò considerato soltanto **possibile** e non probabile. Altrettanto possibile sembra essere l'aumento del rischio di tumori al cervello in relazione con l'utilizzazione di telefoni cellulari. Ci sono inoltre risultati isolati plausibili concernenti l'ipersensibilità alle radiazioni elettromagnetiche ad alta frequenza e i disturbi del sonno nelle vicinanze di impianti trasmettenti.

Finora non si è riscontrato nessun influsso delle radiazioni ad alta frequenza a basso dosaggio sulla mortalità globale e su tutti i tipi di tumori non ancora menzionati esplicitamente nella tabella 4. Questi effetti vanno perciò considerati **improbabili**.

Per molte altre conseguenze delle radiazioni ad alta frequenza a basso dosaggio sulla salute, la base scientifica per effettuare una valutazione è troppo scarsa. Rientrano in questa categoria gli influssi sul sistema ormonale, immunitario e cardiovascolare, le condizioni di salute psichica, l'aumento del numero di aborti spontanei, la genotossicità nonché i tumori al seno, agli occhi e ai testicoli.

La letteratura scientifica è stata inoltre esaminata per accertare se esistono indicazioni a sostegno dell'ipotesi secondo cui determinate caratteristiche delle radiazioni avrebbero effetti particolari a livello biologico. Queste proprietà potrebbero ad esempio essere una determinata modulazione (p.es. modulazione a impulsi), la frequenza o la polarizzazione. Le indicazioni in merito sono scarse e contraddittorie. Da uno studio sperimentale, che ha esaminato in modo sistematico l'influsso delle proprietà delle radiazioni sulle correnti cerebrali, risulta che le radiazioni pulsate hanno un effetto maggiore delle radiazioni continue. Gli studi epidemiologici hanno invece rivelato che tendenzialmente vi è un nesso maggiore tra gli effetti osservati e l'utilizzazione dei telefoni analogici (non pulsati) rispetto a quella dei telefoni digitali (pulsati).

Conclusioni: I dati scientifici a disposizione sono insufficienti per poter valutare il rischio per la salute occasionato alla popolazione dalle radiazioni non ionizzanti ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli. Ci sono solo pochi studi a lungo termine sull'uomo nel suo ambiente naturale. Finora è stato pubblicato soltanto uno studio scientifico concernente le ripercussioni sulla salute di persone che abitano nelle vicinanze di stazioni di base di telefonia mobile; questo studio non soddisfa però i requisiti minimi richiesti agli esperimenti scientifici. Gli studi sperimentali attestano che ci sono degli effetti immediati delle radiazioni ad alta frequenza che non possono essere spiegati solo imputandoli al riscaldamento.

Secondo lo stato attuale delle conoscenze si possono trarre le conclusioni provvisorie seguenti:

- nell'intervallo di dosi inferiori ai valori limite raccomandati dall'ICNIRP e quindi anche al di sotto dei valori limite di immissione dell'ORNI non si sono riscontrate nuove ripercussioni **sicure** sulla salute;
- in relazione con l'esposizione ai telefoni cellulari alcuni effetti devono essere considerati **probabili**. Si tratta in primo luogo però di effetti la cui rilevanza per la salute è dubbia. Si verificano se il SAR₁₀ locale è compreso tra i 20 mW/kg e i 2 W/kg, e quindi al di sotto del valore limite raccomandato dall'ICNIRP di 2 W/kg. Una valutazione approssimativa indica che, per generare un SAR₁₀ comparabile, le radiazioni degli impianti di trasmissione stazionari dovrebbero avere un'intensità compresa tra il valore limite svizzero dell'impianto e il valore limite di immissione. Ciò consente di trarre la conclusione generale che in presenza di radiazioni la cui intensità è inferiore al valore limite svizzero dell'impianto gli effetti considerati probabili in relazione con l'esposizione ai telefoni cellulari non si manifestano;
- sia in relazione con i telefoni cellulari sia con le emittenti radiofoniche esistono effetti classificati solo come **possibili**. Si tratta sia di ripercussioni gravi sulla salute sia di effetti che costituiscono una limitazione del benessere fisico. Per le radiazioni prodotte dai telefoni cellulari la soglia di esposizione è situata nello stesso intervallo summenzionato (SAR₁₀ compreso tra i 20 mW/kg e i 2 W/kg), per le radiazioni provenienti dalle emittenti radiofoniche essa corrisponde a un'intensità di campo prossima al valore limite svizzero dell'impianto;
- esiste una molteplicità di effetti osservati scientificamente, per i quali attualmente **non si può valutare** se sono causati o meno dalle radiazioni. Alcuni di questi effetti comprendono un gran potenziale di rischio per la salute, per altri la questione rimane insoluta.

Sulla base di queste indicazioni non si può valutare in modo conclusivo se i valori limite dell'ICNIRP e i valori limite di immissione dell'ORNI, da essi derivati, offrono una protezione sufficiente dai danni a lungo termine. Ciò vale anche per le esposizioni nell'intervallo dei valori limite dell'impianto dell'ORNI; in questo intervallo di dosi vi sono però anche indicazioni di possibili effetti rilevanti per la salute. Dal punto di vista scientifico sono perciò tuttora necessari sia un approccio orientato alla prevenzione nell'ambito delle radiazioni non ionizzanti sia un rafforzamento della ricerca.

Tabella 3: Ricapitolazione dell'evidenza delle ripercussioni sulla salute associate alle radiazioni ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli. Le indicazioni relative alla soglia di esposizione in mW/kg o W/kg vanno intese come punti di riferimento approssimativi. Si riferiscono al valore massimo registrato nel corpo del tasso di assorbimento specifico locale SAR₁₀.

EVIDENZA	EFFETTO			FONTE DELL'ESPOSIZIONE	SOGLIA DI ESPOSIZIONE
	Grave	Limitazione del benessere fisico	Rilevanza dubbia per la salute		
Sicuro (risultati coerenti)		Interferenza nelle protesi impiantate		Apparecchi elettronici (p.es. telefoni cellulari)	
		Audizione di microonde		Impianti radar	Densità del flusso energetico per impulso >20 mJ/m ²
Probabile (molteplici indicazioni di effetti)			Correnti cerebrali	Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
			Tempi di reazione rallentati	Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
		Sintomi non specifici (cefalee, stanchezza, difficoltà di concentrazione, malessere, bruciore della pelle, ecc.)		Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
			Fasi di sonno	Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
Possibile (indicazioni isolate di effetti)		Qualità del sonno		Emittenti radiofoniche	In prossimità del valore limite dell'impianto
		Ipersensibilità alle radiazioni elettromagnetiche		Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
	Leucemie/linfomi			Emittenti radiofoniche e televisive	In prossimità del valore limite dell'impianto
	Tumori al cervello			Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
Improbabile (molteplici indicazioni della assenza)	Mortalità			Telefoni cellulari	
	Altri tipi di tumore			Diverse fonti	
Non valutabile (troppo pochi dati)			Sistema ormonale	Diverse fonti	
			Sistema immunitario	Diverse fonti	
			Ipertensione, variabilità del polso, elettrocardiogramma	Emittenti radiofoniche	
		Condizioni di salute psichica		Diverse fonti	
		Sintomi non specifici (disturbi del sonno, cefalee, ecc.)		Stazioni di base per la telefonia cellulare	
	Aborti spontanei			Apparecchi per la diatermia	
	Genotossicità			Esposizione professionale	
	Tumori al seno			Diverse fonti	
	Tumori agli occhi			Telefoni cellulari	
	Tumori ai testicoli			Pistole radar	

Summary

The objective of this report is to assess the risk to health arising from high frequency non-ionising radiation in the low dose range based on current scientific knowledge. The term 'low dose range' refers to radiation intensities lying below the exposure limit values stated in the Ordinance Relating to Protection from Non-Ionising Radiation (ONIR) – or, in the case of mobile telephones, below the limit value for the local specific absorption rate recommended by the International Commission for Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP). Thermal effects are sufficiently known and are not dealt with in the present report.

A literature survey was performed on some 200 scientific papers dealing with radiation effects on human beings. These included experimental and epidemiological investigations as well as publications on exposure, dosimetry, technical fundamentals and the definition of exposure limit values. The literature was selected from specialised databases using standardised search criteria, and checked for completeness using review articles and reports.

The **evidence** presented in the above studies for the existence of specified effects was assessed on a five-point scale as follows:

- **Established**

An effect is regarded as established if it meets stringent scientific criteria, i.e. is replicated several times in independent investigations, is not in contradiction with other research results, and where a plausible biological model exists.

- **Probable**

An effect is classified as probable if it has been found repeatedly and with relative consistency in independent studies. The studies concerned must be of a sufficiently high quality to exclude other factors with a large degree of certainty. No plausible causation mechanism is known.

- **Possible**

Effects are regarded as possible where they occur sporadically in the studies. However, the results are not entirely consistent and could be the result of methodical weaknesses. The scientific evidence is corroborated by case reports.

- **Improbable**

There are no indications of an association, but multiple indications of its absence. No theoretically plausible biological model exists.

- **Not assessable**

The data is too scant for an assessment to be made. While isolated evidence exists, this is often contradictory. The methodology of the studies concerned is regarded as insufficient to permit conclusions to be drawn.

In a further step, the **relevance to health** of the above effects was classified into three groups:

- **Serious**

The effect leads to a drastic reduction in the quality of life. It constitutes a threat to life and reduces life expectancy. This category includes all cancerous diseases, genotoxic effects, stillbirths, teratogenicity in infants, and increased mortality.

- **Reduced well-being**

While the effect does not represent a direct threat to life, it significantly curtails the quality of life and/or well-being. This category includes unspecific health symptoms such as headaches, insomnia, mental symptoms, electromagnetic hypersensitivity and microwave hearing.

- **Not assessable**

The effects are physiologically measurable and lie within the normal variability range of healthy individuals. Such effects do not represent a risk to health *per se* and, since they are normally not perceived, do not lead to a reduction in the quality of life. It is not known whether they represent a risk to health in the long term. This group includes fluctuations in the hormone, immune and cardiovascular systems, variability in the EEG and changes in the perception and processing of stimuli.

For effects classified as established, probable or possible, a lower exposure limit value for their appearance was estimated based on the results of the available studies. To enable the results for mobile telephones and stationary transmission installations to be compared, the different dose metrics had to be standardised. SAR₁₀ was chosen as the common dose metric. This specifies the amount of radiation that is absorbed by the body at the point of maximum absorption (SAR₁₀ = local specific absorption rate in W/kg, averaged over 10 g of body tissue). While some reports specify SAR₁₀ directly, for others it had to be estimated.

The conclusions are summarised in Table 4. There are only very few low-dose effects in the **established** category. It is generally accepted that high frequency radiation may impair the function of technical appliances. In the case of implanted medical devices (e.g. cardiac pacemakers and implanted hearing aids), this may have consequences on health. Acoustic perception (microwave hearing) was consistently identified for pulsed radiation exceeding a given energy quantity per pulse. For radar installations, this phenomenon can also occur where the exposure limit values are not exceeded, but there is no indication of this for GSM radiation. It is known that the risk of accidents is higher when telephone calls are made during driving, irrespectively of whether a hands-free set is used or not. However, this does not result from the radiation as such but from the associated distraction.

It is regarded as **probable** that exposure to mobile telephones lowers reaction times and leads to changes in the electric activity of the brain. The most consistent effect observed was an increase in amplitude of the electroencephalogram alpha-band. In several studies, sleep phases (as identified on the basis of brain activity) were found to alter under exposure to mobile telephones. The effects occurred at very low radiation intensities, and may not therefore be explained by the conventional thermal model. For frequent use of mobile telephones, an increase in unspecific symptoms (e.g. headaches, sensitivity to pain, discomfort, fatigue, dizziness and burning skin) was identified in several reports. If, and to what extent, factors other than radiation may have contributed to these symptoms could not be determined from the studies. It is conceivable that some persons may experience mobile telephoning as strenuous

owing to poor reception quality, or that, after making a call, they may perceive certain symptoms (e.g. headaches) differently from others not using mobile telephones. It is also possible that the frequent use of mobile telephones simply results in a higher stress level on the part of users, and that the symptoms are attributable to this.

In some studies, higher leukaemia and/or lymphoma rates than expected were observed near TV and radio transmitters. However, the results are not consistent, and some studies suffer from methodical weaknesses. The risk of contracting the above forms of cancer is therefore regarded simply as **possible**, but not probable. It also appears possible that the risk of brain tumours is higher for mobile telephone users. Furthermore, plausible (isolated) cases of electromagnetic hypersensitivity to high frequency radiation, and of insomnia in the vicinity of transmission installations, are reported.

High frequency low-dose radiation has not till now been found to affect total mortality or types of tumour other than those explicitly mentioned in Table 4. Such effects must therefore be classified as **improbable**.

Where other effects of low-level high frequency radiation on health are concerned, the scientific basis is too limited to permit assessment. These effects include changes in the hormone, immune and cardio-vascular systems, mental symptoms, stillbirth, genotoxicity and tumours of the breasts, eyes and testicles.

The scientific literature was also examined for indications as to whether certain characteristics of radiation other than intensity might impair biological functioning. While this could, in principle, apply to modulation (e.g. pulsing), frequency or polarisation, the indications are few and contradictory. In one experimental study, which systematically investigated the relevance of signal characteristics, pulsed radiation was found to have a greater effect on electric brain activity than continuous radiation. Epidemiological studies, however, showed that the effects of using analogue (non-pulsed) telephones tended to be more pronounced than for digital (pulsed) telephones.

Conclusions

At present, insufficient scientific data are available to enable the risk to public health of high frequency non-ionising radiation at low dose levels to be assessed. Very few long-term studies have been conducted on human beings in their natural environment. Only one scientific study has been published on the effects on the health of persons living near mobile telephone base stations. This study, however, does not meet minimal scientific standards. Experimental studies have demonstrated that high frequency radiation has direct effects that are not explicable on a thermal basis.

Based on the knowledge now available, the following tentative conclusions can be drawn:

- No new health effects have been **established** in the dose range below the limit values recommended by ICNIRP – and thus below the exposure limit values of the ONIR.
- Certain effects from exposure to mobile telephones must be regarded as **probable**, but their relevance to health is in most cases unknown. The effects occur at local SAR₁₀ values in the range 20 mW/kg to 2 W/kg (i.e. below the recommended ICNIRP limit value of 2 W/kg). A rough estimate shows that to produce comparable SAR₁₀ levels, the radiation intensity of stationary transmitters would have to lie between the installation limit value and the exposure limit value laid down in Swiss legislation. Thus although effects must be classified as probable where exposure to mobile telephones is concerned, no effects in this category are expected for stationary transmitters provided the installation limit value is not exceeded.
- Effects characterised as **possible** occur under exposure both to mobile telephones and broadcast transmitters. For mobile telephones the exposure threshold lies in the same range as given above (SAR₁₀ between 20 mW/kg and 2 W/kg), and for radio transmitters at a field strength in the region of the Swiss installation limit value.
- For many of the effects observed in scientific studies, **no assessment** can be made whether they are causally related to the radiation. While some of these effects are known to have the potential to cause serious detriment to health, for others this is uncertain.

The above information does not permit final conclusions to be drawn on whether the exposure limits specified by ICNIRP provide sufficient protection from long-term health hazards. This also applies to the installation limit values of the ONIR (there are indications that comparable exposure levels may possibly produce effects that are relevant to health). From a scientific point of view a continued precautionary approach to high frequency radiation, together with intensified research on its effects on human health, are therefore recommended.

Table 4: Summary of the evidence for high frequency radiation effects on health at low dose levels. The figures for the exposure limit value (given in mW/kg and W/kg) are only intended as a rough guide. They refer to the maximum local specific absorption rate SAR₁₀ occurring in the body.

EVIDENCE	EFFECT			EXPOSURE SOURCE	EXPOSURE LIMIT VALUE
	Serious	Reduced well-being	Relevance to health unknown		
Established (consistent findings)		Interference effects on implanted medical devices		Electronic appliances (e.g. mobile telephones)	
		Microwave hearing		Radar installations	Energy flux density per pulse >20 mJ/m ²
Probable (multiple indications)			Brain activity	Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
			Shortened reaction times	Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
		Unspecific symptoms (headaches, fatigue, problems of concentration, disquiet, burning skin, etc.)		Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
			Sleep phases	Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
Possible (isolated indications)		Sleep quality		Radio transmitters	in the region of the installation limit value
		Electromagnetic hypersensitivity		Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
	Leukaemia and lymphomas			TV and radio transmitters	in the region of the installation limit value
	Brain tumours			Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
Improbable (multiple indications of absence of the effect)	Mortality			Mobile telephones	
	Other types of tumour			Various	
Not assessable (insufficient data)			Hormone system	Various	
			Immune system	Various	
			High blood pressure, variable pulse, electrocardiogram	Radio transmitters	
		Mental symptoms		Various	
		Unspecific symptoms (insomnia, headaches, etc.)		Mobile telephone base stations	
	Stillbirth			Diathermal appliances	
	Genotoxicity			Exposure at the workplace	
	Breast cancer			Various	
	Eye tumours			Mobile telephones	
	Tumours of the testicles			Radar guns	

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich der Mobilfunk nahezu flächendeckend in ganz Europa ausgebreitet. Mit der Einführung der Mobilfunktechnik auf breiter Basis gewann auch die Frage nach möglichen gesundheitlichen Risiken für die Bevölkerung verstärkt an Aktualität. Es ist bekannt, dass hochfrequente elektromagnetische Strahlung bei hoher Intensität zu einer Erwärmung des Gewebes führt und infolge dessen gesundheitsschädigend sein kann. 1999 hat der Bundesrat deshalb, gestützt auf das Umweltschutzgesetz, die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) verabschiedet. Sie ist seit dem 1. Februar 2000 in Kraft und begrenzt nichtionisierende Strahlung von stationären Anlagen. Geräte wie beispielsweise Mobiltelefone werden durch die Verordnung nicht erfasst.

Die Begrenzung der Strahlung erfolgt in zwei Stufen:

- Im Sinne der **Gefahrenabwehr** hat der Bundesrat so genannte Immissionsgrenzwerte festgelegt, welche vor den wissenschaftlich allgemein anerkannten Gesundheitsrisiken schützen. Als Immissionsgrenzwerte wurden die 1998 von der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) empfohlenen Grenzwerte übernommen, welche auf den etablierten thermischen Wirkungen beruhen.

Der Bundesrat war sich allerdings bewusst, dass die Grenzwerte der ICNIRP den vom Umweltschutzgesetz verlangten Schutz – Verhinderung von schädlichen und lästigen Auswirkungen unter Berücksichtigung besonders empfindlicher Bevölkerungsgruppen – nicht mit Sicherheit gewährleisten. Es sind nämlich in wissenschaftlichen Untersuchungen bereits biologische Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung festgestellt worden, die bei Intensitäten im Grenzwertbereich oder darunter auftreten, und die möglicherweise ein Gesundheitsrisiko darstellen. Darüber besteht jedoch kein wissenschaftlicher Konsens.

Die wissenschaftliche Forschung über biologische Wirkungen nichtionisierender Strahlung entwickelt sich laufend. Bereits in der Pressemitteilung zur NISV Ende 1999 wurde festgehalten, dass «der Bundesrat neuen Erkenntnissen Rechnung tragen und die Verordnung bei Bedarf anpassen wird». Die Immissionsgrenzwerte sind gemäss Umweltschutzgesetz nämlich nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung festzulegen. Das Bundesgericht hat diesen Vorbehalt bestätigt (BGE 1A.94/2000/sch).

- Im Sinne der **Vorsorge** hat der Bundesrat zusätzlich zu den Immissionsgrenzwerten strengere Begrenzungen – so genannte Anlagegrenzwerte – festgelegt, die sich nach den technischen und betrieblichen Möglichkeiten und der wirtschaftlichen Tragbarkeit richten. Für Hochfrequenzstrahlung ist diese vorsorgliche Begrenzung – bezogen auf die Feldstärke – ungefähr zehnmal strenger als gemäss den ICNIRP-Grenzwerten. Damit soll erreicht werden, dass die technischen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, um die NIS-Belastung der Bevölkerung, insbesondere die Langzeitbelastung, möglichst tief zu halten. Der Anlagegrenzwert ist somit eine pragmatische Festlegung unter Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit. Seine Einhaltung garantiert allerdings den vom Umweltschutzgesetz geforderten Schutz nicht zwingend. Hintergrund für diese Aussage ist die Tatsache, dass die Risikoabschätzung selbst erst vorläufig und dadurch möglicherweise unvollständig ist.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über den heutigen Stand der Forschung zu biologischen Wirkungen hochfrequenter Strahlung in niedrigen Dosen und bewertet die Forschungsergebnisse im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Gesundheit des Menschen. Im Zentrum steht dabei die Frage, ob die ICNIRP-Grenzwerte im Lichte der neusten Forschungsergebnisse einen genügenden Schutz für die Bevölkerung gewährleisten. Als ‚niedrige Dosis‘ wird im folgenden der Dosisbereich unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte verstanden.

Als wissenschaftliche Basis wurden nur Studien an Menschen herangezogen. Zwar liegt auch eine Vielzahl von tierexperimentellen Untersuchungen und Zellexperimenten vor. Diese liefern jedoch in aller Regel keine unmittelbaren Aussagen über Gesundheitsrisiken für den Menschen. Sie dienen in erster Linie zur Erforschung der zugrundeliegenden Wirkungsmechanismen. Für das Erkennen und Bewerten gesundheitlicher Effekte sind Humanstudien am aussagekräftigsten, da sie am wenigsten Annahmen über die Art des Wirkungsmechanismus erfordern und da die Probleme der Übertragbarkeit von Befunden zwischen verschiedenen biologischen Systemen entfallen. Zudem untersuchen Studien an Menschen im allgemeinen Expositionen, denen die Bevölkerung auch real ausgesetzt ist.

Am meisten humanexperimentelle Studien sind bisher zu den unmittelbaren Wirkungen beim Gebrauch von Mobiltelefonen durchgeführt worden. Mobiltelefone und andere mobile Geräte unterliegen zwar der NISV nicht, sie werden hier aber trotzdem einbezogen, da auch sie hochfrequente Strahlung erzeugen. Weiter gibt es epidemiologische Studien zu Effekten in der Umgebung von TV- und Radiosendern, im Zusammenhang mit dem Gebrauch von Mobiltelefonen sowie bei der Exposition gegenüber speziellen Geräten, die hochfrequente nichtionisierende Strahlung emittieren (z.B. Radar, Diathermiegeräte, etc.). Bisher wurde erst eine wissenschaftliche Studie zu Gesundheitseffekten bei Menschen publiziert, die in der Nähe von Mobilfunkbasisstationen wohnen; diese Studie genügt allerdings minimalsten wissenschaftlichen Anforderungen nicht.

Dieser Bericht diskutiert nach einer kurzen technischen Einleitung (Kapitel 2) die Wirkungsmechanismen von nichtionisierender Strahlung beim Menschen (Kapitel 3). Methoden für die Abschätzung der Exposition in wissenschaftlichen Studien sowie ein Überblick über die Belastung der Bevölkerung durch hochfrequente Strahlung sind in Kapitel 4 dargestellt. Zusätzlich sind dort auch Gemeinsamkeiten und Unterschiede von typischen Expositionssituationen detailliert beschrieben. Kapitel 5 gibt einen Überblick über die ICNIRP-Richtwerte und die schweizerischen Grenzwerte sowie die Grundlagen, die zu deren Festsetzung geführt haben.

Die verwendete Methodik zur Studienauswahl und Bewertung der Resultate ist in Kapitel 6 beschrieben. Dort ist auch erläutert, wie verschiedene Expositionsmasse (elektrische und magnetische Feldstärke, spezifische Absorptionsrate SAR, Sendeleistung von Mobiltelefonen) miteinander verglichen werden können (Kapitel 6.5).

Den Hauptteil des Berichts bildet das Kapitel 7. Dort sind die Forschungsergebnisse, gruppiert nach den einzelnen gesundheitlichen Auswirkungen, detailliert beschrieben und bewertet.

Die magnetische Feldstärke H ist abhängig von der Stromstärke und wird in Ampère pro Meter (A/m) gemessen. Im Hochfrequenzbereich ist auch die Leistungsflussdichte ein häufig verwendetes Mass. Die Leistungsflussdichte misst die Energie, die pro Zeiteinheit durch eine senkrechte Bezugsfläche durchtritt (W/m^2). Ein Überblick über Grössen, Einheiten und Umrechnungen im Zusammenhang mit dem Elektromagnetismus ist im Anhang in Tabelle 33 zu finden.

Im *Fernfeld* breitet sich das elektromagnetische Feld als ebene Welle aus. Die elektrische und magnetische Komponente stehen senkrecht aufeinander und sind gekoppelt. Aus der elektrischen Feldstärke kann auf die magnetische geschlossen werden und umgekehrt. Die Leistungsflussdichte ist im Fernfeld proportional zum Quadrat der elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke. Das bedeutet, dass sich die Leistungsflussdichte vervierfacht, wenn sich die Feldstärke verdoppelt. Tabelle 34 im Anhang erlaubt die Umrechnung der verschiedenen Feldgrössen.

Das Fernfeld beginnt im Abstand von mehr als einer Wellenlänge von der Strahlungsquelle, sofern die Dimension der Antenne im Bereich der Wellenlänge liegt. Bei Antennen, die die Strahlung stark fokussieren, dehnt sich das Nahfeld weiter aus. Die Distanz d , bei der das Nah- ins Fernfeld übergeht, berechnet sich gemäss folgender Formel (ICNIRP 1996):

$$d = 2 \cdot \frac{D^2}{\lambda} \quad (\text{Gleichung 1})$$

wobei D die Ausdehnung der Antenne und λ die Wellenlänge bezeichnet. Radiosender haben eine Wellenlänge von rund 2000 m (Langwelle) bis 3 m (UKW). Beim Mobilfunk beträgt die Wellenlänge 15–30 cm. Bei den Mobilfunkbasisstationen beginnt das Fernfeld in einer Distanz von einigen Metern von der (fokussierenden) Antenne.

Der Strahlung von Mobilfunkbasisstationen ist man also typischerweise unter Fernfeldbedingungen ausgesetzt, während bei der Benützung von Mobiltelefonen die Exposition im Nahfeld erfolgt.

Im *Nahfeld* liegen komplexe Feldverhältnisse vor. Es gibt keinen festen Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld. Beide Feldkomponenten müssen separat gemessen oder mit komplexen numerischen Rechenverfahren bestimmt werden. Aus diesem Grund hat sich bei Nahfeldbedingungen (z.B. beim Mobiltelefonieren) für die Charakterisierung der Exposition ein Körper-internes Dosismass durchgesetzt, die sogenannte spezifische Absorptionsrate (SAR) (siehe Kapitel 3.1).

Die Strahlung wird mit zunehmendem Abstand r schwächer. Im Fernfeld nimmt die Feldstärke im gerichteten Strahl proportional zu $1/r$, die Leistungsflussdichte mit $1/r^2$ ab. Das heisst, eine Verdoppelung des Abstandes führt zu einer Reduktion der

Feldstärke auf die Hälfte und zu einer Reduktion der Leistungsflussdichte auf ein Viertel. Im Nahfeld ist das Abnahmeverhalten komplexer. Generell nimmt dort die Feldstärke mit zunehmender Distanz stärker ab als im Fernfeld (ICNIRP 1998).

Die Feldgrößen stehen in einem direkten Zusammenhang zur Sendeleistung einer Antenne. Die Leistungsflussdichte und die SAR sind direkt proportional zur Sendeleistung. Eine Verdoppelung der Sendeleistung führt auch zu einer Verdoppelung dieser beiden Größen. Die Feldstärke wächst demgegenüber nur mit der Wurzel der Sendeleistung an. Eine Verdoppelung der Sendeleistung erhöht die Feldstärke daher nur um den Faktor $\sqrt{2}$, d.h. um 41%.

2.2 Technische Anwendungen von Hochfrequenzstrahlung

Funk, Radio, Fernsehen, Mobilfunk und Satellitenkommunikation gehören zu den drahtlosen Kommunikationstechniken. Gemeinsam bei all diesen Anwendungen ist, dass hochfrequente elektromagnetische Strahlung als Träger für die Übermittlung eingesetzt wird. Die zu übertragende Information wird dabei in geeigneter Form aufgeprägt, entweder durch Modulation der Amplitude (AM), der Frequenz (FM), der Phase oder Kombinationen davon. Die Pulsierung, wie sie bei der GSM-Mobilfunktechnik verwendet wird, stellt eine spezielle Form der Amplitudenmodulation dar.

In Tabelle 5 sind die wichtigsten Anwendungen von Hochfrequenzstrahlung und die typischerweise zu erwartenden Feldstärken zusammengestellt. Da sich viele der im vorliegenden Bericht vorgestellten Untersuchungen mit Mobilfunkstrahlung befassen, werden die technischen Aspekte der Mobilfunktechnik in grösserem Detail in Kapitel 2.3 separat vorgestellt.

Beim Radio unterscheidet man folgende Frequenzbereiche: Langwelle (130–285 kHz), Mittelwelle (0.415–1.6065 MHz), Kurzwelle (3.95–26.1 MHz) und Ultrakurzwelle (87.5–108 MHz). Für die Übertragung von Fernsehprogrammen werden Frequenzen in verschiedenen Bändern genutzt: 54–88 MHz (in der Schweiz nur 47–68 MHz), 174–230 MHz, 470–890 MHz (DAHME 1999). Die Sendeleistung von Radio- und TV-Sendern ist je nach Versorgungsgebiet sehr unterschiedlich und beträgt in der Schweiz zwischen wenigen Watt für gewisse UKW-Stationen bis zu 500 kWatt bei den stärksten Mittelwellensendern.

Die Satellitenkommunikation nutzt Frequenzbänder im Bereich 2 bis 14 Gigahertz. Für den Amateurfunk werden verschiedene Frequenzbänder im Kilo- und Megahertzbereich genutzt.

Weitere Hochfrequenzquellen sind Verkehrsradar (9–35 GHz) sowie Flughafen- und Wetterradar (1–10 GHz). Charakteristisch für die Radartechnik ist die Pulsierung der Strahlung. Es wird nur ein sehr kurzer Sendepuls ausgestrahlt und dessen Echo interpretiert. Das bedeutet, dass die durchschnittliche (zeitliche gemittelte)

Sendeleistung solcher Sender deutlich kleiner ist als die momentane Sendeleistung während eines Pulses. Das Verhältnis zwischen der effektiven Sendezeit und der sendelosen Zeit wird durch den so genannten Duty-Faktor ausgedrückt. Typische Werte des Duty-Faktors für Radar sind kleiner als ein Tausendstel.

Im Zusammenhang mit der Exposition der Bevölkerung sei hier als Strahlungsquelle im Hochfrequenzbereich noch der Mikrowellenofen erwähnt, der bei einer Frequenz von 2.45 GHz arbeitet. Im Gegensatz zur drahtlosen Kommunikation ist die Strahlung im Mikrowellenofen eingeschlossen. Für die Exposition ist dort nur das Ausmass von (unerwünschter) Leckstrahlung von Bedeutung.

Zusätzliche Emittenten im Hochfrequenzbereich und die genaue Frequenzzuteilung in der Schweiz werden vom Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) publiziert: http://www.bakom.ch/de/funk/freq_plaene/zuweisung/index.html

Tabelle 5: Überblick über typische Feldstärken von Hochfrequenzquellen.

Frequenz	Typische Quellen	Distanz	Elektr. Feldstärke [V/m]	Referenz
0.130–0.285 MHz	LW-Radiosender (AM)	200 m	80 ^{a)}	DAHME 1999
0.415–1.61 MHz	MW-Radiosender (AM)	200 m	130 ^{a)}	DAHME 1999
0.415–1.61MHz	MW-Radiosender (AM)	100 m	2.5–20	MANTIPLY et al. 1997
1.8–30 MHz	Amateurfunk	Bei Antenne ^{b)}	1–200	MANTIPLY et al. 1997
3.95–26.1 MHz	KW-Radiosender (AM)	220 m	43 ^{a)}	DAHME 1999
27 MHz	CB-Funk	12 cm	200 ^{a)}	DAHME 1999
88–108 MHz	UKW-Radiosender (FM)	Um Antennen ^{b)} 1.5 km	2–200 0.4 ^{a)}	MANTIPLY et al. 1997 DAHME 1999
54–806 MHz	Fernsehsender	Um Antennen ^{b)}	1–20	MANTIPLY et al. 1997
174–230 MHz	Fernsehsender	1.5 km	0.1 ^{a)}	DAHME 1999
470–890 MHz	Fernsehsender	1.5 km	0.3 ^{a)}	DAHME 1999
925–960 MHz 1805–1880 MHz	Mobilfunkbasisstation (GSM)	20–100 m	<3.5	WANNER 2001
925–960 MHz 1805–1880 MHz	Mobilfunkbasisstation (GSM)	Zufällig ausgewählte Standorte in städtischem Gebiet	0.012–0.343	SCHÜZ and MANN 2000
833MHz	Mobiltelefon (0.6 W)	Am Kopf Im Kopf, in 3 cm Tiefe	50 13.5	KING 2000
2.45 GHz	Mikrowellenofen (geschlossen)	5 cm 30 cm	10–140 61	MANTIPLY et al. 1997 DAHME 1999
2–14 GHz	Satellitenkommunikation	Am Boden bei Relais ^{b)}	0.02–15	MANTIPLY et al. 1997
1.3–24 GHz	Wetterradar	10 m–10 cm	0.1–200 ^{c)}	MANTIPLY et al. 1997
1–10 GHz	Flughafenradar	1 km	61 ^{c)}	DAHME 1999
9–35 GHz	Verkehrsradar	3 m Position Operator	0.4 ^{c)} 1–15 ^{c)}	DAHME 1999 MANTIPLY et al. 1997

^{a)} max. Effektivwerte im genannten Abstand.

^{b)} max. Effektivwerte auf Bodenhöhe, Distanz nicht näher spezifiziert.

^{c)} bei Radaranlagen: zeitliche Mittelwerte im genannten Abstand

2.3 Technik der Mobilkommunikation

Grundlage der Mobilkommunikation ist ein wabenförmiges Netz von Zellen. Zu jeder Zelle gehört eine Basisstation, die via Funk mit den Mobiltelefonen, die sich innerhalb der Zelle befinden, kommuniziert. Die Basisstation besteht aus mehreren Sende- und Empfangsantennen und einer Steuerungseinheit. Die Basisstationen kommunizieren ihrerseits per Richtfunk oder herkömmlicher Telefonleitung mit dem Vermittlungs- bzw. Zentralrechner (BAG and BUWAL). Seit der Einführung der C-Netze ist es möglich, beim mobilen Telefonieren ohne Gesprächsunterbruch die Zelle zu wechseln, da die Verbindung dann automatisch an die nächste Basisstation weitergeleitet wird. Den Durchbruch in der Mobilkommunikation brachte 1992 das GSM-System (Global System for Mobile Communication), die zweite Generation der Mobilfunktechnologie. Die ersten Anwendungen im A- und B- Netz arbeiteten mit Frequenzen im Bereich von 150 MHz. Die C-Netze benutzten hauptsächlich ein Frequenzband um 900, in einigen Ländern (z.B. Skandinavien) wurden die C-Netze im Bereich von 450 MHz betrieben. Die Netze der 2. Generation (GSM) benützen Frequenzen bei 900 und 1800 MHz.

2.3.1 Mobiltelefonie der 1. Generation (Natel C)

Die 1. Generation von Mobiltelefonen war Gegenstand vieler biologischer Studien. Bei der ersten Generation handelte es sich um ein analoges System. Dabei wurde die Frequenz der Trägerwelle mit der Sprechfrequenz moduliert. Die Zellen waren tendenziell grösser als beim GSM. Innerhalb einer Zelle belegte jeder Benutzer einen eigenen Frequenzkanal (FDMA-Verfahren: Frequency Division Multiple Access). Die Emission erfolgte nicht gepulst, sondern kontinuierlich. Die Telefone emittierten höhere Strahlungsleistungen als GSM-Telefone, üblicherweise 1 W im zeitlichen Durchschnitt. Zudem gab es noch keine technischen Ausstattungen zur Emissionsbegrenzung durch Leistungsregelung oder diskontinuierliche Transmission (siehe unten). Das Natel C-Netz der Swisscom, das einzige, das in der Schweiz betrieben wurde, lief im 900 MHz Frequenzbereich. Es wurde 1987 aufgebaut und Ende 2000 abgeschaltet.

2.3.2 Mobiltelefonie der 2. Generation (GSM)

Das GSM-System ist zur Zeit in Europa am verbreitetsten. Die Information wird der hochfrequenten Welle digital aufgeprägt. Im 900 MHz-Band sendet das Mobiltelefon im Bereich von 880–915 MHz (uplink), die Basisstation im Bereich von 925–960 MHz (downlink). Im 1800 MHz-Band liegt die Uplink-Frequenz zwischen 1710 und 1785 und die Downlink-Frequenz zwischen 1805 und 1880 MHz (BAKOM 2001A). Das System im 1800 MHz Frequenzband wird in einigen Ländern auch als DCS (Digital Communication System) bezeichnet.

Damit mehrere Nutzer über die gleiche Basisstation telefonieren können, wird ein kombiniertes Zeit- und Frequenzmultiplexverfahren angewendet (FDMA und TDMA: Frequency/Time Division Multiple Access). Das TDMA-Verfahren besteht darin, dass sich bis zu acht Benutzer den gleichen Frequenzkanal teilen. Dabei er-

hält jeder Benutzer abwechslungsweise einen Achtel der Zeit zugeteilt, was einem Duty-Faktor von einem Achtel entspricht. Die Information wird stückweise in Paketen von 577 μ s Dauer übertragen, welche sich alle 4.6 ms wiederholen. Dies führt zu einer Pulsierung der Strahlung mit einer Pulswiederholfrequenz von 217 Hz. In der Nähe eines sendenden Telefons ist diese 217 Hz Pulsierung sehr ausgeprägt (siehe Abbildung 2, unten).

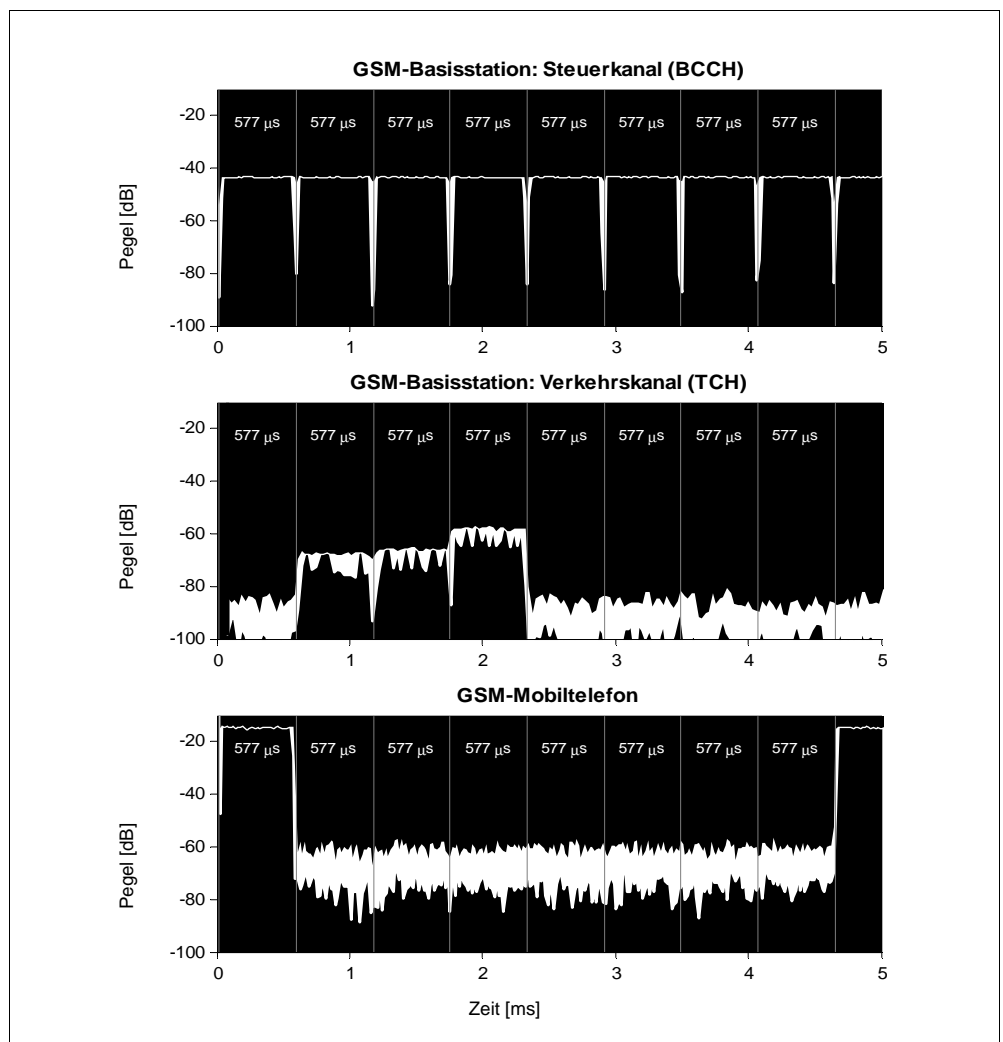
GSM-Telefone sind mit einer dynamischen Leistungsregelung ausgestattet. Dabei wird die Strahlungsleistung automatisch so weit reduziert, dass gerade noch eine genügende Verbindung mit der Basisstation aufrecht erhalten wird. Die Kommunikation startet immer mit der Maximalleistung von 2 W Pulsleistung (GSM 900) und reduziert sich dann, falls möglich, in Schritten von 2 dB (=Faktor 1.58) bis auf einen Minimalwert von 0.02 W, bei gewissen Geräten sogar auf 0.003 W. Üblicherweise wird die Minimalleistung erst nach 30 bis 60 Sekunden erreicht, obwohl die benötigten Informationen über die Verbindungsqualität rund 16 Mal pro Sekunde zwischen Basisstation und Telefon ausgetauscht werden (WIART et al. 2000). Durch die Leistungsregelung wird die durchschnittliche Sendeleistung und damit die Exposition im Vergleich zu einem Gerät ohne Leistungsregelung auf rund ein Viertel reduziert. Dies wurde unter Annahme eines typischen Nutzungsverhaltens (40% der Telefonate während des Fahrens, 30% als Fussgänger und 30% stationär) gezeigt (WIART et al. 2000). Bei einem Zellenwechsel wird wieder mit der maximalen Sendeleistung gestartet. Experimente in der Praxis haben gezeigt, dass deshalb mit zunehmender Mobilität des Benutzers die durchschnittliche Strahlungsemission des Telefons zunimmt. In Gebieten mit grosser Antennendichte ist einerseits die Wahrscheinlichkeit höher, dass man sich in der Nähe einer Basisstation befindet und das Telefon mit geringer Leistung sendet, andererseits gibt es mehr Zellenwechsel, was die Emissionen erhöht.

Eine weitere Eigenschaft des GSM-Systems ist die so genannte diskontinuierliche Transmission (Discontinuous Transmission: DTX). Sie reduziert die Strahlungsemission während der Gesprächspausen. Bei Stille wird dann nur rund 10% der Leistung übermittelt (WIART et al. 2000). Dies führt zu zusätzlichen Pulsierungen der Strahlung mit Frequenzen von 2 und 8 Hz. Messungen in der Praxis ergaben, dass durch die DTX die durchschnittliche Sendeleistung des Mobiltelefons auf rund 70% verringert wird (WIART et al. 2000), zusätzlich zum Effekt der Leistungsregelung.

Für die Mobiltelefonie wird das Versorgungsgebiet in Zellen aufgeteilt, die je mit einer Mobilfunkbasisstation bestückt werden. In ländlichen Gebieten weisen die Zellen einen Durchmesser von 1 bis 4 km auf, im Zentrum von Grossstädten sind sie deutlich kleiner. Die Grösse einer Zelle richtet sich nach der Anzahl der erwarteten Gespräche, da eine GSM-Basisstation nur eine bestimmte Anzahl Mobiltelefone gleichzeitig bedienen kann. Je nach benötigter Kapazität stehen ein bis mehrere Frequenzkanäle zur Verfügung. Ein Kanal, der sogenannte Steuerkanal (BCCH: Broadcast Control Channel), ist permanent in Betrieb. Er dient dem Rufaufbau, der Anrufprozedur, der Aufrechterhaltung der Verbindung sowie weiteren informationstechnisch relevanten Funktionen. Über diesen Kanal können zusätzlich zu Kontrollinformationen noch 7 Gespräche geführt werden. Dieser Steuerkanal zeichnet

sich dadurch aus, dass er permanent mit voller Leistung sendet. Die dynamische Leistungsregelung ist nicht eingeschaltet und Zeitschlitze, die nicht belegt sind, werden künstlich mit Leerinformation gefüllt. Zwischen den einzelnen Zeitschlitzen wird das Signal kurz ausgetastet, was zu einer Pulsierung der Strahlung mit einer Pulswiederholfrequenz von 1834 Hz führt (siehe Abbildung 2, oben). Bei mehr als 7 gleichzeitigen Gesprächen werden zusätzliche Kanäle, sogenannte Verkehrskanäle zugeschaltet (TCH: Traffic channel). Auf diesen Kanälen wird nur in den tatsächlich benötigten Zeitschlitzen Strahlung emittiert; ausserdem ist für diese Emission, wie beim Mobiltelefon, die dynamische Leistungsregelung wirksam (siehe Abbildung 2, Mitte). Zusammengenommen führt dies zu einem recht komplizierten und je nach aktuellem Gesprächsaufkommen variierenden Summsignal.

Abbildung 2:
Pulsierung der Strahlung einer GSM-Basisstation und eines GSM-Mobiltelefons, gemessen mit einer Empfangsantenne. (Messdaten von Roschi, Rohde und Schwarz AG, Ittigen). Dargestellt ist der Empfangspegel an der Messantenne im logarithmischen Massstab. Ein Unterschied von 20 dB entspricht einem Faktor 100 in der Leistungsdichte bzw. einem Faktor 10 in der Feldstärke.



Oben: Steuerkanal: alle 8 Zeitschlitze werden mit voller Sendeleistung ausgestrahlt. Mitte: Verkehrskanal: Die Zeitschlitze 2 bis 4 sind belegt, die Sendeleistung ist in diesem Beispiel mindestens 15 dB niedriger als die des Steuerkanals und wird für jeden Zeitschlitz individuell eingestellt (dynamische Leistungsregelung). Unten: Mobiltelefon: Jeder achte Zeitschlitz wird ausgestrahlt. Der Pegel ist in diesem Beispiel ca. 25 dB höher als der des Steuerkanals der Basisstation.

Im Laufe eines Tages schwankt die Sendeleistung der Basisstation in Abhängigkeit der Anzahl gleichzeitiger Mobilfunkverbindungen (SILVI et al. 2001). Dies ist in Abbildung 3 anhand einer Immissionsmessung ersichtlich. Man erkennt die immer, auch nachts vorhandene Grundbelastung durch den Steuerkanal, der bei erhöhtem Gesprächsaufkommen unregelmässig weitere Emissionen überlagert werden.

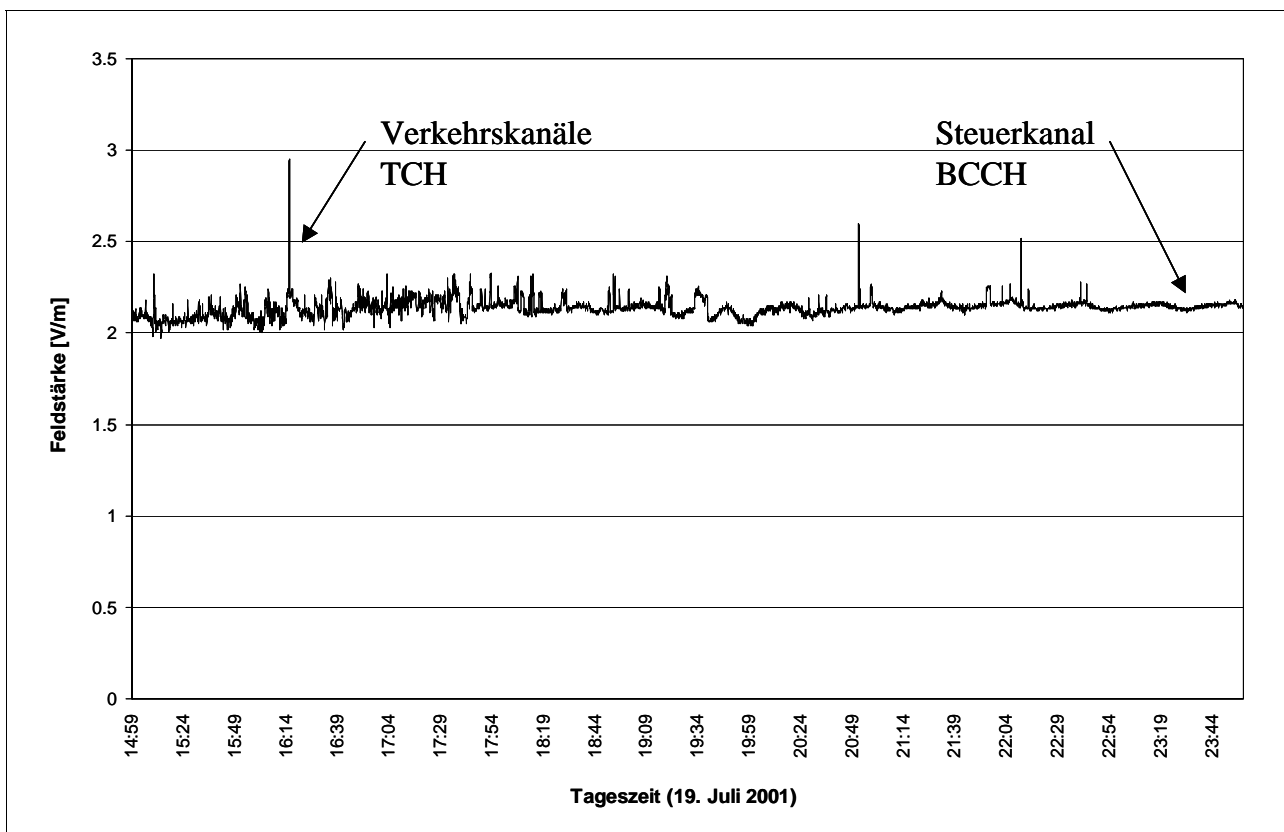


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Immissionen einer Basisstation. Erkennbar sind der ungefähr konstante Steuerkanal (BCCH) und die sporadische Zuschaltung von Verkehrskanälen (aus Wanner 2001).

Das GSM-System war ursprünglich für den Sprachtelefoniedienst ausgelegt. Die steigende Nachfrage nach neuen, schnelleren Datendiensten führte zur Erweiterung des GSM-Standards mit neuen Funktionalitäten wie HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), GPRS (General Packet Radio Service) und EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). Diese Dienste erlauben höhere Datenraten und bilden die Basis für neue, innovative Datenübermittlungen (BAKOM 2001A).

Ein Mobiltelefon im Bereitschaftsmodus empfängt laufend Kontrollsignale von der nächsten Basisstation. Alle 20 bis 60 Minuten sendet das Mobiltelefon selbst ein kurzes Signal an die Basisstation (BAG and BUWAL) .

Die beschriebenen technischen Eigenschaften des GSM-Systems haben zur Folge, dass die Immissionen durch Mobilfunkstrahlung sowohl im Frequenzbereich als auch in Abhängigkeit der Zeit sehr vielfältig und komplex sind.

Tabelle 6: Übersicht über verschiedene Mobilfunktechniken
(aus BAG and BUWAL, BAKOM 2001A, BAKOM 2001B).

	Natel C	GSM 900	GSM 1800
Frequenzbereich [MHz]	890–960	880–915 (up) 925–960 (down)	1710–1785 (up) 1805–1880 (down)
Übertragungsmodus	analog	digital	digital
Art der Strahlung	kontinuierlich	gepulst (217 Hz)	gepulst (217 Hz)
Zellengrösse	2–35 km	0.4–4 km	0.4–4 km
Maximale Sendeleistung pro Frequenzkanal einer Basisstation ¹⁾	10–50 W	300 W	300 W
Maximale Sendeleistung des Mobiltelefons (maximaler zeitlicher Mittelwert, ohne Leistungsregelung)	1 W	0.24 W	0.124 W
Maximaler Pulsspitzenwert	1 W	2 W	1 W

¹⁾ Mobilfunkantennen bündeln die Strahlung in der Regel in einen engen Raumbereich. Bei der Leistungsangabe handelt es sich um die so genannte äquivalente Strahlungsleistung ERP, welche die Strahlungsverhältnisse in der Hauptstrahlungsrichtung charakterisiert.

2.3.3 Mobilfunksysteme in den USA

Es sei hier kurz auf die amerikanischen Systeme der drahtlosen Kommunikation eingegangen, die in vielen Studien untersucht wurden und sich von den europäischen in einigen Aspekten unterscheiden. Mobiltelefone werden in den USA als ‚cellular phones‘ bezeichnet. Grundsätzlich wird dabei zwischen mobilen und handgehaltenen Geräten unterschieden. Telefone, die in den USA als ‚mobile phones‘ bezeichnet werden, besitzen eine externe Antenne, entweder am Auto oder an einem mitgeführten Koffer. Vergleichbar mit den in Europa als Mobiltelefon bzw. in Grossbritannien als ‚mobile phones‘ bezeichneten Geräten sind in den USA nur die handgehaltenen („handheld“) Telefone. In Bezug auf die Strahlungsexposition der telefonierenden Person ist diese Unterscheidung wichtig, wird aber oft nicht berücksichtigt. Die Maximalleistung der handgehaltenen Geräte beträgt 0.6 W. Telefone mit externer Antenne emittieren maximal 3 W, der Kopf ist dabei generell nicht stärker exponiert als andere Körperteile (DREYER et al. 1999B). In den USA verwendet die Mobilkommunikation die Frequenzbereiche 824 –894 MHz und 1850 –1990 MHz.

Die nicht-handgehaltenen Telefone mit externer Antenne sind in den USA wesentlich weiter verbreitet als in Europa. 1994/95 besaßen 40% der Mobiltelefonbenut-

zer ein solches Gerät, 58% ein handgehaltenes Mobiltelefon und 2% beide Typen (DREYER et al. 1999B). Auch analoge Systeme sind stärker verbreitet als in Europa. 1997 operierten immer noch 80% mit der analogen Technik.

2.3.4 Andere drahtlose Kommunikationstechniken

Es gibt eine Reihe weiterer drahtloser Kommunikationstechniken, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, da sie in bisherigen Studien nicht Gegenstand der Untersuchung waren. Zu diesen Techniken gehört das Wireless Local Loop Verfahren (WLL, drahtloser Teilnehmeranschluss). Damit werden Kabelteilnehmeranschlüsse vermehrt durch Funkverbindungen in den Frequenzbändern 3.4 GHz und 26 GHz ersetzt. Weiter wird in der Schweiz derzeit ein zelluläres Sicherheitsfunknetz nach der technischen Norm TETRAPOL für geschlossene Benutzergruppen wie Polizei, SBB, Feuerwehr etc. aufgebaut. Dieses unter dem Namen Polycom bekannte System wird im Bereich von 380–500 MHz arbeiten. Zur Zeit ist in der Schweiz auch der Aufbau von UMTS-Netzen (Universal Mobile Telecommunications System) im Gange. UMTS wird in verschiedenen Frequenzbändern zwischen 1920 und 2170 MHz betrieben werden. Genauere Informationen über die Charakteristik der UMTS Strahlung ist in PEDERSEN and ANDERSEN 1999 und BAKOM 2001B zu finden. Bisher wurde noch keine Studie mit einer Exposition gegenüber UMTS-Strahlung an Menschen durchgeführt.

3 Wechselwirkung von Hochfrequenzstrahlung mit Menschen

3.1 Absorption

Am Anfang jeder biologischen Wirkung von Hochfrequenzstrahlung steht eine primäre Wechselwirkung der Strahlung mit biologischen Strukturen. Die hochfrequente Strahlung versetzt dipolare Moleküle (insbesondere Wasser) in Schwingung. Die Molekülbewegungen führen zu Reibungen im dichten umgebenden Medium und damit zu einer Erwärmung des Gewebes. Dieser Effekt wird beispielsweise beim Mikrowellenofen ausgenutzt.

Bestens untersucht und verstanden ist die Wechselwirkung zwischen Hochfrequenzstrahlung und dem menschlichen Körper, solange dieser als makroskopisches Gebilde ohne detaillierte Feinstruktur betrachtet wird. In diesem Modell ist der menschliche Körper bloss ein verlustbehaftetes Dielektrikum, eine nichtideale Antenne, welche die Strahlung absorbiert und in Wärme umsetzt. Das Ausmass und die Verteilung der Strahlungsabsorption im menschlichen Körper sind jedoch von vielen Faktoren abhängig. Generell gilt, dass die Absorption nicht im ganzen Körper gleichmässig erfolgt, selbst wenn das elektromagnetische Feld völlig homogen ist. Bei Modellierungen werden daher in der Regel zwei Grössen ermittelt: Die vom Körper insgesamt absorbierte Strahlungsleistung und die lokal höchste Absorption. Die Absorption im menschlichen Körper wird in noch viel stärkerem Ausmass lokal unterschiedlich, wenn die Strahlungsquelle selbst sehr kleinräumig ist. Dies ist insbesondere beim Mobiltelefon der Fall, welches beim Gebrauch sehr nahe am Kopf anliegt und praktisch nur im Kopfbereich zu einer Absorption führt.

Im Fernfeld ist die Ganzkörperabsorption dann maximal, wenn die Längsachse des Körpers parallel zum elektrischen Feldvektor steht (REPACHOLI 2001) und wenn der absorbierende Körper oder einzelne Teile davon in ihrer Länge auf die Wellenlänge der Strahlung abgestimmt, d.h. mit der Strahlung in Resonanz sind. Für einen nicht geerdeten ‚Standard-Referenzmensch‘ beträgt die Ganzkörper-Resonanzfrequenz ungefähr 70 MHz, bei Kleinkindern liegt sie höher und kann bei über 100 MHz liegen (ICNIRP 1998).

Die Intensität der Strahlung ist an der Peripherie des Körpers am höchsten und nimmt infolge der Absorption gegen das Körperinnere ab. Quantitativ wird dies durch die so genannte Eindringtiefe beschrieben. Dies ist definitionsgemäss derjenige Abstand, bei dem die Intensität der Strahlung auf den Wert $1/e$ (entsprechend 37%) abgenommen hat. Die Eindringtiefe nimmt mit zunehmender Frequenz ab, bis bei Frequenzen oberhalb von ca. 10 GHz die Strahlung, ähnlich wie Wärmestrahlung, praktisch vollständig an der Oberfläche absorbiert wird. Die Eindringtiefe im menschlichen Körper beträgt bei einer Frequenz von 30 MHz etwa 12 cm und bei 1 GHz etwa bei 4 cm (BUCHBERGER 1983). In wasserarmem Gewebe oder Material kann sie rund 10 Mal höher sein. Es kann vorkommen, dass die Intensität gegen die Körpermitte nicht kontinuierlich abnimmt sondern infolge von Fokussierungen lokal erhöht ist (so genannte ‚hot spots‘).

In Bezug auf die Energieabsorption durch den menschlichen Körper kann hochfrequente Strahlung in vier Frequenzbereiche eingeteilt werden (ICNIRP 1998):

1. 100 kHz bis 20 MHz: Mit abnehmender Frequenz nimmt die Absorption im Rumpf stark ab und die grössten Absorptionen treten im Hals und an den Füßen auf.
2. 20 MHz bis 300 MHz: Resonanzbereich. Relativ hohe Absorption kann im ganzen Körper auftreten und insbesondere bei der Resonanzfrequenz an einigen Körperstellen lokal erhöht sein.
3. 300 MHz bis mehrere GHz: Es können signifikante lokale, nicht-uniforme Absorptionen auftreten.
4. >10 GHz: Energieabsorption findet hauptsächlich an der Körperoberfläche statt.

Als quantitatives Mass für die Absorption von Strahlung im menschlichen Körper wird die spezifische Absorptionsrate (SAR), in Watt pro kg Körpergewicht, verwendet. Die SAR ist proportional zur Leistungsflussdichte bzw. proportional zum Quadrat der Feldstärke und ist in erster Linie abhängig von den dielektrischen Eigenschaften des Gewebes (DIMBYLOW and MANN 1999). Sie wird entweder als lokale SAR – in diesem Fall gemittelt über 10 g Gewebe (SAR_{10}) (ICNIRP 1998), teilweise auch noch kleinräumiger, gemittelt über 1 g Gewebe (SAR_1) (ANSI/IEEE-C95.1 1992) – oder als Ganzkörper-SAR angegeben. Die Ganzkörper-SAR ist als Mittelwert über den ganzen Körper zu verstehen.

In der Praxis kann die SAR nur aufwändig experimentell oder mit komplexen numerischen Modellen berechnet werden. Am gängigsten ist die Berechnung mit der FDTD-Methode (finite Differenzen-Methode) basierend auf anatomischen Modellen (GANDHI et al. 1999). Insbesondere bei Nahfeldbedingungen (z.B. der Exposition durch ein Mobiltelefon) können lokal grosse Unterschiede auftreten, die nur mit Modellen quantifiziert werden können. Trotz der beschriebenen Schwierigkeiten wird heute die SAR, lokal oder als Ganzkörpermittelwert, bei experimentellen Untersuchungen in der Regel bestimmt und in den Untersuchungsberichten angegeben.

Die Absorption von Strahlungsleistung führt im menschlichen Körper zu einem Temperaturanstieg. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine über den Körper gemittelte Absorption von 4 W/kg während 30 Minuten zu einer Erwärmung um 1°C führt (ICNIRP 1998). Dies ist der Schwellenwert, welcher den ICNIRP-Grenzwerten zugrunde liegt (siehe Kapitel 5.2).

Ein Spezialfall der Strahlungsabsorption ist das so genannte Mikrowellen-Hören. Es ist bekannt, dass sehr kurze, intensive Strahlungspulse von Radaranlagen als Geräusch wahrgenommen werden können (siehe Kapitel 7.1.5). Ursache ist in diesem Fall eine thermoelastische Welle, die sich nach der Absorption eines Pulses im Körper ausbreitet und vom Hörorgan als klickendes Geräusch wahrgenommen wird. In diesem Fall ist die spezifische Absorptionsrate SAR nicht mehr das geeignete dosimetrische Mass, sondern die pro Puls absorbierte Energie, ausgedrückt als spezifische Absorption SA in J/kg.

3.2 Induzierung von elektrischen Strömen

Neben der Strahlungsabsorption ist die Induzierung von elektrischen Strömen im Körper ein weiterer Primäreffekt im Rahmen der makroskopischen Betrachtung. Zeitlich ändernde Magnetfelder durchdringen den Körper beinahe ungehindert und induzieren im Körper einen elektrischen Strom. Die Induktion ist nur im Frequenzbereich unter 10 MHz von Bedeutung (ICNIRP 1998), betrifft somit im vorliegenden Kontext nur Lang-, Mittel- und teilweise Kurzwellensender.

Elektrische Ströme im Körper können zu einer Stimulation von Nerven- und Muskelzellen führen, wie dies von Unfällen mit elektrischem Strom ausreichend bekannt ist.

Wie die Strahlungsabsorption kann die Induzierung heute numerisch modelliert werden. Dabei werden zwar sowohl die Form des Körpers als auch dessen anatomischer Aufbau (Knochen, Muskeln, Fett, Blut etc.) berücksichtigt, allfällige spezifische Wechselwirkungen der Strahlung auf zellulärer oder molekularer Ebene bleiben jedoch unberücksichtigt.

3.3 Andersartige Wechselwirkungen im Niedrigdosisbereich

Seit langem wird in wissenschaftlichen Kreisen intensiv diskutiert, ob noch andere als die genannten Primärwirkungen möglich sind. Hinweise dafür liefern verschiedene experimentelle Befunde, die mit dem makroskopischen Wärmemodell und der Strominduktion nicht erklärt werden können.

Es wird angenommen, dass biologische oder gesundheitliche Effekte, die unterhalb der Schwelle einer relevanten Temperaturerhöhung auftreten, durch einen nicht-thermischen Wirkungsmechanismus verursacht sein müssen. Teilweise werden solche Wirkungen auch als athermisch oder ‚biologisch‘ bezeichnet. Unabhängig vom zugrunde liegenden Wirkungsmechanismus können solche Effekte als Niedrigdosiseffekte bezeichnet werden.

Um Effekte von schwacher hochfrequenter Strahlung zu erklären, sind einige Wirkungsmechanismen vorgeschlagen worden, die im Wesentlichen auf dem nichtlinearen Verhalten von biologischen Systemen beruhen. (z.B. HABERLAND 1999, GLASER 1998, HYLAND 2000, KAISER 1996, REPACHOLI 1998). Es ist aber auch denkbar, dass Wirkungen im Niedrigdosisbereich durch mikrothermische Mechanismen verursacht sein können. Das bisherige SAR-Konzept beruht auf einem makroskopischen Ansatz. Da jedoch das menschliche Gewebe nicht homogen ist, kann es möglicherweise trotz eines Temperaturgleichgewichtes auf makroskopischer Ebene im mikroskopischen Massstab, beispielsweise auf Zellniveau, zu einem Wärmeungleichgewicht kommen (z.B. FRENCH et al. 2001).

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass keiner der bisher vorgeschlagenen Mechanismen experimentell verifiziert die Wirkungen schwacher hochfrequenter Strahlung erklären kann. Das Fehlen eines etablierten Wirkungsmodells macht eine vergleichende Bewertung verschiedener Untersuchungen schwierig bis unmöglich, insbesondere wenn die Expositionsbedingungen sehr unterschiedlich sind.

Ein Beispiel mag dies veranschaulichen: Im Rahmen des thermischen Modells ist nur die zeitlich gemittelte SAR von Interesse, weil die Wärmeregulation des Menschen im Vergleich zu Modulationen und Pulsierungen der Strahlung sehr langsam ist. Falls jedoch andere biologische Strukturen und physiologische Prozesse mit kürzeren Zeitkonstanten bei der primären Wechselwirkung eine Rolle spielen, müsste nicht auf die zeitlich gemittelte, sondern eher auf die momentane, maximale Belastung abgestellt werden.

4 Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung

4.1 Expositionsabschätzungen in Studien am Menschen

Die Expositionsabschätzung ist ein zentrales Element sowohl in epidemiologischen als auch in experimentellen Studien.

In experimentellen Studien erfolgt die Exposition kontrolliert. Fremdeinflüsse werden so weit als möglich ausgeschlossen. Charakteristisch für experimentelle Studien an Menschen ist, dass aus praktischen Gründen nur relativ kurzzeitige Expositionen untersucht werden können. Aus ethischen Gründen ist die Höhe der Belastung so ausgelegt, dass keine gravierenden gesundheitlichen Effekte auftreten können. Experimentelle Studien an Menschen sind deshalb ungeeignet, um krankmachende Wirkungen eines Agens zu untersuchen. Hingegen können unmittelbare physiologische Reaktionen des Körpers unter standardisierten und reproduzierbaren Bedingungen untersucht werden.

In epidemiologischen Studien werden Expositionsunterschiede zwischen verschiedenen Personengruppen in ihrem normalen Alltagsleben erhoben und mit beobachteten Effekten in Beziehung gesetzt. Da alle Personen mehr oder weniger exponiert sind, ist eine grobe Unterscheidung in ‚exponiert‘ versus ‚nicht exponiert‘ oft nicht sinnvoll. Ziel einer Expositionsabschätzung ist deshalb eine valide Zuordnung von unterschiedlich exponierten Personen zu verschiedenen Expositionsklassen. Dabei spielt für die statistische Aussagekraft der Studie weniger die genaue Höhe der Belastung in den einzelnen Klassen eine Rolle, sondern vielmehr, dass eine korrekte Unterscheidung zwischen den einzelnen Expositionsklassen besteht und dass alle Personen einer Studie in die Klasse eingeteilt werden, die ihrer Exposition entspricht. Im Hinblick auf den Schutz der Bevölkerung und der Festlegung von Grenzwerten ist das korrekte Expositionsniveau dann jedoch von Bedeutung.

Generell wünschenswert wäre die Expositionsklassierung aller in einer epidemiologischen Studie eingeschlossenen Personen aufgrund ihrer lebenslangen bisherigen Exposition. Aus praktischen Gründen ist dies jedoch nicht möglich. Schon allein die Tatsache, dass eine Wechselwirkung zwischen dem Menschen und dem elektromagnetischen Feld stattfindet, schränkt die Möglichkeit persönlicher Expositionsmessungen stark ein. Deshalb wurden verschiedene andere, praktisch durchführbare Techniken für die Expositionsabschätzung entwickelt. In erster Linie unterscheidet man zwischen retrospektiver und prospektiver Expositionserfassung. In prospektiven Studien erfolgt die Auswahl der Studienteilnehmer zu Studienbeginn, bevor eine Krankheit auftritt. Dies erlaubt es, die Exposition der Studienteilnehmer über einen gewissen Zeitraum zu überwachen, sei es durch Messungen an Orten, wo sich die Personen häufig aufhalten, oder durch Tagebuchprotokolle, kombiniert mit Berechnungen oder Messungen. Prospektive Studien sind aber ungeeignet für die Untersuchung von seltenen Krankheiten und/oder Krankheiten mit langen Latenzzeiten, da dies ein sehr grosses Studienkollektiv bzw. eine lange Studiendauer erfordern würde. Aus diesem Grund sind viele epidemiologische Studien retrospektiv angelegt, insbesondere Studien zu kanzerogenen Wirkungen. Fall-Kontrollstudien sind typischerweise retrospektiv, Kohortenstudien können sowohl retrospektiv als auch prospektiv sein.

Bei retrospektiven Studien ergibt sich das Problem, dass häufig keine Expositionsmessungen zur Verfügung stehen. Als Expositionsmasse werden deshalb an Stelle von Messwerten oft geeignete Stellvertretergrößen verwendet. Typische solche Expositionsindikatoren sind die Berufsbezeichnung (z.B. Funker, Fernmeldetechniker), die Distanz zu einer Quelle (z.B. Radiosender, Hochspannungsleitung), die Häufigkeit des Gebrauchs bestimmter Geräte, etc. Diese Angaben werden meistens durch Befragungen erhoben. Teilweise können sie auch aus Registerdaten hergeleitet werden. Häufig wird die Exposition aus der Kombination verschiedener solcher Indikatoren geschätzt. Sehr populär ist beispielsweise im niederfrequenten Bereich der so genannte Verkabelungscode (wire code), der die Exposition durch Magnetfelder von Hochspannungsleitungen halbquantitativ beschreibt. Solche Indikatoren haben den Nachteil, dass die absolute Höhe der Strahlungsbelastung oft nicht bekannt ist oder nur rudimentär abgeschätzt werden kann. Die Ableitung einer quantitativen Expositions-Wirkungsbeziehung ist daher auf dieser Basis nur approximativ möglich. Die Zuverlässigkeit einer Studie ist durch diesen Umstand allein aber nicht beeinträchtigt. Wie oben erwähnt ist das Hauptkriterium, ob es gelingt, die relevanten Expositionsunterschiede im Studienkollektiv durch solche Indikatoren darzustellen und eine entsprechende Expositionsklassierung vorzunehmen. Je schlechter ein Indikator die Exposition repräsentiert, desto eher wird ein allfällig real vorhandener Effekt verwischt und daher nicht erkannt (siehe Kapitel 6.3).

4.2 Vergleich von Expositionssituationen

Menschen sind in ihrem Alltag hauptsächlich vier typischen Quellen von Hochfrequenzstrahlung ausgesetzt: Mobilfunkbasisstationen, Mobiltelefonen, schnurlosen Telefonen (DECT) und Radio-/TV-Sendern. Diese Expositionen weisen einige Gemeinsamkeiten auf, sind aber auch durch einige Unterschiede charakterisiert, die für die Beurteilung und den Vergleich von Studienergebnissen wichtig sind. Im folgenden sind diese Expositionssituationen näher erläutert.

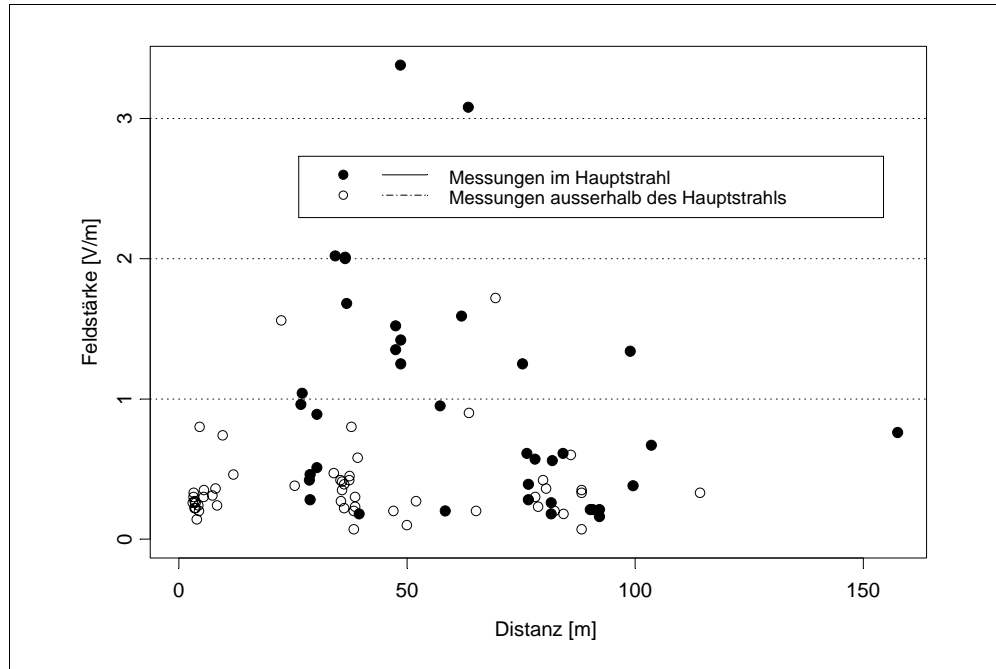
4.2.1 Exposition gegenüber der Strahlung von Mobilfunkbasisstationen

Typischerweise führt die Strahlung von Mobilfunkbasisstationen zu einer Ganzkörperexposition im Fernfeld. Aufgrund der Signalaustastung zwischen den einzelnen Zeitschlitzten ist sie beim heute üblichen GSM System mit 1734 Hz gepulst, wobei die Amplitude variabel ist (zur genaueren Charakteristik der Strahlung siehe auch Kap. 2.3). Die Strahlung von Mobilfunkbasisstationen ist permanent vorhanden, schwankt jedoch in Abhängigkeit vom Gesprächsverkehr. Die Intensität ist niedrig (<6 V/m), typischerweise beträgt sie im Hauptstrahl in der Nähe einer Anlage etwa $0.5 - 1$ V/m (RAMSDALE and WIENER 1999). Dies korrespondiert mit einer körpergemittelten SAR von 0.003 bis 0.01 mW/kg und einer maximalen lokalen SAR im Kopf von 0.06 bis 0.2 mW/kg (siehe Tabelle 16). In Innenräumen kann die Strahlung räumlich sehr inhomogen sein.

Ein untaugliches Mass für die Charakterisierung der Exposition durch Mobilfunkbasisstationen ist deren Distanz zum Aufenthaltsort von Personen. Dies zeigt eine Untersuchung von WANNER (2001) in der Region Basel (RÖÖSLI et al. 2002B). An mehreren Standorten wurden mit einem Breitbandmessgerät (100 kHz-3 GHz) Messungen der elektrischen Feldstärke durchgeführt. Obschon mit einem solchen Gerät nicht nur die Strahlung von Mobilfunkbasisstationen, sondern auch diejenige von anderen Strahlungsquellen in diesem Frequenzbereich erfasst wird, wurden solche Fremdeinflüsse durch geeignete Standortauswahl so weit als möglich ausgeschlossen. Die gemessenen Feldstärken betragen an den Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) maximal 3.4 V/m und lagen damit unterhalb des schweizerischen Anlagegrenzwertes. Die Messungen haben gezeigt (siehe Abbildung 4), dass kein Zusammenhang zwischen der Feldstärke und der Distanz zur Basisstation besteht (Korrelation: -0.03). Dies ist hauptsächlich auf zwei Umstände zurückzuführen. Erstens sind die Sendeleistungen verschiedener Basisstationen um bis zu drei Grössenordnungen verschieden. Zweitens senden die Mobilfunkantennen in eine bevorzugte Richtung (Hauptstrahl). Ausserhalb dieser Hauptstrahlrichtung sind die Leistungsflussdichte und damit auch die elektrische Feldstärke bei gleichem Abstand von der Antenne deutlich niedriger. Weiter spielen Reflexionen und Strahlungsdämpfung durch die Gebäudehülle eine Rolle.

SCHÜZ and MANN 2000 führten in 9 zufällig ausgewählten Haushalten in der Stadt Mainz frequenzselektive Messungen durch und bestimmten den Anteil der Mobilfunkstrahlung und anderer Quellen an der Gesamtbelastung. An den 9 Standorten wurden für den Frequenzbereich 100 kHz–2.9 GHz Feldstärken von 0.108 bis 0.479 V/m gemessen. Die Strahlung von den Basisstationen allein führte zu elektrischen Feldstärken von 0.012 bis 0.343 V/m. An drei Standorten waren dies die Hauptmittelen, an vier Standorten stammte der grössere Anteil der Hochfrequenzstrahlung von Radiosendern und an 2 Standorten von Flugzeugradars. Analoge Ergebnisse ergaben frequenzselektive Messungen an 15 Standorten in der Region Basel (siehe Abbildung 5), KLAUS 2002) und an 38 Messorten in der Stadt Turin (ANGLESIO et al. 2001).

Abbildung 4:
Messung der Immissionen von Mobilfunkbasisstationen an 91 Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) in der Region Basel (aus WANNER 2001), separiert für Messorte im Hauptstrahl und ausserhalb davon. Als ‚im Hauptstrahl‘ werden diejenigen Richtungen betrachtet, in denen gemäss Antennendiagramm die gesamte Richtungsabschwächung (Azimut und Elevation) <5 dB beträgt.



4.2.2 Exposition gegenüber der Strahlung von Mobiltelefonen

Die Exposition beim mobilen Telefonieren unterscheidet sich in mehreren Aspekten von der Exposition gegenüber einer Basisstation. Telefoniert man mit einem Mobiltelefon, so ist hauptsächlich die Kopfseite, an der das Mobiltelefon gehalten wird, einem starken Feld ausgesetzt.

Von der Strahlung des Mobiltelefons werden rund 30%-50% im Kopf und knapp 15% in der Hand absorbiert. Der Rest dient der eigentlichen Datenübertragung (GANDHI et al. 1999, GANDHI et al. 2001). Von der im Kopf absorbierten Strahlung werden rund 15–20% im Gehirn absorbiert. Beim Telefonieren mit einem Telefon einer Leistung von 0.6 W beträgt die maximale Feldstärke an der Schädeloberfläche rund 50 V/m (KING 2000) (siehe Tabelle 7). Bei GSM-Telefonen beträgt die durchschnittliche Sendeleistung maximal 0.25 W bzw. 0.125 W. Während des Pulses ist sie achtmal höher. Bei diesen Werten handelt es sich um Maximalwerte bei schlechten Empfangsbedingungen. Bei guten Empfangsverhältnissen reduziert das Mobiltelefon die Sendeleistung (siehe Kap. 2.3)

Tabelle 7: Berechnete maximale Feldstärke am Kopf und im Gehirn durch ein Mobiltelefon mit 0.6 W Sendeleistung und einer Frequenz von 838 MHz (aus KING 2000).

Tiefe [cm]	Feldstärke [V/m]
0	50.0
1	27.0
2	19.0
3	13.5
5	6.8
7	3.5

Berechnete lokale Höchstwerte der SAR für besonders exponierte Bereiche des Kopfes, bezogen auf 10 g Gewebe, liegen für verschiedene Mobiltelefone zwischen 0.1 und 2.3 W/kg (siehe Tabelle 8), bezogen auf 1 g Gewebe sind sie rund 2 bis 3 Mal höher (GANDHI et al. 1999). Die SAR ist im Kopf sehr inhomogen verteilt. Die höchsten SAR-Werte treten in der Ohrmuschel auf, an welcher das Telefon gehalten wird. Bei einer Frequenz von 900 MHz sind die SAR-Werte an der Hirnhaut bereits 4 Mal kleiner, im Gehirn 8 Mal kleiner und in der Zirbeldrüse (etwa Kopfmittle) 250 Mal kleiner (DIMBYLOW and MANN 1999). Bei höherer Frequenz (z.B. 1800 MHz) findet eine stärkere Strahlungsabsorption statt. Das hat zur Folge, dass der Unterschied der SAR zwischen äusseren und inneren Regionen des Kopfes noch grösser ist.

Tabelle 8: Gemessene und berechnete Werte aus der Literatur für die maximale SAR₁₀ im Kopf durch Mobiltelefone.

Sendeleistung (zeitlicher Mittelwert) [W]	Frequenz [MHz]	Max. SAR ₁₀ im Kopf [W/kg]	Quelle
1	900 1800	2.1 2.3	DIMBYLOW and MANN 1999
0.6	835	1.08–1.41	GANDHI et al. 1999
0.31 0.12	835 1800	0.87 0.78	GANDHI et al. 2001
0.125–0.25 ¹⁾	¹⁾	0.53–1.45	VOGEL 2001
0.125	1900	0.42–0.59	GANDHI et al. 1999
0.06	900	0.15 (Haut) 0.07 (Gehirn)	WIART et al. 2000

¹⁾ keine Angaben, es handelt sich um marktübliche GSM-Telefone.

Resultate von numerischen Modellierungen der Temperaturerhöhung im Kopf durch ein Mobiltelefon unter Berücksichtigung der emittierten Strahlung des Telefons und der Wärmeabgabe des Akkus sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Berech-

nungen wurden für die gemäss ICNIRP-Richtlinie (ICNIRP 1998) zulässige SAR₁₀ und die gemäss ANSI/IEEE (ANSI/IEEE-C95.1 1992) zulässige SAR₁ durchgeführt. Der Körper versucht, die Temperaturerhöhung, die durch die Hochfrequenzstrahlung und die Wärmeabgabe des Akkus entsteht, zu kompensieren. Dies erfolgt vorab durch die Veränderung des Blutflusses. Es bildet sich ein thermisches Gleichgewicht, bei dem sich die zugeführte Energie und die durch Thermoregulation vermehrt abgeführte Energie die Waage halten. Im Ohr stellt sich ein solches Gleichgewicht bereits nach 5 bis 6 Minuten ein, wobei die Erwärmung bis zu 4.5°C beträgt und hauptsächlich auf die Abwärme des Akkus zurückzuführen ist. Im Gehirn beträgt die Temperaturerhöhung im Gleichgewicht zwischen 0.13°C bis 0.19°C. Das Gleichgewicht stellt sich hier erst nach 20 bis 30 Minuten ein. Abhängig von der Frequenz gehen 20–50% der Temperaturerhöhung auf die Hochfrequenzstrahlung, der Rest auf die Abwärme des Akkus zurück.

Tabelle 9: Sendeleistung eines Mobiltelefons (zeitlicher Mittelwert), die im Kopf eine vorgegebene maximale lokale SAR erzeugt, und die daraus resultierende maximale Temperaturerhöhung ΔT in verschiedenen Organen des Kopfs. In Klammern sind die Werte für die Erwärmung durch die Hochfrequenzstrahlung allein, ohne Berücksichtigung der Wärmeabgabe des Akkus, angegeben (aus GANDHI et al. 2001).

Maximale lokale SAR	835 MHz			1900 MHz				
	Sendeleistung (mW)	Temperaturerhöhung ΔT (Grad)			Sendeleistung (mW)	Temperaturerhöhung ΔT (Grad)		
		Ohr	Gehirn	Auge		Ohr	Gehirn	Auge
SAR ₁ : 1.6 W/kg, gemittelt über 1 g (Grenzwert gemäss ANSI/IEEE-C95.1 1992)	310	4.466 (0.089)	0.143 (0.045)	0.213 (0.011)	121	4.464 (0.076)	0.128 (0.026)	0.211 (0.003)
SAR ₁₀ : 2.0 W/kg, gemittelt über 10 g (Grenzwert gemäss ICNIRP 1998)	709	4.472 (0.203)	0.189 (0.103)	0.215 (0.025)	311	4.469 (0.196)	0.144 (0.068)	0.212 (0.008)

In der Praxis kann die Strahlungsbelastung durch den Gebrauch eines Mobiltelefons individuell sehr unterschiedlich sein. Balzano 1999 analysierte die verschiedenen Einflussfaktoren für die persönliche Strahlungsbelastung des Kopfes und fand für die Exposition (SAR) folgende Streubereiche:

- Wahl des Telefonmodelles: Faktor 20
- Differenz zwischen Kopfseiten (Seite wo telefoniert wird zu Gegenseite): Faktor 10
- Position des Mobiltelefons am Kopf: Faktor 10
- Ausziehen der Antenne: Faktor 5
- Variation von Kopfform und -grösse: Faktor 2
- Variation durch Leistungsregelung (kurzfristig): Faktor 100

Im Hinblick auf die Expositionsabschätzung in epidemiologischen Studien kann daraus geschlossen werden, dass die tägliche Dauer des Telefongebrauchs, wie sie

in vielen Studien als Expositionsmass verwendet wird, die tatsächliche Strahlungsexposition nur grob widerspiegelt. Eine Missklassifikation ist unvermeidlich, es gibt aber keinen Grund anzunehmen, dass diese in Bezug auf Gesundheitssymptome systematisch unterschiedlich erfolgt und dadurch das Resultat einseitig verzerrt (siehe Kapitel 6.4). Eine nichtsystematische Missklassifikation hat eine Unterschätzung einer allfälligen wahren Expositions-Wirkungsbeziehung zu Folge.

Bei Mobiltelefonen ist weiter die Tatsache zu berücksichtigen, dass neben hochfrequenter Strahlung auch ein niederfrequentes Magnetfeld emittiert wird (HAMBLIN and WOOD 2002). Das niederfrequente Magnetfeld ist die Folge variierender Stromabgabe der Batterie, die sich infolge der Pulsmodulation und der Leistungsregelung ergibt. ANDERSEN and PEDERSEN 1997 bezifferten die Magnetflussdichte in unmittelbarer Nähe des Telefons mit rund $7.5 \mu\text{T}$, hauptsächlich bei der Frequenz von 8 Hz. LINDE and MILD 1997 massen mit einer Breitbandsonde (40–800 Hz) in einer Distanz von 1.6 cm zum Mobiltelefon zeitlich gemittelte Magnetflussdichten von 0.1 bis $1.6 \mu\text{T}$. Aufgrund der zeitlichen Magnetfeldschwankungen durch die Pulsierung schätzten sie daraus einen maximalen Spitzenwert von $5.2 \mu\text{T}$ ab.

4.2.3 Schnurlostelefone

Bei Schnurlostelefonen findet die Kommunikation zwischen dem Telefonhörer und einer Ladestation per Funk statt. Die Reichweite liegt bei maximal rund 300 Metern. Die maximale Sendeleistung des Telefonhörers ist deshalb niedriger als beim Mobiltelefon. Der heute übliche DECT-Standard verwendet eine Frequenz von rund 1850 MHz. Die Strahlung ist mit 100 Hz gepulst und hat eine Pulsdauer von 360 μs , d.h. die Pulsleistung liegt um das 30-Fache über der mittleren Leistung. Die maximale Leistung des Telefonhörers beträgt während des Pulses 250 mW, die zeitlich gemittelte Leistung also weniger als 10 mW. Die daraus beim Telefonieren resultierende, lokal maximale spezifische Absorptionsrate (SAR_{10}) wird als kleiner als 0.1 W/kg geschätzt (BFS 2002). Die Ladestationen der DECT-Telefone senden permanent, unabhängig davon, ob telefoniert wird oder nicht. Exemplarische Messungen in einem Büro in 0.2 bis 4.0 m Abstand von einer DECT-Ladestation ergaben während des Pulses Feldstärken (inkl. Messunsicherheit) von 1.4–6.1 V/m, in einem Wohnraum in Distanzen von 0.4 bis 3 m wurden 1.2–8.0 V/m gemessen (KARUS 2002). Die mittlere Feldstärke (Effektivwert; ohne Zuschlag der Messunsicherheit) liegt damit im Büro zwischen 0.13 und 0.56 V/m, im Wohnraum zwischen 0.11 und 0.73 V/m. Die gemessenen Werte waren in Nebenräumen maximal so gross wie die tiefsten Werte im Raum mit der Ladestation.

4.2.4 Exposition gegenüber der Strahlung von Radio- und TV-Sendern

Die Strahlung von Radio- und Fernsehsendern unterscheidet sich von der Mobilfunkstrahlung in erster Linie durch die Frequenz und die Modulation (Tabelle 5). Die Frequenzbänder von Radio- und Fernsehsendern sind tiefer als diejenigen von Mobilfunkbasisstationen, bei Lang- und Mittelwellensendern um mehr als drei Grössenordnungen. Das führt auch dazu, dass Fernfeldbedingungen erst in wesent-

lich grösserer Distanz zur Quelle erreicht werden. Die komplexen Nahfeldbedingungen und der Umstand, dass die Strahlung in grosser Höhe über Boden emittiert wird, führen dazu, dass die höchsten Feldwerte oft nicht in unmittelbarer Nähe des Sendeturms auftreten. DAHME 1999 zeigt ein Beispiel, bei dem die höchsten Strahlungswerte erst in einer Distanz von 50 bis 150 m zu einem Hochfrequenz-Sendeturm (11–22 MHz) auftraten. CHERRY 2000 zitiert die Expositionsverhältnisse in der Umgebung eines UHF-Rundfunksenders. Die Leistungsflussdichte durchläuft mit zunehmender Distanz vom Sender mehrere Maxima und Minima, so dass nur eine geringe Korrelation zwischen Exposition und Distanz vorhanden war. DOLK et al. 1997B stellen fest, dass die gemessenen Feldstärkewerte um den TV- und Radiosender Sutton Coldfield erst ab 6 km kontinuierlich mit der Distanz abnahmen. Näher zum Sender waren die Messwerte sehr variabel und unabhängig von der Distanz. Im Abstand von 10 km vom Sender betrug die Leistungsflussdichte rund einen Fünftel bis einen Zehntel des Maximalwertes, die Feldstärke demzufolge ungefähr die Hälfte bis ein Drittel.

Ein weiterer Unterschied zwischen Radio-/TV-Senderstrahlung und – zumindest dem digitalen – Mobilfunk ist die Art der Modulation. Erstere sind hauptsächlich amplituden- oder frequenzmoduliert, während der digitale Mobilfunk (GSM) gepulste Strahlung einsetzt. Analoges Mobilfunk (NATEL C) verwendete demgegenüber kontinuierliche, frequenzmodulierte Strahlung.

Die Feldstärken um Radio- und TV-Sender können sehr unterschiedlich sein. Spitzenwerte, hauptsächlich um AM-Sender, dürften bis 100 V/m erreichen. Typischerweise treten in der Umgebung jedoch Werte im Bereich von einigen V/m auf (DAHME 1999, MANTIPLY et al. 1997).

Auf der Basis einer umfassenden Literaturanalyse schätzten MANTIPLY et al. 1997 die Strahlungsbelastung der amerikanischen Bevölkerung ab. Sie untersuchten die Frequenzbereiche von amplitudenmodulierten (AM) und frequenzmodulierten (FM) Radiosendern, sowie die drei Frequenzbänder von Fernsehsendern. Sie fanden, dass rund 3% der städtischen amerikanischen Bevölkerung Feldstärken höher als 1 V/m ausgesetzt sind, welche durch AM-Radiosender verursacht werden. Die städtische Medianexposition durch AM-Sender wurde auf 0.28 V/m geschätzt, die Hintergrundstrahlung durch FM-Sender in amerikanischen Städten auf rund 0.1 V/m. Rund 0.5% der städtischen Bevölkerung ist höher als 2 V/m exponiert. Durch das tiefste Frequenzband von Fernsehsendern (54–88 MHz) sind rund 16% der städtischen Bevölkerung höher als 0.1 V/m exponiert und 0.1% höher als 2 V/m. Das höhere Fernseh-Frequenzband (174–216 MHz) führt bei 32% der Bevölkerung zu einer Exposition höher als 0.1 V/m und bei 0.005% zu einer Exposition höher als 2 V/m. Fernsehsender im Ultrahochfrequenzbereich (470–806 MHz) führen bei 20% der städtischen amerikanischen Bevölkerung zu einer Belastung von mehr als 0.1 V/m und bei 0.01% zu einer solchen über 1 V/m.

Messungen an verschiedenen Orten in der Stadt Basel ergaben für die Strahlung von Radiosendern eine Feldstärke bis maximal 0.11 V/m (KLAUS 2002). Für die

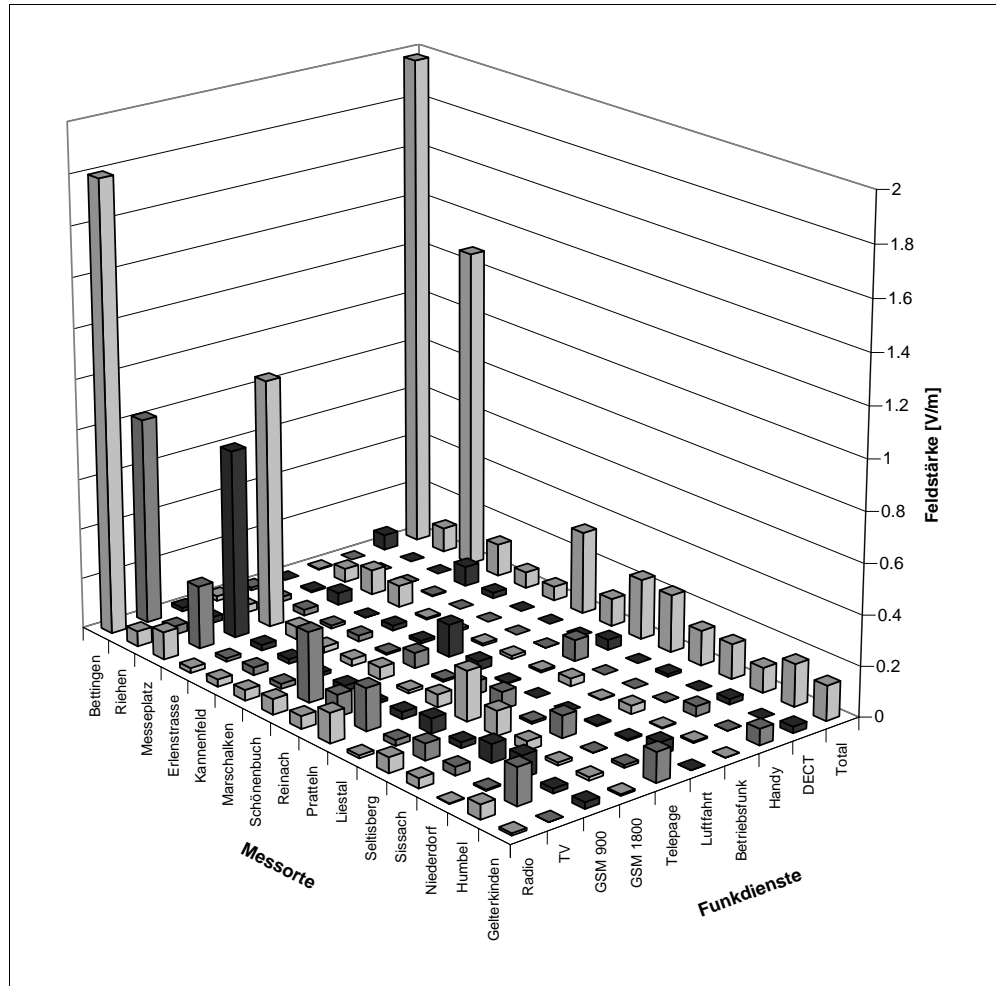
Strahlung von Fernsehsendern wurde maximal 0.25 V/m gemessen. In Bettingen, in unmittelbarer Nähe des Sendeturms St. Chrischona, wurde 1.8 V/m für die Radiostrahlung und 0.82 V/m für die Fernsehstrahlung gemessen (siehe Abbildung 5).

Die Sendeleistung von Radio- und TV-Sendern liegt im Bereich von wenigen Watt bis zu mehreren hundert Kilowatt pro Sender. Alle Sender auf einem Sendeturm können zusammen unter Umständen eine Leistung von mehr als einem Megawatt aufweisen. Diese Sendeleistung ist deutlich höher als diejenige von Mobilfunkbasisstationen. Das bedeutet, dass um solche Radio-/TV-Sendetürme ein viel grösseres Gebiet erhöht exponiert ist als um Basisstationen. Mit groben Berechnungen schätzen RAMSDALE and WIENER 1999, dass in einer Distanz von rund 7 km zu einem Fernsehsender mit einer Leistung von einem Megawatt, bei freier Raumausbreitung, die Feldstärke rund 0.8 V/m beträgt. Die gleiche Feldstärke wäre bei einer Mobilfunkantenne mit einer Sendeleistung von 500 Watt (ERP) im Hauptstrahl bereits in 200 m Distanz zu erwarten, ausserhalb des Hauptstrahls in noch kleinerem Abstand.

4.2.5 Vergleich von typischen Expositionssituationen im Hochfrequenz-Bereich

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse von Hochfrequenz-Immissionsmessungen an 15 Standorten in der Region Basel. Mit Ausnahme der Standorte ‚Bettingen‘ und ‚Messeplatz‘ handelt es sich um Standorte ohne leistungsstarke Sendeanlagen in unmittelbarer Nähe. Bettingen befindet sich in der Nähe des TV-/Radiosenders St. Chrischona und der Messeplatz in der Nähe von verschiedenen Mobilfunkbasisstationen. Es ist ersichtlich, dass an den Hintergrundstandorten die Feldstärke zwischen 0.1 und 0.33 V/m liegt; im Mittel bei 0.15 V/m. TV- und Radiosender liefern den grössten Beitrag zur Hintergrundstrahlung. Der zweitgrösste Beitrag stammt von Mobilfunkbasisstationen.

Abbildung 5:
Elektrische Feldstärke im
Hochfrequenzbereich an
15 Standorten in der
Region Basel, separiert
nach den verschiedenen
Emissionsquellen (aus
KLAUS 2002).



Bei der Bewertung biologisch/medizinischer Studien sind insbesondere Unterschiede in den Expositionsbedingungen zwischen Mobilfunkbasisstation, Mobiltelefon und Radio-/TV-Sendern zu beachten. Diese sind in Tabelle 10 festgehalten. Beim Telefonieren ist die Belastung des Kopfes sehr hoch, im Fernfeld von Sendeanlagen ist die Strahlungsintensität deutlich tiefer, dafür ist der ganze Körper exponiert. Zudem erfolgt die Exposition gegenüber der Strahlung von Sendeanlagen quasi permanent, insbesondere auch während des Schlafes oder Erholungsphasen. Beim Mobiltelefonieren erfolgt die Belastung fast nur während des Telefonates. Expositionen durch DECT-Schnurlostelefone sind insofern mit dem GSM Mobilfunk vergleichbar, als die Strahlung ebenfalls gepulst ist, die Exposition durch die Ladestation permanent, diejenige durch den Telefonhörer nur während des Gesprächs erfolgt. Die Sendeleistung von Schnurlostelefonen und ihrer Ladestation ist geringer als beim GSM-Mobilfunk.

Tabelle 10: Unterschiede in der Exposition zwischen GSM-Basisstationen, GSM-Mobiltelefonen und Radio-/TV-Sendern.

	Exposition Basisstation (GSM)	Exposition Mobiltelefon (GSM)	Exposition Radio-/TV-Sender
Feldart	Fernfeld	Nahfeld	Nah-/Fernfeld
Körperteil	ganzer Körper	v. a. Kopf	ganzer Körper
Intensität	gleichmässig; tief	lokal; hoch	gleichmässig; tief
Modulation	gepulst (1834 Hz und weitere Frequenzen)	gepulst (217 Hz und weitere Frequenzen)	AM und FM
Dauer	permanent	kurz	permanent

Bei so vielen Unterschieden sind gesundheitliche Effekte, die bei einer bestimmten Exposition gefunden wurden, streng genommen nicht auf andere Expositionssituationen übertragbar, zumindest so lange nicht, als der zugrundeliegende Wirkungsmechanismus nicht bekannt ist. Erschwerend kommt dazu, dass für die verschiedenen Expositionssituationen unterschiedliche Expositionsmasse verwendet werden (elektrische Feldstärke, Ganzkörper-SAR, maximale SAR₁₀ im Kopf). Um wenigstens für die Intensität der Strahlung ein vergleichbares Mass zu erhalten, wird im vorliegenden Bericht versucht, für alle Studien die lokal höchste SAR im Kopf und Rumpf abzuschätzen. Die entsprechende Methodik ist in Kapitel 6.5 beschrieben.

Gestützt auf die in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 zitierten Studien und die Umrechnungsverfahren gemäss Kapitel 6.5 sind in Tabelle 11 typische Werte für die elektrische Feldstärke, die Ganzkörper-SAR und die maximale SAR₁₀ im Kopf und Rumpf aufgelistet.

Tabelle 11: Geschätzte elektrische Feldstärken und SAR-Werte für typische Expositionssituationen.

Quelle	Situation	Elektrische Feldstärke [V/m]	Ganzkörper-SAR [mW/kg]	Maximale SAR ₁₀ im Kopf und Rumpf [mW/kg]
Mobiltelefon GSM 900	0.25 W (durchschnittliche Sendeleistung ohne Leistungsregelung)	1)	1)	575
	0.06 W (durchschnittliche Sendeleistung mit Leistungsregelung)	1)	1)	138
	0.04 W (durchschnittliche Sendeleistung mit Leistungsregelung und diskontinuierlicher Transmission)	1)	1)	92
Mobilfunkbasisstation GSM	unmittelbar bei der Antenne (Immissionsgrenzwert, 900 MHz)	41	17 ²⁾	370
	nächste Wohnorte um die Antenne (Anlagegrenzwert)	4–6	0.16–0.27	3.5-6.1
	in ungefähr 100 m Distanz, Hauptstrahl, freie Ausbreitung	0.5–1	0.003–0.01	0.06-0.22
	in ungefähr 200 m Distanz, Hauptstrahl, freie Ausbreitung	0.2–0.5	0.0004–0.003	0.009-0.06
Radio-/TV- Sender	höchste publizierte Werte um Sender	130	237	5070
	typische Werte im Abstand von 1–2 km	2	0.06	1.2
	typische städtische Hintergrundsstrahlung	0.1	0.0001	0.003

¹⁾ Nahfeldbedingungen, nicht vergleichbar mit Fernfeldbedingungen bei Mobilfunkbasisstationen und Radio- /TV-Sendern.

²⁾ Abgeschätzt gemäss Modellberechnungen (siehe Kapitel 6.5). Mit konservativen Annahmen setzt die ICNIRP 1998 einer Feldstärke von 41 V/m bei der Frequenz von 900 MHz eine Ganzkörper-SAR von 80 mW/kg gleich.

Es ist ersichtlich, dass lokal im Kopf durch das Mobiltelefon im allgemeinen höhere SAR-Werte auftreten als bei der Exposition gegenüber Sendeanlagen (der hohe Wert von 5070 mW/kg um einen Radiosender stellt eine Ausnahme dar). Des Weiteren steht fest, dass eine Erwärmung des Gewebes durch die Strahlung von Sendeanlagen ausgeschlossen werden kann. Die typischen Ganzkörper-SAR-Werte bei Exposition gegenüber stationären Sendeanlagen sind 50 Mal bis 1 Million Mal kleiner als der Wert von 4 W/kg, der nach 30 Minuten nachweislich zu einer Erwärmung des Körpers um 1°C führt (ICNIRP 1998).

5 Grenzwerte

5.1 Grundlage der Grenzwerte

Prinzipiell werden Grenzwerte auf zwei verschiedene Arten abgeleitet (MOSHAMMER 1998).

1. Toxikologische Begründung: Aus Untersuchungen wird die maximale Dosis bestimmt, bei der keine schädlichen Effekte zu beobachten sind. Dies wird als NOAEL (no observed adverse effect level) bezeichnet. Oft gibt es jedoch zu wenig Untersuchungen, um einen gesicherten NOAEL festzulegen. Dann wird für die Bestimmung der Grenzwerte der sogenannten LOAEL (lowest observed adverse effect level) herangezogen. Dieser entspricht der niedrigsten Dosis, bei der gerade noch ein schädlicher Effekt beobachtet wurde. Zumindest für den Fall, dass der Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung bei permanenter (und unfreiwilliger) Exposition gelten soll, ist es üblich, den NOAEL oder LOAEL durch einen Sicherheitsfaktor zu teilen. Je nach Art der gesundheitlichen Effekte sind Faktoren von 10 bis 100 die Regel.
2. Wenn aufgrund von Studienergebnissen angenommen werden muss, dass es keinen Schwellenwert für schädliche Wirkungen gibt, orientieren sich Grenzwerte nicht an toxikologischen Überlegungen, sondern am Prinzip ‚as low as reasonable achievable‘ (ALARA).

Beide Verfahren setzen voraus, dass ausreichende Kenntnisse über die schädlichen Wirkungen des betrachteten Agens und gesicherte Dosis-Wirkungsbeziehungen vorliegen. Sind die wissenschaftlichen Kenntnisse hingegen unvollständig oder vorläufig, kommt eher das Vorsorgeprinzip zum Tragen. Formuliert wurde dieses Prinzip 1992 in der Deklaration von Rio de Janeiro. Es besagt im Wesentlichen, dass bei einer vermuteten Schädlichkeit eines Agens Massnahmen zum Schutz der Bevölkerung auch angesichts von wissenschaftlichen Unsicherheiten getroffen werden sollten.

Die Umsetzung des Vorsorgeprinzips kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- Technologie-orientiert: durch technische Massnahmen an den Quellen und geeignete Standortwahl der Anlagen sollen die Emissionen und die Belastung möglichst niedrig gehalten werden. Diese Ausgestaltung des Vorsorgeprinzips ist beispielsweise im schweizerischen Umweltschutzgesetz (USG) verankert. Vorsorgliche Emissionsbegrenzungen sind nach USG so weit zu treffen, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. Anders gesagt: Vermeidbare Belastungen müssen vermieden werden. Emissionsvermindernde Massnahmen, die praktisch möglich sind, müssen auch tatsächlich durchgeführt werden.
- Immissionsbezogen: dieser Ansatz geht von vorläufigen Hinweisen auf schädliche Wirkungen und den damit verbundenen Verdachtsschwellen aus und formuliert auf dieser Basis biologisch begründete Vorsorgegrenzwerte für die Immissionen. Dieser Ansatz wurde für Mobilfunkstrahlung beispielsweise im Juni 2000 an einer Konferenz in Salzburg ausgiebig diskutiert. Die Bewertung des damaligen wissenschaftlichen Wissensstandes unter dem Aspekt der öffentlichen Gesundheit und des Vorsorgeprinzips wurden in der Salzburger Resolution zusammengefasst (OBERFELD 2000). Die Unterzeichner der Resolution kamen zum

Schluss, es gebe derzeit Hinweise, dass auch schwächste Strahlung nachteilige gesundheitliche Auswirkungen haben könnte und somit überhaupt keine Effektschwelle bestehe. Die Empfehlung von konkreten, biologisch begründeten Vorsorgewerten sei daher mit entsprechenden Unsicherheiten verbunden und als vorläufig anzusehen. Trotz dieser Schwierigkeit wird in der Resolution ein Vorsorgewert für Mobilfunkstrahlung empfohlen, der für die Feldstärke ca. 100 mal strenger ist als der von der ICNIRP empfohlene Gefährdungsgrenzwert (siehe Tabelle 12).

5.2 ICNIRP-Richtlinien

1981 erarbeitete eine Gruppe der WHO/IRPA (World Health Organization/International Radiation Protection Association) das erste Environmental Health Criteria Dokument zu Expositionen gegenüber hochfrequenter Strahlung (UNEP et al. 1981). Dieses vorsorgeorientierte Dokument schlug einen Grenzwert für Arbeitnehmer von 1–10 W/m² vor und führte aus, dass das Konzept der SAR nicht als alleinige Basis für die Ableitung von Grenzwerten dienen könne, und dass relevante Effekte auch unterhalb der Grenze für eine erhebliche Zunahme der Körpertemperatur auftreten können. Dennoch setzte sich in der Folge, ohne dass dies durch neue Daten begründet wurde, die SAR als alleinige Basis für die Ableitung der Grenzwerte durch. Die ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), die 1992 aus der IRPA hervorging, publizierte 1998 Richtlinien, die primär auf den hinreichend erforschten thermischen Wirkungen der Hochfrequenzstrahlung beruhen (ICNIRP 1998). Der Verwendung des SAR-Modells liegt die Annahme eines Energieäquivalenzprinzips zugrunde: Felder, die gleiche Energieabsorptionsraten hervorrufen, haben gleiche Wirkung. Damit liegen den ICNIRP-Referenzwerten implizit folgende (wissenschaftlich nicht bewiesenen) Annahmen zugrunde (KUNDI AND HUTTER 2001):

- das Kurzzeitexpositionsprinzip: nur Kurzzeiteffekte sind relevant, Langzeiteffekte sind nicht gesichert und können nur auftreten, wenn es auch Kurzzeiteffekte gibt.
- das Prinzip kontinuierlicher Wellen: die Modulation spielt im Allgemeinen keine Rolle; Ausnahme: Mikrowellen-Hören (siehe Kap. 7.1.5).
- das Prinzip der räumlichen Mittelung: relevant ist die durchschnittliche Absorption in 10 g zusammenhängendem Gewebe, trotz räumlich unterschiedlicher Absorptionsraten.
- das Zeit-/Dosis-Reziprozitätsprinzip: eine kurze Exposition hoher Intensität hat die gleiche Wirkung wie eine lange niedriger Intensität, solange die SAR gleich ist.
- das Additivitätsprinzip: bei gleichzeitiger Exposition gegenüber mehreren hochfrequenten elektromagnetischen Feldern ist die Wirkung gleich der Summe der Wirkungen der einzelnen Komponenten.

Aus Studien wurde abgeleitet, dass eine Ganzkörperabsorption von 4 W/kg bei einer 30-minütigen Exposition zu einer Erwärmung des Körpers um 1°C führt. Es

wird angenommen, dass dies bei einem gesunden Menschen die Grenze ist, die physiologisch kompensiert werden kann. Mit einem Sicherheitsfaktor von 10 wurde für die berufliche Exposition ein Basisgrenzwert von 0.4 W/kg festgelegt und für die Allgemeinbevölkerung mit einem weiteren Faktor 5 ein Basisgrenzwert von 0.08 W/kg. Um den Umstand Rechnung zu tragen, dass die Strahlung im Körper nicht homogen absorbiert wird, wurden für die lokale Absorption an einzelnen Körperstellen höhere Richtwerte empfohlen. Für Rumpf und Kopf gilt ein Richtwert von 2 W/kg, für Arme und Beine gilt 4 W/kg, je als Mittelwert über 10 Gramm Körpergewebe. Da die Verfahren zur Überprüfung der Einhaltung der Basisgrenzwerte in der Praxis zu aufwändig sind, wurden sogenannte Referenzwerte abgeleitet, die einfacher gemessen werden können. Diese abgeleiteten Größen sind: elektrische Feldstärke, magnetische Feldstärke und Leistungsflussdichte ausserhalb des Körpers. Diese frequenzabhängigen Werte sind in Tabelle 12 aufgelistet. Es ist zu berücksichtigen, dass der Sicherheitsfaktor von 50 bezogen auf die SAR lediglich einem Faktor 7 für die Feldstärke entspricht, da die SAR proportional zum Quadrat der Feldstärke ist.

Tabelle 12: Referenzwerte für die Exposition der Bevölkerung durch hochfrequente elektrische und magnetische Felder (ungestörte Effektivwerte) (ICNIRP 1998).

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke [V/m]	Magnetische Feldstärke [A/m]	Äquivalente Leistungsflussdichte bei ebenen Wellen S_{eq} [W/m ²]
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$	—
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	—
10–400 MHz	28	0.073	2
400–2000 MHz	$1.375 \cdot f^{1/2}$	$0.0037 \cdot f^{1/2}$	$f/200$
2–300 GHz	61	0.16	10

f : Frequenz in MHz.

Vorausgesetzt, dass die Basisgrenzwerte nicht überschritten werden und schädliche indirekte Wirkungen ausgeschlossen werden können, dürfen die Werte für die Feldstärke überschritten werden.

5.3 Schweizerische Grenzwerte

In der Schweiz wird der Schutz der Bevölkerung vor hochfrequenter Strahlung durch die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) geregelt. Die Verordnung ist seit 1. Februar 2000 in Kraft und regelt stationäre Anlagen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz. Der rechtliche Rahmen ist durch das Umweltschutzgesetz (USG) von 1983 vorgegeben. In diesem Gesetz sind neben Luftverunreinigungen, Lärm und Erschütterungen auch nichtionisierende Strahlen als Einwirkungen bezeichnet, die so zu begrenzen sind, dass sie für den Menschen und die Umwelt weder schädlich noch lästig sind. Das Schutzkonzept des Umweltschutzgesetzes ist zweistufig angelegt, in eine Stufe der Gefahrenabwehr und in eine Stufe der Vorsorge.

- Gefahrenabwehr: Schädliche und lästige Einwirkungen müssen verhindert werden. Insbesondere auch Wirkungen auf Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit, wie Kinder, Kranke, Betagte und Schwangere, sollen berücksichtigt werden. Die Schädlichkeits- bzw. Lästigkeitsschwelle wird in Form von Immissionsgrenzwerten festgelegt. Als Immissionsgrenzwerte der NISV wurden die Referenzwerte der ICNIRP für die elektrische und magnetische Feldstärke (siehe Tabelle 12) übernommen.
- Vorsorge: Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, müssen im Sinne der Vorsorge so weit begrenzt werden, wie dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. In der NISV wurde dieser Grundsatz in Form so genannter Anlagegrenzwerte konkretisiert. Diese wurden nicht auf einer biologischen Basis, sondern aufgrund der technischen Möglichkeiten festgelegt. Die Anlagegrenzwerte gelten jeweils nur für die Strahlung einer bestimmten Anlage und sind an denjenigen Orten einzuhalten, an denen sich Menschen längere Zeit aufhalten können (so genannte Orte mit empfindlicher Nutzung, OMEN). Mit der rechtsverbindlichen Festlegung von technisch begründeten Vorsorgegrenzwerten hat die Schweiz Neuland betreten. Die Anlagegrenzwerte für die wichtigsten Anlagen, welche Hochfrequenzstrahlung emittieren, sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13: Anlagegrenzwerte für Hochfrequenzquellen gemäss NISV.

Anlage	Anlagegrenzwert	Massgebender Betriebszustand
Lang- und Mittelwellensender	8.5 V/m	maximale Sendeleistung
übrige Radio- und Fernsehsender	3 V/m	
Mobilfunkbasisstationen (900 MHz)	4 V/m	maximaler Gesprächs- und Datenverkehr bei maximaler Sendeleistung
Mobilfunkbasisstationen (1800 MHz oder höher)	6 V/m	
Mobilfunkbasisstationen (Kombination der beiden obgenannten Frequenzbänder)	5 V/m	
Radaranlagen	5.5 V/m (zeitlicher Mittelwert während eines Abtastzyklus)	Überwachung des vorgesehenen Luftraumes mit der maximalen Sendeleistung

Allfällige neue, gefestigte Erkenntnisse über gesundheitliche Auswirkungen hochfrequenter Strahlung im Niedrigdosisbereich hätten eine Absenkung der **Immissionsgrenzwerte** zur Folge.

Allfällige technische Entwicklungen strahlungsarmer Funktechnologien könnten demgegenüber eine Absenkung der **Anlagegrenzwerte** auslösen.

Nicht rechtsverbindlich geregelt ist in der Schweiz der Schutz vor der Strahlung von Mobiltelefonen und anderen emittierenden Geräten. Informell orientieren sich die Industrie und die Behörden am ICNIRP-Grenzwert von 2 W/kg für die SAR₁₀.

6 Methodik

6.1 Ziel

Hauptziel dieses Berichts ist die Beurteilung des Gesundheitsrisikos durch hochfrequente Strahlung, die auf die Bevölkerung in der Schweiz einwirkt. Im Vordergrund steht dabei die Frage, ob die bestehenden schweizerischen Grenzwerte der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) einen genügenden Schutz für die Bevölkerung darstellen. Zu diesem Zwecke wurde eine Auswahl wissenschaftlicher Studien evaluiert und hinsichtlich der Evidenz für gesundheitsschädliche Effekte bewertet.

6.2 Studienauswahl

Aus der Vielzahl von vorliegenden Studien musste eine Auswahl getroffen werden. Das erste Kriterium bei der Studienauswahl war, dass ausschliesslich Untersuchungen an Menschen berücksichtigt wurden. Studien am Menschen sind für die Beurteilung von potenziellen Gesundheitseffekten in der Bevölkerung am aussagekräftigsten (REPACHOLI and CARDIS 1997). Untersuchungen an Zellen (in vitro) oder an Tieren (in vivo) sind in erster Linie geeignet, um die Mechanismen der Wechselwirkung zwischen biologischen Systemen und elektromagnetischer Strahlung zu untersuchen. Sie können zwar Anhaltspunkte für mögliche Gesundheitsgefährdungen des Menschen liefern, die Ableitung von konkreten Gesundheitseffekten oder von Dosis-Wirkungsbeziehungen beim Menschen aus Zell- und Tierversuchen ist jedoch mit grosser Unsicherheit behaftet, da zelluläre Effekte beim Menschen möglicherweise durch Rückkoppelungsprozesse kompensiert werden und sich der menschliche Organismus vom Tier unterscheidet. Deshalb basiert die vorliegende Bewertung ausschliesslich auf Studien an Menschen.

Für das Auffinden der relevanten Artikel wurden folgende Mittel eingesetzt.

- Recherchen in den Online-Datenbanken ‚Medline‘ (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/PubMed/>) und ‚ISI Web of Science‘ (eine multidisziplinäre Datenbank im Bereich Sozialwissenschaften, Chemie, Biologie und Medizin: <http://wos.isiglobalnet.com/CIW.cgi>). Es wurde nach folgenden Stichworten und Kombinationen davon gesucht (in Englisch): Elektromagnetische Felder, Mobilfunk, Basisstation, Gesundheit, Radiofrequenz, Mikrowelle, nichtionisierende Strahlung. Zusätzlich wurde mit der Suchfunktion ‚related articles‘ die Vollständigkeit der Suche überprüft.
- Berücksichtigung von Monographien und Berichten über die Thematik
- Sichtung der quartalsweise publizierten Abstracts des Dokumentationservice BENER (Biological effects of nonionizing electromagnetic radiation) ab März 2000 und Kontrolle auf Vollständigkeit der eigenen Recherchen (KLEINSTEIN et al.).

Ältere Publikationen wurden berücksichtigt, wenn sie in den online Datenbanken enthalten waren. Die Recherchen wurden am 31.12. 2002 abgeschlossen.

6.3 Kriterien für die Bewertung der wissenschaftlichen Studien

Die wissenschaftliche Beweisführung ist eine Widerspruchsbeweisführung. Das heisst, a priori wird davon ausgegangen, dass es keinen Zusammenhang zwischen den zu untersuchenden Faktoren gibt. Testet man beispielsweise ein neues Medikament, nimmt man an, dass es unwirksam ist, und versucht mit einer entsprechenden Studie das Gegenteil zu beweisen. Entsprechend wird vorgegangen, wenn man die Schädlichkeit eines Agens wissenschaftlich untersucht. Eine Schädigung gilt erst als wissenschaftlich nachgewiesen, wenn sie von mehreren Forschergruppen unabhängig festgestellt worden ist, das Resultat nicht im Widerspruch zu anderen Forschungsergebnissen steht und durch ein plausibles Wirkungsmodell zu erklären ist. Die wissenschaftliche Widerspruchsbeweisführung ist in den meisten Fällen sehr sinnvoll (z.B. Medikamentenwirkung). Sie wird jedoch zuweilen als problematisch und im Widerspruch zum Vorsorgeprinzip stehend erachtet, wenn es sich um potenziell schädliche Substanzen oder Agenzien handelt, denen die Bevölkerung ausgesetzt ist und für deren Wirkung die wissenschaftlichen Kenntnisse unvollständig oder vorläufig sind (OBERFELD 2000, MOSHAMMER 1998, KUNDI and HUTTER 2001, HUTTER 2000, DEHOS and WEISS 2002). Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird im vorliegenden Bericht eine differenzierte Bewertung vorgenommen. Es wird einerseits die Evidenz für das Vorhandensein eines Effekts, andererseits dessen gesundheitliche Bedeutung auf einer differenzierten Skala angegeben.

Vorhandensein eines Effekts

- **Gesichert:** Ein Effekt wird als gesichert erachtet, wenn er einer streng wissenschaftlichen Beweisführung standhält, d.h. mehrfach unabhängig repliziert worden ist, ein plausibles Wirkungsmodell besteht und er nicht im Widerspruch zu anderen Forschungsergebnissen steht.
- **Wahrscheinlich:** Ein Effekt wird als wahrscheinlich klassiert, wenn er mehrfach relativ konsistent und unabhängig nachgewiesen wurde. Die Qualität der Studien ist so weit überzeugend, dass andere Faktoren mit grosser Sicherheit ausgeschlossen werden können. Ein plausibler Wirkungsmechanismus fehlt.
- **Möglich:** Als möglich werden Effekte erachtet, die vereinzelt in Studien beobachtet wurden. Die Ergebnisse sind insgesamt jedoch nicht konsistent und sind möglicherweise auf methodische Schwächen in den Studien zurückzuführen. Die wissenschaftlichen Hinweise werden durch Einzelfallberichte gestützt.
- **Unwahrscheinlich:** Es gibt keine Hinweise für eine Assoziation, aber mehrfache Hinweise für deren Abwesenheit. Es bestehen keine theoretisch plausiblen Wirkungsmodelle, die eine Assoziation erwarten lassen.
- **Nicht beurteilbar:** Die Datenlage ist zu spärlich für eine Aussage. Es gibt zuweilen Einzelbefunde, häufig auch kontroverse Resultate. Die Methodik der jeweiligen Studien wird als zu wenig genügend bewertet, um daraus Folgerungen abzuleiten.

Gesundheitsrelevanz eines beobachteten Effekts

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) definiert die Gesundheit folgendermassen: «Gesundheit ist ein Zustand des umfassenden körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens und nicht nur das Fehlen von Krankheit oder Behinderung»

(«Health is a state of complete physical, mental and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity.»).¹

Basierend auf dieser Definition wurden die untersuchten Effekte einer der folgenden drei Kategorien zugeteilt:

- **Gravierend:** Der Effekt stellt eine drastische Einschränkung der Lebensqualität dar. Der Effekt ist lebensbedrohlich und reduziert die Lebenserwartung. Diese Kategorie umfasst alle Krebserkrankungen, genotoxische Effekte, Abort und Missbildungen bei Säuglingen sowie erhöhte Mortalität.
- **Einschränkung des Wohlbefindens:** die Lebensqualität bzw. das Wohlbefinden sind erheblich eingeschränkt. Das Symptom ist nicht direkt lebensbedrohlich. Unter diese Kategorie fallen unspezifische Gesundheitssymptome, insbesondere Kopfschmerzen, Schlafstörungen, psychisches Befinden, elektromagnetische Hypersensibilität sowie Mikrowellen-Hören.
- **Nicht beurteilbar:** Die Effekte sind physiologisch messbar. Die beobachteten Veränderungen bewegen sich in der normalen Bandbreite gesunder Menschen. Sie sind per se kein Gesundheitsrisiko und stellen keine Beeinträchtigung der Lebensqualität dar, da sie in der Regel nicht wahrgenommen werden können. Es ist unklar, ob sie längerfristig ein Gesundheitsrisiko darstellen. Möglicherweise manifestieren sich in den physiologisch messbaren Veränderungen schädliche Wirkungen. Zu dieser Gruppe gehören Schwankungen im Hormon- Immun- und Herzkreislaufsystem, Veränderungen im EEG sowie veränderte Reizwahrnehmung und Reizverarbeitung.

In Bezug auf die Gesundheitsrelevanz von beobachteten Effekten ist anzumerken, dass experimentelle Studien am Menschen aus ethischen Gründen nie gravierende gesundheitliche Effekte untersuchen können. Entsprechend wird auch die Höhe und Zeitdauer der Exposition ausgelegt. Experimentelle Studien untersuchen deshalb per se in erster Linie unmittelbare biologische Reaktionen, deren Gesundheitsrelevanz nicht beurteilbar ist.

Als dritter Punkt der Bewertung wurde für Effekte, deren Vorhandensein als gesichert, wahrscheinlich oder möglich eingestuft wird, aus den vorliegenden Studienergebnissen eine untere Expositionsschwelle für das Auftreten des jeweiligen Effekts abgeschätzt. Dabei wird grob zwischen vier Stufen unterschieden (für die Beziehung zwischen den verschiedenen Dosisgrößen und deren Bedeutung siehe Kapitel 6.5):

- unterhalb der schweizerischen Anlagegrenzwerte
(<3 V/m, lokale $SAR_{10} < 2$ mW/kg)
- im Bereich der schweizerischen Anlagegrenzwerte
($3-10$ V/m, lokale $SAR_{10} \approx 2-20$ mW/kg)

¹ Preamble to the Constitution of the World Health Organization as adopted by the International Health Conference, New York, 19-22 June, 1946; signed on 22 July 1946 by the representatives of 61 States (Official Records of the World Health Organization, no. 2, p. 100) and entered into force on 7 April 1948.

- zwischen den schweizerischen Anlagegrenzwerten und den ICNIRP-Grenzwerten (ca. 10–100 V/m, lokale SAR₁₀≈0.02–2 W/kg)
- oberhalb der ICNIRP-Grenzwerte (>100 V/m, lokale SAR₁₀>2 W/kg)

6.4 Spezifische Hinweise zur Beurteilung der Kausalität

In epidemiologischen Studien wird mit Hilfe von statistischen Verfahren nach Zusammenhängen zwischen einer Exposition und einem Gesundheitseffekt gesucht. Wird ein solcher statistischer Zusammenhang gefunden – man spricht häufig auch von einer Assoziation – bedeutet dies jedoch noch nicht zwingend, dass der Zusammenhang auch kausal ist. Für die Beurteilung der Kausalität bei einer statistisch festgestellten Assoziation hat HILL 1965 einen Satz von Kriterien erarbeitet, welche auch in der vorliegenden Bewertung verwendet wurden. Sie sind nachstehend im Sinn einer Checkliste in Frageform formuliert. Obwohl mit Ausnahme von Punkt 4 diese Kriterien für eine Kausalität nicht zwingend erfüllt sein müssen, nimmt die Evidenz für einen kausalen Zusammenhang zu, je mehr dieser Kriterien erfüllt sind bzw. je mehr der Fragen mit ja beantwortet werden können. Die Kriterien lauten wie folgt:

1. Wie viel höher ist das Risiko bei Exposition im Vergleich mit nicht Exponierten (Stärke der Assoziation)?
2. Wurde dieselbe Assoziation mehrfach gefunden (Konsistenz der Replikation)?
3. Wurde jeweils dasselbe Muster von Effekten gefunden (Spezifität)?
4. Ist die zeitliche Abfolge von Ursache und Wirkung korrekt?
5. Hat die Beziehung Dosis-Wirkungscharakter (je stärker die Dosis, desto grösser die Wirkung) oder gibt es spezielle Charakteristiken der Strahlung (z.B. Modulationsart), die mit Effekten assoziiert sind?
6. Ist die Wirkung biologisch plausibel?
7. Ist der Befund mit bereits bekannten Fakten verträglich (Kohärenz)?
8. Kann der Effekt im Experiment überprüft werden?
9. Gibt es ähnliche, analoge Effekte (Analogie)?

Die Beantwortung dieser Fragen hängt natürlich vom Stand der Forschung ab. Schon Hill bemerkte, dass es nicht möglich ist ‚hard-and-fast rules‘ für einen Kausalitätsbeweis zu definieren. Unabdingbare Voraussetzung, die erfüllt sein muss, ist nur die zeitlich logische Abfolge von Ursache und Wirkung. Alle anderen Punkte können zur Evidenz beitragen. Eine lückenlose Beweisstützung nach obigen Kriterien ist auch bei bekannten Umweltnoxen nicht immer möglich.

Ergebnisse von wissenschaftlichen Untersuchungen können den wahren Zusammenhang zwischen der Exposition und einem Effekt entweder richtig oder falsch wiedergeben. Dabei gibt es im Prinzip vier mögliche Szenarien (siehe Tabelle 14). Die Szenarien ‚richtig positiv‘ und ‚richtig negativ‘ sind die erwünschten Szenarien. In diesen Fällen gibt eine Studie die Existenz bzw. die Abwesenheit eines Effekts korrekt wieder. Eine falsch positive Studie hingegen findet eine statistische Assoziation zwischen Exposition und Effekt, obwohl in Wahrheit keine besteht; und eine falsch negative Studie beobachtet keine Assoziation, obwohl in Wahrheit eine vor-

handen wäre. Diese beiden letzten Szenarien können aus verschiedenen Gründen eintreten. Eine falsch positive Assoziation kann zufällig zustande gekommen sein oder weil die Studie einen systematischen Fehler aufweist. Für falsch negative Assoziationen sind demgegenüber vor allem nicht-systematische Fehler, z.B. eine unscharfe Bestimmung der Exposition sowie zu kleine Stichproben verantwortlich.

Tabelle 14: Die vier möglichen Szenarien für die in Studien beobachteten Assoziationen im Vergleich zur wahren (kausalen) Assoziation.

		Assoziation kausal	
		Ja	Nein
Assoziation beobachtet	Ja	Richtig positiv	Falsch positiv
	Nein	Falsch negativ	Richtig negativ

Systematische Fehler (Bias)

Es gibt eine Reihe von möglichen systematischen Fehlern in epidemiologischen Studien. Systematische Fehler können das Studienresultat nur dann verfälschen, wenn sie sowohl mit der Exposition als auch mit dem untersuchten Gesundheitseffekt zusammenhängen. Beispiele solcher systematischer Fehlerquellen sind Störgrößen („Confounder“), Selektionsbias und Informationsbias. Für genauere Erläuterungen siehe Glossar (Verzeichnisse) oder epidemiologische Lehrbücher (z.B. ROTHMAN and GREENLAND 1998). Systematische Fehler sind in erster Linie bei Studien relevant, die eine Assoziation fanden.

Einen systematischen Fehler auf einer anderen Ebene stellt der sogenannte Publikationsbias dar. Der Publikationsbias besagt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Studie publiziert wird, grösser ist, wenn ein Effekt gefunden wurde. In gewissen Forschungsgebieten konnte dieser Verdacht empirisch erhärtet werden, in anderen hingegen nicht.

Nicht-systematische Fehler

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei Studien die Informationserhebung immer mit Ungenauigkeiten verbunden ist. Insbesondere die Expositionsabschätzung ist nie perfekt. Dies gilt für experimentelle, aber in besonderem Masse für epidemiologische Studien, die Effekte von Langzeitexpositionen untersuchen. Das Ergebnis epidemiologischer Untersuchungen hängt entscheidend davon ab, ob solche Fehler systematisch oder nicht-systematisch sind. Nicht-systematische Fehler sind beispielsweise falsche Expositionsklassierungen, die zufällig und unabhängig vom Gesundheitszustand erfolgen. Je nach Studiendesign haben nicht-systematische Fehler entweder eine Unterschätzung der wahren Expositions-Wirkungsbeziehung zur Folge oder aber keinen Einfluss auf die Höhe des Effektschätzers, wohl aber auf das Vertrauensintervall. Das heisst, dass die Wahrscheinlichkeit, einen vorhandenen Effekt nachzuweisen (Power), kleiner wird. Nicht-systematische Fehler führen jedoch kaum zu einer Überschätzung eines vorhandenen Risikos. Sie sind somit vor allem bei Studien im Auge zu behalten, die keine statistische Assoziation zwischen Exposition und Gesundheitseffekt fanden.

Zufall

Eine statistische Assoziation kann auch zufällig zustande kommen, ohne dass eine kausale Beziehung vorliegen muss. Solche falsch-positiven Befunde gilt es durch entsprechende statistische Absicherung zu erkennen. Gemäss Konvention wird ein Ergebnis erst dann als überzufällig, d.h. statistisch signifikant betrachtet, wenn es durch reinen Zufall mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 5% zustande käme.

Wenn in einer statistischen Auswertung mit dem erhobenen Datenmaterial sehr viele statistische Tests durchgeführt werden, oder wenn man sehr viele Studien auswertet, ist wahrscheinlichkeitstheoretisch mit einzelnen signifikanten Ergebnissen zu rechnen, welche dem Zufall und nicht einem kausalen Zusammenhang entspringen.

Nicht-Signifikanz darf andererseits jedoch nicht als Beweis betrachtet werden, dass kein kausaler Zusammenhang besteht. Nicht-Signifikanz kann auch zustande kommen, wenn zwar ein kausaler Zusammenhang besteht, aber das Studienkollektiv für die untersuchten Expositionsunterschiede zu klein war. Im Einzelfall ist es oft nicht möglich, dies zu beurteilen. In der Fachliteratur wird die mechanische Anwendung des Signifikanzkriteriums bei der Interpretation epidemiologischer Studien insbesondere im Public Health Bereich jedenfalls abgelehnt (ROTHMAN 1986, BURTON et al. 1998).

Ein Beispiel, wie problematisch die alleinige Abstützung auf das Kriterium der statistischen Signifikanz sein kann, sind die Studien von MANN and RÖSCHKE 1996 sowie WAGNER et al. 1998. Letztere Studie war als Replikation der ersten Studie geplant, die statistisch signifikante Einflüsse eines Mobiltelefons auf verschiedene Schlafparameter gefunden hatte. In den beiden Studien wurden jedoch zwei verschieden stark strahlende Telefone eingesetzt. Bei der Studie von MANN and RÖSCHKE 1996 betrug die mittlere Leistungsflussdichte beim Kopf des Probanden 0.5 W/m^2 , bei WAGNER et al. 1998 war sie deutlich tiefer, nämlich 0.2 W/m^2 . MANN and RÖSCHKE 1996 fanden bei Bestrahlung mit dem stärker strahlenden Telefon signifikant verkürzte REM-Phasen und eine signifikant verkürzte Einschlafdauer. Genau dieselben Zusammenhänge wurden auch bei der Replikation mit dem schwächeren Telefon gefunden, aber weniger stark und deshalb nicht statistisch signifikant. Diese beiden Studien weisen somit eine Dosis-Wirkungsbeziehung nach. (Eine dritte Studie mit einer deutlich höheren Exposition von 50 W/m^2 fand dann jedoch keinen Effekt mehr (WAGNER et al. 2000)).

6.5 Vergleich verschiedener Expositionsmasse

Studien zu den Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung untersuchten verschiedene Expositionstypen, die sich teilweise deutlich voneinander unterscheiden (siehe Kapitel 4.2.5):

1. Expositionen durch stationäre Sendeanlagen für Radio und Fernsehen sowie durch Mobilfunkbasisstationen (wobei zu letzterem de facto noch keine Studie publiziert wurde, die minimalsten methodischen Anforderungen genügt).

2. Expositionen bei der Benützung von Mobiltelefonen.
3. Expositionen durch andere als die obgenannten Hochfrequenzquellen, z.B. medizinische Geräte, Expositionseinrichtungen im Labor etc.

Üblicherweise werden für die verschiedenen Expositionstypen unterschiedliche Expositionsmasse verwendet. Beispielsweise werden für Sendeanlagen generell die elektrische oder magnetische Feldstärke (V/m oder A/m) bzw. die Leistungsflussdichte (W/m²) angegeben. Diese Masse lassen sich unter Fernfeldbedingungen ineinander überführen (siehe Anhang, Tabelle 34). Bei der Exposition durch ein Mobiltelefon ist die Angabe der elektrischen Feldstärke oder Leistungsflussdichte wegen des ausgeprägten Nahfeldcharakters hingegen nicht sinnvoll. In diesem Fall wird vielfach die maximale SAR₁₀ im Kopf oder die Sendeleistung des Telefons angegeben.

Um die verschiedenartigen Expositionen zumindest bezüglich der Intensität der Strahlung grob vergleichen zu können, wird für jede Expositionssituation die maximale SAR₁₀ (gemittelt über 10 g Gewebe) im Kopf oder Rumpf abgeschätzt. Das Vorgehen für diese Abschätzungen ist im Folgenden beschrieben.

Abschätzung der SAR aus der Feldstärke

Die SAR ist proportional zur Leistungsflussdichte bzw. zum Quadrat der Feldstärke. Damit kann sie im homogenen Feld folgendermassen aus der elektrischen Feldstärke berechnet werden:

$$SAR = k \cdot E^2 \quad \text{(Gleichung 2)}$$

wobei SAR: spezifische Absorptionsrate in W/kg
 E: elektrische Feldstärke in V/m

Der Koeffizient k kann aus dosimetrischen Untersuchungen an Ganzkörpermodellen abgeleitet werden (FRÖHLICH et al. 2002a, FRÖHLICH et al. 2002b). Die modellierten SAR in einem homogenen Feld mit einer Leistungsflussdichte von 1 W/m² (=19 V/m) sind in Tabelle 15 enthalten. Bei den lokalen SAR-Werten (SAR₁₀ und SAR₁) handelt es sich um den im Kopf und Rumpf auftretenden lokalen Höchstwert, jeweils gemittelt über 10 g bzw. 1 g Gewebe. Es ist ersichtlich, dass die höchste SAR₁₀ 20 bis 25 mal höher als die Ganzkörper-SAR ist. Dies entspricht ungefähr dem Verhältnis der ICNIRP-Richtwerte für die Ganzkörper-SAR (0.08 W/kg) und die lokale SAR in Rumpf und Kopf (2 W/kg). Mit den Angaben von Tabelle 15 lassen sich die Koeffizienten k von Gleichung 2 berechnen. Diese sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

Tabelle 15: Mittels Ganzkörpermodellen berechnete SAR-Werte (W/kg) bei einer Leistungsflussdichte von 1 W/m². SAR₁₀ ist der über 10 g Gewebe gemittelte, SAR₁ der über 1 g gemittelte lokale Höchstwert im Kopf und Rumpf (FRÖHLICH et al. 2002A, FRÖHLICH et al. 2002B).

Frequenz	Ganzkörper-SAR	Maximale SAR ₁₀	Maximale SAR ₁
450 MHz	5.43·10 ⁻³	1.13·10 ⁻¹	1.81·10 ⁻¹
900 MHz	3.85·10 ⁻³	8.29·10 ⁻²	1.73·10 ⁻¹
1800 MHz	2.79·10 ⁻³	6.41·10 ⁻²	1.13·10 ⁻¹

Tabelle 16: Koeffizient für die Umrechnung zwischen elektrischer Feldstärke und SAR gemäss Gleichung 2.

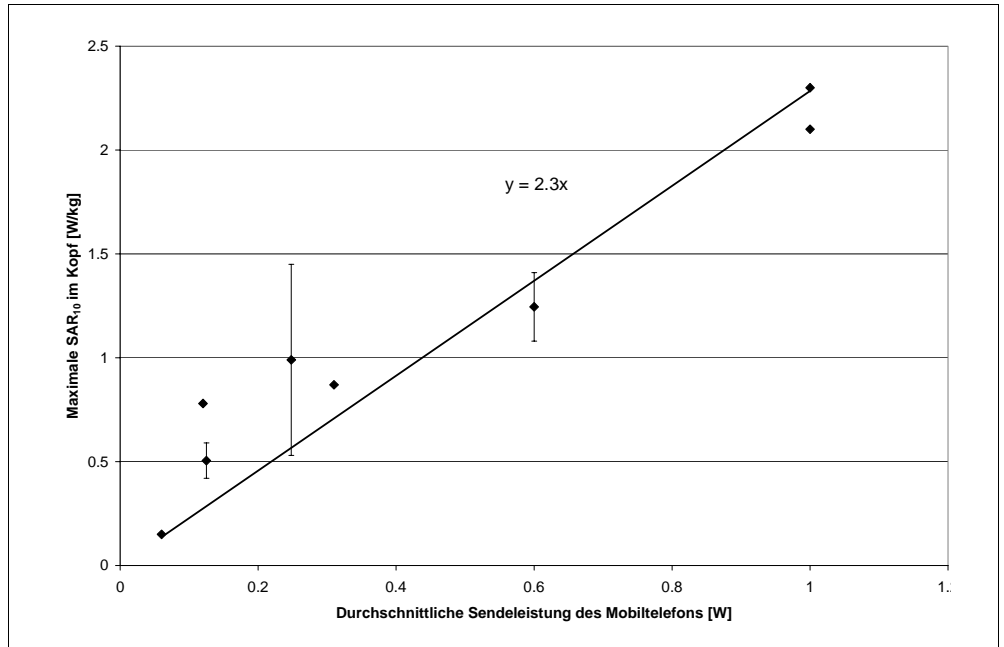
Frequenz	Koeffizient <i>k</i> für Ganzkörper-SAR	Koeffizient <i>k</i> für SAR ₁₀
450 MHz	1.4·10 ⁻⁵	3.0·10 ⁻⁴
900 MHz	1.0·10 ⁻⁵	2.2·10 ⁻⁴
1800 MHz	7.4·10 ⁻⁶	1.7·10 ⁻⁴

Alle Umrechnungen von SAR₁₀ in Feldstärken bzw. umgekehrt werden mit Hilfe von Gleichung 2 und den Koeffizienten von Tabelle 16 durchgeführt. Ist in einer Studie nur die Ganzkörper-SAR angegeben, wird die maximale SAR₁₀ gemäss Tabelle 15 abgeschätzt. Unterhalb der Resonanzfrequenz von 70 MHz nimmt der Koeffizient *k* mit abnehmender Frequenz rasch ab. Dosimetrische Berechnungen von *k* in diesem Frequenzbereich stehen nicht zur Verfügung. Da zusätzlich in diesem Frequenzbereich die Induktion von Strömen im Vergleich zur thermalen Absorption zunehmend wichtiger wird, wird keine Abschätzung der lokalen SAR durchgeführt.

Abschätzung der SAR₁₀ aus der Sendeleistung eines Mobiltelefons

Bei einigen experimentellen Studien, die ein Mobiltelefon als Expositionsquelle verwendeten, wurde die SAR₁₀ im Kopf nicht berechnet oder geschätzt, sondern nur die Sendeleistung des Telefons vermerkt. Für diese Fälle wurde mit Hilfe der Daten aus Tabelle 8 mittels einer linearen Regression ein empirischer Zusammenhang zwischen der Sendeleistung und der maximalen SAR₁₀ im Kopf (bezogen auf 10 g Gewebe) hergeleitet. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6 grafisch dargestellt. Die maximale SAR₁₀ im Kopf (in W/kg) beträgt ungefähr das 2.3-Fache der zeitlich gemittelten Sendeleistung (in W) des Mobiltelefons.

Abbildung 6:
Empirischer Zusammen-
hang zwischen der ma-
ximalen lokalen SAR₁₀ im
Kopf (gemittelt über 10 g)
und der Sendeleistung
von Mobiltelefonen. Die
Daten stammen von
Tabelle 8.



6.6 Struktur des Ergebnisteils dieses Berichtes

Im Kapitel 7 werden, strukturiert nach Gesundheitseffekten, die bis Ende 2002 vorliegenden Forschungsergebnisse dargestellt. Die Darstellung umfasst jeweils eine kurze Einführung in die Thematik, in der auch Hintergründe und hypothetische Wirkungsmechanismen diskutiert werden. Anschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Studien so vorgestellt, wie sie von den Autoren präsentiert wurden. Einige Studien untersuchen mehrere gesundheitliche Auswirkungen und finden sich deshalb in mehreren Kapiteln. Die methodischen Hauptaspekte werden dabei nur bei der ersten Erwähnung einer solchen Studie vorgestellt.

Pro Gesundheitseffekt sind in einer Tabelle die Ergebnisse und wichtigsten Fakten der einzelnen Studien zusammengefasst. Am Schluss jedes Unterkapitels wird für den jeweiligen Effekt eine Gesamtbeurteilung der vorliegenden Evidenz und der gesundheitlichen Relevanz vorgenommen.

In den Tabellen werden folgende Informationen angegeben, falls diese aus der Publikation entnommen werden können:

- Expositionsquelle
Es wird angegeben, durch welche Anlage/Gerät die Exposition erfolgt.
- Dauer der Exposition
U: unmittelbar (max. 1 Stunde); K: kurz (bis maximal 3 Tage); M: Mittel (3–30 Tage); L: Lang (>1 Monat).

Bei Querschnittsbefragungen wird meistens die momentane Expositionssituation (z.B. am Wohnort) erhoben. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Befragten

auch längerfristig so exponiert waren. Aus diesem Grund wird die Exposition bei Querschnittsbefragungen als langfristig klassiert.

- Frequenz in MHz, in Klammern der Modulationstyp: (cw): kontinuierlich (nicht moduliert); (p): gepulst; (AM): amplitudenmoduliert; (FM): frequenzmoduliert
- Intensität der Strahlung. Das Originalmass, das in der Studie publiziert wurde, ist in normalem Druck angegeben. Damit die Intensitäten grob vergleichbar sind, wurde für alle Studien gemäss den in Kapitel 6.5 beschriebenen Verfahren die maximale SAR₁₀ im Kopf oder Rumpf abgeschätzt. Geschätzte Werte sind kursiv gedruckt und mit ~ gekennzeichnet. Anhand der Einheiten ist ersichtlich, um welches Expositions-mass es sich handelt. Angaben in W bedeuten die Strahlungsleistung eines Mobiltelefons, W/kg sind SAR₁₀-Werte, V/m sind elektrische Feldstärken, A/m sind magnetische Feldstärken, W/m² sind Leistungsflussdichten.
- Bei epidemiologischen Studien zur Verwendung von Mobiltelefonen wird die Intensität der Strahlung in der Regel nicht erhoben. In diesem Fall wird in der Tabelle als Stellvertreter für eine Intensitätsangabe ‚bei Normalgebrauch‘ vermerkt und die SAR₁₀ mit $< \sim 2 \text{ W/kg}$ (ICNIRP-Grenzwert für die SAR₁₀) geschätzt.
- Die Hauptresultate gemäss den Angaben der Autoren werden in Stichworten dargestellt. Die Art des Zusammenhanges mit der Exposition wird mit + (positiv) oder – (negativ) gekennzeichnet. Es handelt sich um einen positiven Zusammenhang, wenn die Exposition zu einer Erhöhung des entsprechenden Befundes führt. Signifikante Resultate ($\alpha=5\%$) werden mit * markiert. Bei nicht markierten Befunden ist entweder nicht eruierbar, ob sie signifikant waren, oder es handelt sich um Zusammenhänge, die zwar konsistent auftreten jedoch statistisch nicht signifikant waren. Das sind beispielsweise nicht signifikante Trends bei Modellen mit mehreren Expositions-klassen, Unterschiede im Bereich von einer Standardabweichung, etc.
- Wenn Analysen durchgeführt wurden, bei denen kein Zusammenhang gefunden wurde, wird dies in der Spalte ‚keine Assoziation‘ vermerkt.
- Bei gewissen Symptomen (insbesondere bei der Krebsentstehung) wurde das Risiko mit seinem Vertrauensintervall quantifiziert. Diese Angaben sind in der Tabelle enthalten. In diesem Fall ist in der Kolonne ‚Mass‘ immer angegeben, auf welches Risikomass sich die entsprechenden Werte beziehen (z.B. standardisierte Inzidenzverhältnisse, Odds Ratio, etc.) Diese Masse sind in erster Näherung vergleichbar und haben die Bedeutung eines relativen Risikos.
- Besondere Beobachtungen werden als Bemerkungen notiert

7 Gesundheitliche Auswirkungen

7.1 Physiologische Wirkungen

7.1.1 Hormonsystem

Einführung

Hormone sind Botenstoffe, die in den endokrinen Organen produziert werden und bereits in geringen Konzentrationen den Stoffwechsel der entsprechenden Erfolgsorgane in charakteristischer Weise beeinflussen. Bisher wurden die Effekte von elektromagnetischen Feldern auf die folgenden Hormone untersucht (in eckigen Klammern die entsprechenden endokrinen Organe):

- Melatonin [Epiphyse]
- Thyreotropin freisetzendes Hormon (TRH) [Hypothalamus]
- Gonadotropine (FSH, LH), Thyreotropin (TSH), Adrenokortikotropin (ACTH), Wachstumshormone (STH), Prolaktin [Hypophyse]
- Kortisol, Testosteron, Progesteron, Dehydroepiandrosteron (DHEA) [Nebennierenrinde]
- Östradiol, Testosteron [Ovarien, Hoden]
- Trijodthyronin (T3), Thyroxin (T4) [Schilddrüse]

Das endokrine System bzw. verschiedene Hormone stehen im Verdacht, durch Hochfrequenzstrahlung beeinflusst zu sein. Am prominentesten wird in diesem Zusammenhang Melatonin diskutiert. Melatonin wird beim Menschen bei Dunkelheit produziert; Licht führt zu einer Unterdrückung der Produktion. Melatonin weist deshalb einen charakteristischen tageszeitlichen Verlauf mit hohen Konzentrationen während der Nacht und niedrigen tagsüber auf. Diese hohen Konzentrationen inhibieren die Freisetzung von ACTH und Cortisol. So wirkt Melatonin als übergeordnetes hormonelles Signal und beeinflusst den circadianen Rhythmus vieler Stoffwechselprozesse. Es ist an der körpereigenen Thermoregulation beteiligt, wirkt hemmend auf die Geschlechtshormone und hat eine stimulierende Wirkung auf das Immunsystem (HENNIES et al. 2000). Zwischen Melatonin und der Synthese von Prolaktin sowie Wachstumshormonen scheint eine Phasenbeziehung zu bestehen. Weiter gilt es als Onkostatikum (unterdrückt Tumorwachstum) und als Fänger von Sauerstoffradikalen (LERCHL 1997). Die a priori Hypothese besagt, dass die Melatoninsekretion bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern erniedrigt wird (STEVENS 1987). Eine solche Unterdrückung der Sekretion könnte sowohl eine tumorpromovierende Wirkung erklären als auch den Tag-Nacht-Rhythmus beeinflussen.

Resultate

Die Studien über den Einfluss der Hochfrequenzstrahlung auf das endokrine System beim Menschen sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Es gibt eine Vielzahl von Studien, die die Auswirkungen von niederfrequenten elektrischen Feldern auf Melatonin untersucht, aber nur wenige, die sich auf Hochfrequenzstrahlung fokussiert haben.

Die Schwarzenburg-Studie (ALTPETER et al. 1995) untersuchte die Melatoninsekretion bei Bewohnern in unterschiedlich belasteten Gebieten um einen Kurzwellenradiosender. Zone A umfasste das Gebiet um den Sender in einer Distanz von 400 bis 900 m. Messungen ergaben in dieser Zone 24-Stunden-Mittelwerte für die magneti-

sche Feldstärke von 0.9 bis 15.5 mA/m bei einem Durchschnitt von 2.5 mA/m ($\cong 0.9$ V/m). Aufgrund der variablen Senderichtung waren die einzelnen Aufenthaltsorte innerhalb dieser Zone jeweils während weniger Stunden pro Tag deutlich stärker exponiert als im 24-Stunden Mittel. Diese maximalen magnetischen Feldstärken lagen je nach Haushalt zwischen 5 und 50 mA/m ($\cong 2$ –20 V/m). Zone B war 900–1500 m vom Sender entfernt. Die 24-Stunden-Mittelwerte lagen dort zwischen 0.3 und 1.4 mA/m bei einem Durchschnitt von 0.8 mA/m ($\cong 0.3$ V/m). Während der Zeit hoher Exposition lagen die Werte zwischen 1 und 8 mA/m (0.4–3 V/m). Zone C war rund 4 km entfernt und wies eine senderbedingte Hintergrundbelastung von rund 0.1 mA/m ($\cong 0.04$ V/m) auf. Es wurde kein Zusammenhang zwischen der Melatoninkonzentration im Morgenurin (gemessen als 6-Hydroxy-Melatonin-Sulfat [6-OHMS]) und der Stärke der Exposition beobachtet. Dabei wurden sowohl der Effekt eines 3-tägigen Betriebsunterbruches untersucht als auch Unterschiede, die auf eine langfristige Exposition zurückzuführen gewesen wären.

Unmittelbare und kurzfristige Wirkungen der Strahlung eines Mobiltelefons auf den Melatoninspiegel wurden von MANN et al. 1998, RADON et al. 2001 und DE SEZE et al. 1999 untersucht. Keine dieser Studien fand einen signifikanten Zusammenhang. Bei MANN et al. 1998 wurden unter Exposition tendenziell höhere Serum-Melatoninwerte im Blut beobachtet, was der gängigen Hypothese widersprechen würde. RADON et al. 2001 fanden abhängig davon, ob die Exposition in der Nacht oder am Tag stattfand, einen tendenziell positiven oder einen negativen Zusammenhang zwischen der Mobiltelefonexposition und der Speichel-Melatoninkonzentration. DE SEZE et al. 1999 beobachteten eine Abnahme der Sekretion von Serum-Melatonin bei Exposition gegenüber einem GSM 900 Telefon und eine Zunahme bei Exposition gegenüber einem DCS 1800 Telefon. Die Unterschiede waren deutlich nicht signifikant.

Im Gegensatz dazu fanden BURCH et al. 2002 Hinweise für einen Zusammenhang zwischen dem Gebrauch von Mobiltelefonen und Melatonin, gemessen als 6-OHMS im Urin. In einer ersten Studie wurde die Melatoninkonzentration bei 149 Arbeitern untersucht, die gegenüber niederfrequenten magnetischen Feldern exponiert waren. Dabei wurde auch die Häufigkeit des Mobiltelefongebrauchs während der Arbeit erhoben. In dieser ersten Studie wurden zwar keine statistisch signifikanten Zusammenhänge, jedoch Hinweise auf eine Assoziation zwischen dem Mobiltelefongebrauch und der 6-OHMS Konzentration gefunden. Aus diesem Grund wurde eine zweite Studie an 77 Arbeitern mit einer verbesserten Erhebung des Telefongebrauchs durchgeführt. Die Probanden der zweiten Studie benutzten das Mobiltelefon häufiger als diejenigen der ersten Studie. Es wurde während 3 Tagen der Urin gesammelt und auf 6-OHMS analysiert. Probanden, die das Mobiltelefon täglich während mehr als 25 Minuten benutzten, hatten nachts eine signifikant tiefere 6-OHMS Konzentration im Urin sowie eine signifikant geringere nächtliche Sekretion. Zusätzlich wurde eine signifikante Dosis-Wirkungsbeziehung beobachtet, und es ergaben sich Hinweise für einen kombinierten Effekt von Mobiltelefongebrauch und Exposition gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern. Bei der Analyse wurden das Alter der Probanden, der Zeitpunkt der Probenahme, die Lichtexposition und die Exposition gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern berücksichtigt.

Für mehrere andere Hormone als Melatonin fanden DASDAG et al. 1999 bei exponierten Radio- und Fernsehtechnikern signifikant unterschiedliche Konzentrationen im Vergleich zu einem Kontrollkollektiv. Da jedoch in dieser Studie keine Angaben über die Kontrollgruppe gemacht wurden, ist eine wissenschaftliche Bewertung der Resultate nicht möglich.

Wichtiger sind die Resultate der übrigen Studien. Zwei Studien untersuchten den Einfluss der Hochfrequenzstrahlung auf das Follikel stimulierende Hormon (FSH) bei einem rein männlichen Untersuchungskollektiv (DE SEZE et al. 1998, GRAJEWSKI et al. 2000). Beide Studien fanden einen statistisch signifikanten Zusammenhang. DE SEZE et al. 1998 fanden zudem eine negative, statistisch signifikante Assoziation zwischen der Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung und Thyreotropin (TSH).

Kontrovers sind die Resultate zu den Stresshormonen. BRAUNE et al. 2002 fanden bei Blutentnahmen keine veränderten Kortisol-, Adrenalin und NoradrenalinKonzentrationen während und nach einer 30-minütigen Exposition gegenüber einem Mobiltelefon im Vergleich zu einer Kontrollsituation ohne Bestrahlung. Bei der Studie von MANN et al. 1998 war in der ersten (23.00–0.00) und letzten (6.00–7.00) Beobachtungsphase der Kortisolspiegel bei nächtlicher Exposition gegenüber einem sendenden Mobiltelefon signifikant höher als bei Scheinexposition. VANGELOVA et al. 2002 verglichen die Stresshormonkonzentration im Urin von 12 männlichen exponierten Schichtarbeitern einer Satellitenstation für TV-Kommunikation und Weltraumforschung mit 12 nicht exponierten Kontrollpersonen, die im gleichen Schichtmodell arbeiteten. Dabei ergab sich für die exponierten Arbeiter eine signifikant erhöhte Konzentration der 11-Oxykortikosteroide im Urin. Die Tagesverläufe waren bei den Exponierten häufiger atypisch als bei den Kontrollpersonen (9 vs. 3). Die Konzentrationen von Adrenalin und Noradrenalin im Blut waren in den beiden untersuchten Kollektiven nicht signifikant verschieden.

Das Wachstumshormon (STH), das luteinisierende Hormon (LH), Adrenokortikotropin (ACTH) und Prolaktin zeigten in keiner Studie einen statistisch signifikanten Zusammenhang mit der Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung.

Tabelle 17: Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das Hormonsystem.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
ALTPETER et al. 1995	Kurzwellen-radiosender	K, L	6.1–21.8	1–50 mA/m ¹ (~0.4–20 V/m)			Melatonin
MANN et al. 1998	Mobiltelefon	U, K	900 (p)	0.2 W/m ²	0.3	+Kortisol* +Melatonin +STH +LH	
DE SEZE et al. 1998	Mobiltelefon	M	900 (p)	0.25 W	~0.58	-TSH* +FSH*, -Prolaktin	LH, ACTH, GH
DASDAG et al. 1999	im Beruf (Radio-/TV-Techniker)	L	1.06–6000	?	?	+T3* +T4* +TSH(*) +Estradiol* +Testosteron(*) +Progesteron* -DHEA	Kortisol
DE SEZE et al. 1999	Mobiltelefon	M	900/1800 (p)	0.25 W	~0.58		Melatonin
GRAJEWSKI et al. 2000	im Beruf (dielektrische Heizer)	L	3–100	35–95 V/m	~0.4–2.7	+FSH*	Testosteron, LH, Prolaktin
RADON et al. 2001	Mobiltelefon	U, K	900 (p)	1 W 1 W/m ²	0.025	+/-Melatonin +Kortisol	
BRAUNE et al. 2002	Mobiltelefon	U	900 (p)	0.25 W	0.5		Noradrenalin, Adrenalin, Endothelin, Kortisol
BURCH et al. 2002	Mobiltelefon	K/M	v.a. analoge Telefone	Normalgebrauch >25min/Tag	<~2	Studie 2: -nächtl. Melatoninkonzentration* -nächtl. Melatoninsekretion*	Studie 1: Melatoninsekretion
VANGELOVA et al. 2002	im Beruf (Satelliten- & TV-Kommunikation)	K/L	ca. 300 ²⁾	0.008 W/m ²	~3·10 ⁻⁵	+11-Oxykortikosteroide	Adrenalin, Noradrenalin

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; L=Langzeit, U=unmittelbar, K=Kurzzeit; ~bezeichnet geschätzte Werte.)

¹⁾ Zeitlicher Höchstwert (einige Stunden pro Tag, während der die Aufenthaltsorte in Senderichtung lagen)

²⁾ Genauer Frequenzbereich nicht publiziert

Bewertung

Im Gegensatz zur Forschung über niederfrequente elektromagnetische Felder und das endokrine System des Menschen gibt es bis jetzt nur wenige Studien, die dieser Frage bezüglich Hochfrequenzstrahlung nachgegangen sind. Diese wenigen Studien haben unterschiedliche Strahlungsquellen, Kollektive, Expositionsdauern und Intensitäten untersucht, was die Vergleichbarkeit heikel macht. Erschwerend kommt dazu, dass die Hormonkonzentrationen natürlicherweise in einem sehr grossen Konzentrationsbereich schwanken. Die Konzentrationen sind durch eine Vielzahl von Faktoren bzw. Rückkoppelungsprozessen beeinflusst. Einzelbefunde sind des-

halb schwierig zu bewerten. Die meisten bisherigen Studien geben kaum Hinweise, dass die Melatoninsekretion durch Hochfrequenzstrahlung bei lokalen SAR₁₀-Werten <0.5 W/kg beeinflusst wird (ALTPETER et al. 1995, DE SEZE et al. 1999, MANN et al. 1998, RADON et al. 2001). Eine Studie fand hingegen Hinweise für eine erniedrigte Melatoninsekretion bei Probanden, die häufig Mobiltelefone (mehrheitlich analoge) benutzten (BURCH et al. 2002). Eine Beeinflussung von TSH und FSH durch Hochfrequenzstrahlung wurde in mehreren Studien beobachtet (DASDAG et al. 1999, GRAJEWSKI et al. 2000, DE SEZE 1998). Ob diese beobachtete Assoziation nur bei einer Strahlungsquelle in unmittelbarer Nähe des Körpers (Telefon, dielektrische Heizer) vorliegt, oder auch bei schwächeren Feldern in der Umgebung von Sendeanlagen zu erwarten ist, kann mit den vorliegenden Studien nicht abgeschätzt werden.

Schwierig zu interpretieren sind die Befunde zu den Wirkungen auf die Stresshormone. Es ist weitgehend ungeklärt, inwiefern in den Studien von BRAUNE et al. 2002 und MANN et al. 1998 die stressenden Untersuchungsumstände (insbesondere Blutentnahme) die Resultate beeinflussten. Es ist denkbar, dass dieser viel grössere, unmittelbare Stressor das Resultat beeinflusst hat. Diesbezüglich weniger problematisch sind Urinuntersuchungen, wie sie von VANGELOVA et al. 2002 durchgeführt wurden. Bei dieser Studie sind die Resultate jedoch davon abhängig, ob das exponierte und das Kontrollkollektiv vergleichbar waren. Der Einfluss von Alter, Geschlecht und Schichtmodell wurden zwar berücksichtigt, andere Faktoren, die das Resultat möglicherweise beeinflussen, können bei diesen relativ kleinen Kollektiven jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Kein Einfluss auf die Konzentration anderer Hormone (STH, LH, ACTH und Prolaktin) konnte bisher in den wenigen Studien bei tiefen Intensitäten nachgewiesen werden.

Insgesamt ist die Datenlage spärlich. Auf dieser Basis ist **nicht beurteilbar**, ob Hochfrequenzstrahlung das Hormonsystem beeinflusst.

7.1.2 Immunsystem

Einführung

Das Immunsystem ist ein funktionelles System zur Erhaltung der Gesundheit, indem es körperfremde Substanzen abwehrt und anomale Körperzellen kontinuierlich eliminiert. Beteiligt an der Immunabwehr sind das lymphatische System sowie im ganzen Organismus verteilte Zellen und Moleküle. Es wird unterschieden zwischen unspezifischen Abwehrmechanismen durch Phagozyten, natürliche Killerzellen, das Komplement und Lysosomen, sowie der spezifischen Immunantwort, die hauptsächlich durch Lymphozyten und spezifische Antikörper vermittelt wird.

Es gibt eine Vielzahl von Studien, die den Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf Lymphozyten in vitro oder in vivo untersucht haben. Lymphozyten gehören zu den menschlichen Zellen mit kurzem Lebenszyklus, d.h. hoher Zellteilungsrate. Es wird vermutet, dass eine allfällige genotoxische Wirkung bei solchen Zellen besonders deutlich zu beobachten wäre (z.B. VEYRET et al. 1991, CHAGNAUD and VEYRET

1999). Studien, die die genotoxische Wirkung bei menschlichen Lymphozyten in vivo untersuchten, werden allerdings nicht hier, sondern in Kapitel 7.3.1 diskutiert.

Der Verdacht einer immunschädigenden Wirkung wurde in jüngster Zeit auch aufgrund der Ergebnisse von Lymphozytentransformationstests geäußert. Dabei werden vor und nach der Exposition durch Hochfrequenzstrahlung (z.B. vor und nach Inbetriebnahme einer Mobilfunkantenne) die sensibilisierten Lymphozyten im Blut bestimmt. Es ist zu beachten, dass dieses in der Allergologie anerkannte Verfahren nicht wissenschaftlich für einen solchen Einsatz evaluiert worden ist. Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte insbesondere die grosse natürliche Schwankungsbreite der immunologischen Parameter berücksichtigt werden (RKI 2002).

Resultate

Es gibt nur 3 Studien, die explizit Einflüsse der Hochfrequenzstrahlung auf das menschliche Immunsystem untersucht haben, sowie eine Studie, die DNS-Schäden bei menschlichen Lymphozyten in vivo untersucht hat. Diese Studien sind in Tabelle 18 zusammengestellt.

RADON et al. 2001 untersuchten den Einfluss des Mobiltelefongebrauchs auf die sIgA- und die Neopterin-Konzentration (spezifische Immunoglobuline) und fanden keinen Zusammenhang. Eine italienische Gruppe (DEL SIGNORE et al. 2000, BOSCOLO et al. 2001) untersuchte verschiedene Lymphozytenzelltypen und IgE-Serumkonzentrationen im Blut bei einem weiblichen Kollektiv in der Umgebung eines TV-/Radiosenders im Vergleich zu einem nicht exponierten Kollektiv. Es wurden signifikante Unterschiede für mehrere untersuchte Parameter gefunden. Die beiden Kollektive unterschieden sich aber nicht nur in Bezug auf die Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung, sondern auch bezüglich anderer Faktoren. Die exponierten Frauen hatten einen leicht höheren Anteil an Atopikerinnen und lebten in einem weniger verkehrsbelasteten Gebiet. Eine Studie an Physiotherapeuten, die beruflich mit Diathermiegeräten mit teilweise sehr hohen Strahlungsemissionen arbeiteten, fand keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu einem unexponierten Kollektiv (TUSCHL et al. 1999).

Tabelle 18: Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das Immunsystem.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
TUSCHL et al. 1999	Diathermiegeräte	L	27, 434, 2450	<1000 V/m <1.2 A/m		-CD4+ (in vitro stimuliert)	Nat. Killerzellen, Leukozytentypen, T- und B-Zellen
DEL SIGNORE et al. 2000	elektrische Anlagen und TV-/Radiosender	L	0.5–3000	11–40 V/m	~0.03–0.35	+IgE* -INF- γ * +CD4+-CD45RO+ (Gedächtniszellen), -CD16+-CD56+ (nat. Killerzellen)	Lymphozyten, CD3+, CD4+CD45RO-, CD3+-CD8, CD19+ (Jungfrau-Lymphozyten)
BOSCOLO et al. 2001	TV-/Radiosender	L	0.5–3000	4.3 V/m	~0.004	-CD4+CD45RO- (Jungfrau-Lymphozyten) -CD16+-CD56+* (nat. Killerzellen) -IL-2* -INF- γ *	Lymphozyten, IgE, CD3+, CD4+
RADON et al. 2001	Mobiltelefon	U, K	900 MHz (p)	1 W 1 W/m ²	0.025		Neopterin, sIgA

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; U=unmittelbar, K=Kurzzeit, M=mittel, L=Langzeit, (p)=gepulste Strahlung; ~bezeichnet geschätzte Werte.)

Bewertung

Das Immunsystem ist ein komplexes System, bestehend aus einer Vielzahl verschiedener Zellen und Moleküle. Entsprechend viele Parameter können untersucht werden und entsprechend gross ist die Wahrscheinlichkeit eines zufälligen, signifikanten Befundes. Zudem kann schon ein kleiner Infekt oder eine Atopie (auch asymptomatisch) die Immunparameter deutlich verändern. Keine dieser wenigen Studien fand unabhängig zwei Mal denselben Effekt. Die wenigen zur Zeit vorliegenden Studien sind zu dürftig, um das Vorhandensein eines Effektes beurteilen zu können.

7.1.3 Gehirnphysiologie

Einführung

Die Elektroenzephalographie ist eine Methode zur Registrierung von Potentialschwankungen des Gehirns als Indikator für dessen Aktivität. Das Elektroenzephalogramm (EEG) repräsentiert die integrierte Aktivität der Neuronen unterhalb der Elektrode, die das Signal misst. Üblicherweise werden für die Messung 21 Elektroden eingesetzt (internationales 10:20 System). Das EEG umfasst einen Frequenzbereich von etwa 0–50 Hz. Man unterscheidet zwischen den Deltawellen (δ : 1–3 Hz), den Thetawellen (θ : 4–7 Hz), den Alphawellen (α : 8–13 Hz), den Betawellen (β : 13–27 Hz) und den Gammawellen (γ : 27–50), wobei die Frequenzverteilung auch leicht variieren kann (ZINK 1990). Eine Unterteilung des Alphabandes in α_1 (7.5–12.5 Hz) und α_2 (12.5–15 Hz) ist auch gebräuchlich, letzteres wird gelegentlich auch als Sigmaband (σ) bezeichnet. Grob können diesen Bändern unterschiedliche Bewusstseinszustände zugeordnet werden. Deltawellen sind charakteristisch für den Tiefschlaf. Thetawellen sind typisch beim Einschlafen, während der Traumphase und unmittelbar vor dem Erwachen. Alphawellen sind charakteristisch für tiefe

Entspannung und Prozesse kurz vor Erreichen der bewussten Wahrnehmung. Der Bereich um 12 Hz korrespondiert mit den Schlafspindeln. Typisch für den Wachzustand und kognitive Prozesse ist die Aktivität im Betaband. Gammawellen sind wenig erforscht und stehen im Zusammenhang mit Hyperaktivität, Angstzuständen, Anspannung und Phasen körperlicher Höchstleistung.

In vielen Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf die Gehirntätigkeit wurden die spontanen Hirnströme mit EEG gemessen, entweder im Schlaf oder im Wachzustand – üblicherweise bei geschlossenen Augen. Generell wurden in diesen Studien die Hirnströme von mehreren Probanden bei jeweils verschiedenen Expositionssituationen aufgezeichnet. Verglichen wurden die verschiedenen Expositionssituationen für jeden Probanden einzeln, so dass jeder Proband als seine eigene Kontrolle diente, was den Einfluss interindividueller Unterschiede minimiert. Meistens wurden die gemessenen Rohdaten einer Spektralanalyse unterzogen, und für jedes Frequenzband des EEG die Leistungen bzw. Amplitude verglichen.

Im Gegensatz zum spontanen EEG wurden teilweise auch sogenannte evozierte Potentiale gemessen. Evozierte Potenziale (EP oder ERP= event related potential) entstehen als Reaktion auf einen sensiblen oder sensorischen Reiz (z.B. auf einen akustischen Reiz (AEP) oder ein visuelles Signal (VEP) bzw. über die Reizverarbeitung (interner Stimulus)). Die Amplitude dieser Potentiale beträgt nur einige μV und ist unter dem spontanen EEG versteckt. Erst mehrfache Stimuli und selektive Analyseverfahren erlauben die Extraktion aus dem Hintergrunds-EEG. Die ereignisinduzierte Gehirnaktivität im Bereich von 15–30 Hz gilt als Korrelat von Wahrnehmungs- und höheren kognitiven Prozessen (EULITZ et al. 1998).

Studien zu den evozierten Potentialen analysierten vielfach zusätzlich auch die Leistungen der Probanden in den durchgeführten Tests, beispielsweise die Richtigkeit der Antworten oder die Reaktionszeit. Diese letzteren Effekte sind in Kapitel 7.1.4 erörtert. Von den Studien, die das spontane EEG während des Schlafs untersuchten, sind in diesem Kapitel nur die Resultate bezüglich EEG präsentiert. Die Ergebnisse in Bezug auf den Schlaf (Qualität, Phasen, etc.) sind in Kapitel 7.2.3 diskutiert.

Resultate

Die Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das EEG sind in Tabelle 19 zusammengestellt.

Spontanes EEG im Wachzustand

Die erste Studie über den Einfluss gepulster Hochfrequenzstrahlung auf das EEG beim Menschen publizierte VON KLITZING 1995. 17 Probanden wurden einer Strahlung von 150 MHz ausgesetzt, die mit 217 Hz gepulst war. Die berechnete Strahlungsleistung in 6 cm Gehirntiefe war kleiner als 10 mW/m^2 . Innerhalb von 15 Minuten wurden die Probanden im Wachzustand 2–3 Mal während einiger Minuten exponiert. Dabei ergab sich für die erste Exposition kein Unterschied zur vorangehenden Kontrollperiode. Jedoch war die Amplitude in der darauffolgenden 2. Kontrollperiode im Bereich von 10 Hz (α -Band) deutlich erhöht und blieb auf diesem Niveau.

Ebenfalls ein zeitlich verzögerter Expositionseffekt auf das spontane EEG im Wachzustand wurde in der Studie von REISER et al. 1995 an je 18 Frauen und Män-

nern gefunden. Das gepulste Magnetfeld (150 kHz, 9 Hz) eines medizinischen Gerätes (Mega-Waver) erhöhte die Amplitude des EEG im Frequenzbereich 12.75–35 Hz während der Exposition und bis eine halbe Stunde danach statistisch signifikant. In den anderen Frequenzbändern war die Erhöhung teilweise signifikant. Die Magnetflussdichte durch den Mega-Waver wurde mit 400 pT beziffert. Ein Mobiltelefon erzeugte keine signifikant erhöhten EEG-Amplituden während der 15-minütigen Expositionsphase; eine Erhöhung ergab sich jedoch 15 bis 30 Minuten nach der Exposition, und zwar im Frequenzbereich 12.75–18.5 Hz sowie im Delta-Band (1.25–4.5 Hz).

Keinen Effekt einer Mobiltelefonexposition auf alle Frequenzbänder des spontanen EEG im Wachzustand beobachteten RÖSCHKE and MANN 1997 an 34 gesunden Freiwilligen im Alter von 21 bis 35 Jahren. Es handelte sich um gepulste GSM 900-Strahlung mit einer Leistungsflussdichte am Kopf der Probanden von rund 0.5 W/m². Die Exposition dauerte jedoch nur 3.5 Minuten und die Kontrollsituation war nur um eine halbe Stunde von der Exposition separiert. Latenzzeiten, wie sie in den vorgenannten Studien beobachtet wurden, hätten mit diesem Studienprotokoll Effekte verwischt.

LEBEDEVA et al. 2000 fanden bei Experimenten an 24 Männern während einer 15-minütigen Exposition, dass eine sogenannte Multikanal-Korrelationsdimension D2 unmittelbar nach Expositionsbeginn deutlich anstieg. Die D2 wurde mittels nichtlinearer Analyse aus dem EEG berechnet. Nach 2 Minuten begann sie zu sinken, verblieb aber während weiteren 6–7 Minuten höher als bei Scheinexposition. In der 15-minütigen Nach-Expositionsperiode war D2 wieder erhöht im Vergleich zur Kontrollsituation. Die Autoren ziehen die Schlussfolgerung, dass die räumlich-zeitliche Organisation der Hirnprozesse beeinflusst wurde. Diese Befunde sprechen für eine stärkere Aktivität der Hirnrinde bei Exposition, was möglicherweise die kognitive Verarbeitung im Gehirn verbessere.

HIETANEN et al. 2000 untersuchten in einer Testserie mit 10 Männern und 9 Frauen den Einfluss von 5 verschiedenen Mobiltelefonen auf das spontane EEG im Wachzustand bei geschlossenen Augen. Die 5 verschiedenen Expositionen sowie eine Scheinexposition erfolgten in zufälliger Reihenfolge an 6 verschiedenen Tagen während jeweils 20 Minuten. Die Exposition durch eines der fünf Telefone war in einer Hirnregion signifikant mit einer Erhöhung im Delta-Band assoziiert. Alle anderen Unterschiede (179 t-Tests) waren statistisch nicht signifikant. Die Autoren zogen die Schlussfolgerung, dass dieser einzige positive Befund zufällig zustande kam.

Ebenfalls keinen Effekt auf das spontane EEG fanden JECH et al. 2001 bei einer Untersuchung an Narkoleptikern (Patienten mit zwanghaften Schlafanfällen).

Zu einem anderen Ergebnis kommen CROFT et al. 2002. Sie exponierten 24 Personen gegenüber einem Mobiltelefon, das zwischen Hinterkopf und Hinterhauptsbein positioniert war. Die Sendeleistung wurde nicht gemessen und mit 3–4 mW geschätzt. In der rechten Hemisphäre war die Amplitude des Delta-Bandes bei Exposition signifikant erniedrigt. Die Amplitude des Alpha-Bandes war am Hinterkopf bei Exposition signifikant erhöht, nicht aber im Stirnbereich. Zusätzlich nahm die

Amplitude im Alpha-Band mit zunehmender Expositionsdauer zu, während sie unter Kontrollbedingungen zeitlich konstant blieb.

Tabelle 19: Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das Elektroenzephalogramm.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	EEG-Typ	Assoziation	keine Assoziation
VON KLITZING 1995	Sphärische Antenne	U ¹⁾	150 (p)	<~20V/m	~0.12	spontan, wach	+α*	α-Band in der 1. Exp.-periode
REISER et al. 1995	Mobiltelefon	U ¹⁾	902.4 (p) 0.150 (p)	8 W (40 cm) 400 pT	~0.04	spontan, wach	Nach-Expositionsphase: +α2* +β* +δ	∅, α1
MANN and RÖSCHKE 1996	Mobiltelefon	K	900 (p)	8 W (40 cm) 0.5 W/m ²	~0.04	spontan, Schlaf	während REM: +(1–20 Hz)* Interaktion α-Band mit Schlafphase*	
RÖSCHKE and MANN 1997	Mobiltelefon	U	900 (p)	0.5 W/m ²	~0.04	spontan, wach		δ, ∅, α, β keine sensible Subgruppe
EULITZ et al. 1998	Mobiltelefon	U	916.2 (p)	0.35 W	0.9	evoziert und spontan	+(19–31 Hz)-Band*	durchschnittliches spontanes EEG
FREUDE et al. 1998	Mobiltelefon	U	916.2 (p)	0.35 W	0.9	evoziert	-SP*	kein Effekt bei anspruchsllosem Test
URBAN et al. 1998, HLADKY et al. 1999	Mobiltelefon	U ¹⁾	?	0.13 W	~0.3	evoziert		Visuell evoziertes Potential (VEP)
WAGNER et al. 1998	Mobiltelefon	K	900 (p)	0.2 W/m ²	0.6	spontan, Schlaf		EEG
BORBELY et al. 1999	drei λ/2-Antennen	U/K	900 (p)		1	spontan, Schlaf	1. Nicht-REM-Phase: +(7–14 Hz)* ab 2. Nicht-REM-Phase: +(13.5–14 Hz)*	keine Effekte während REM-Phasen
FREUDE et al. 2000	Mobiltelefon	U	916.2 (p)	0.35 W	0.9	evoziert	anspruchsvoller Test: -SP*	BP, CNV und SP bei anspruchsllosem Test
FRITZER et al. 2000	Antenne	M	900 (p)		<2	spontan, Schlaf		kein Einfluss bei Exponierten
HIETANEN et al. 2000	Mobiltelefon	U	900 & 1800 (p)	0.13–1 W	~0.3–~2.3	spontan, wach	+δ-Band*	alle anderen Bänder
HUBER et al. 2000	planare Antenne	U ²⁾	900 (p)		1	spontan, Schlaf	in der ersten Nicht-REM-Phase: +α *	Ab 2. Nicht-REM-Phase kein Effekt mehr
KRAUSE et al. 2000	Mobiltelefon	U	900 (p)	0.25 W	~0.6	assoziiert	Rückkodierungsphase: +8–10 Hz-ERP* -4–6 Hz-ERP +6–8 Hz-ERP +10–12 Hz-ERP	keine Effekte während Merkphase
LEBEDEVA et al. 2000	Mobiltelefon	U ¹⁾	902.4	0.6 W/m ²	~0.05	spontan, wach	+Multikanalkorrelationsdimension*	Nach 6–7 Min. Exp. kein Effekt mehr

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	EEG-Typ	Assoziation	keine Assoziation
WAGNER et al. 2000	Mobiltelefon		900 (p)	50 W/m ²	1.8			EEG-Leistungsdichte in allen Bändern
JECH et al. 2001	Mobiltelefon	U ¹⁾	900	0.25 W	0.06	evoziert und spontan	während der Exposition: +ERP*	spontanes EEG, ERP nach der Exposition
LEBEDEVA et al. 2001	Mobiltelefon	K	?	Keine Angaben		spontan, Schlaf	+α-EEG* +β-EEG -θ-EEG	
HUBER et al. 2002	planare Antenne	U ²⁾	900 (p) 900 (cw)		1	spontan, Schlaf	Gepulst: +10 Hz* (vor dem Einschlafen) +(12.25–13.5 Hz)* (Phase II) Kontinuierlich: -14 Hz* (Phase II)	
CROFT et al. 2002	Mobiltelefon	U	900 (p)	~3–4 mW	~0.009	evoziert und spontan	spontan: +α* -δ evoziert -β* +γ*	θ, β, γ (spontan) δ, α (evoziert)

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; U=unmittelbar, K=Kurzzeit, M=mittel, L=Langzeit, (cw)=kontinuierliche Strahlung; (p)=gepulste Strahlung; EEG=spontan, ERP=Ereignisbezogen; ~bezeichnet geschätzte Werte.)

¹⁾ EEG-Datenaufzeichnung länger als Expositionsdauer (Latenz)

²⁾ Exposition erfolgte nur vor dem Schlaf

Spontanes EEG im Schlaf

Eine Reihe von Studien untersuchte die Wirkung von Mobiltelefonexposition auf das spontane EEG im Schlaf. Bei der Studie von MANN and RÖSCHKE 1996 erfolgte die Exposition von 14 jungen Männern während einer ganzen Nacht mit einem GSM-Mobiltelefon. Damit resultierte beim Kopf der Probanden eine Leistung von 0.5 W/m². Die Studie fand in der Expositionsnacht in jedem Band zwischen 1 und 20 Hz eine tendenziell erhöhte Amplitude während der REM-Phasen. Statistisch signifikant wurde das Resultat, wenn eine zusammenfassende Analyse für alle Bänder zwischen 1 und 20 Hz gemacht wurde. In den nicht-REM-Phasen waren die Amplituden in allen Frequenzbändern bei Exposition (statistisch nicht signifikant) tiefer als in der Kontrollnacht. Eine weitere Studie an 24 Schlafenden bei niedrigerer Exposition (0.2 W/m²), aber ansonsten gleichen Versuchsbedingungen wie bei MANN and RÖSCHKE 1996 ergab keine signifikanten Einflüsse der Exposition auf das gesamte EEG im Bereich von 1–15 Hz oder auf einzelne Frequenzbänder in diesem Bereich (WAGNER et al. 1998). Aus den publizierten Daten ist nicht ersichtlich, ob die Resultate der Vorgängerstudie – Erhöhung der EEG-Leistung in der REM-Phase und Erniedrigung in den anderen Schlafphasen – zumindest in der Tendenz bestätigt wurden. In einer dritten Studie wurde die Exposition deutlich erhöht (WAGNER et al. 2000). Die Leistungsflussdichte betrug 50 W/m² und die SAR₁₀ wurde mit 1.8 W/kg beziffert. Wiederum wurde kein signifikanter Effekt

durch die Mobiltelefonexposition während der ganzen Nacht auf das EEG festgestellt.

Einflüsse auf das EEG im Schlaf wurden auch von BORBELY et al. 1999 an 24 Männern untersucht. Die Exposition erfolgte während der ganzen Nacht, wobei das Feld abwechselungsweise je 15 Minuten ein- und ausgeschaltet war. Mit drei $\lambda/2$ -Dipolantennen wurde im Kopfbereich der Probanden ein homogenes Feld erzeugt. Die Feldstärke wurde so gewählt, dass ein lokaler maximaler SAR₁₀ -Wert von 1 W/kg nicht überschritten wurde. Im Gegensatz zu MANN and RÖSCHKE 1996 fand diese Studie keinen Effekt während der REM-Phase, jedoch signifikante Effekte während der Nicht-REM-Schlafphasen. Bei der ersten Nicht-REM-Phase war die EEG-Amplitude im Bereich 7–14 (α -Band) in der Expositionsnacht im Vergleich zur Kontrollnacht signifikant erhöht. In den folgenden Nicht-REM-Phasen wurden die Unterschiede zunehmend kleiner und reduzierten sich auf den Frequenzbereich von 13.5–14 Hz. Dieser Bereich korrespondiert mit den Schlafspindeln. Die Ergebnisse könnten darauf hinweisen, dass bei permanenter Exposition eine gewisse Adaptation an die Situation stattfindet.

Eine Nachfolgestudie im selben Labor untersuchte den Einfluss einer Exposition **vor** dem Schlaf an 16 jungen Männern auf das EEG **während** des Schlafs (HUBER et al. 2000). Die Probanden wurden vor dem Schlaf während 30 Minuten einem Feld, das dem einer Mobilfunkbasisstation ähnlich war, ausgesetzt, das eine SAR₁₀ von max. 1 W/kg im Kopf erzeugte. Wiederum war nach einer Exposition das α -Band in den ersten 30 Minuten der Nicht-REM-Schlafphasen erhöht. Danach fand eine Angleichung statt.

Eine dritte Studie derselben Gruppe (HUBER et al. 2002) fand bei gleichem Expositionsprozedere, dass die Resultate abhängig vom Signaltyp des applizierten Feldes waren. Ein pulsmoduliertes Feld, wie es von GSM-Telefonen emittiert wird, erhöhte die EEG-Amplitude sowohl vor dem Einschlafen (im 10-Hz Band) als auch in der Schlafphase II (im Band 12.25–13.5 Hz). Im Gegensatz zur Vorgängerstudie (HUBER et al. 2000) verschwand der Effekt im Verlauf der Nacht nicht, sondern wurde immer ausgeprägter. Ein kontinuierliches Feld der gleichen Intensität hatte dagegen im Vergleich zur Scheinexposition keinen Einfluss vor dem Einschlafen und erniedrigte die Amplitude in der Schlafphase II (im 14 Hz Band). Das Frequenzband von 12–14 Hz korrespondiert mit den Schlafspindeln, die charakteristisch für die 2. Schlafphase sind.

In einer weiteren Studie wurde bei 20 Männern in allen Schlafphasen eine erhöhte EEG-Amplitude im α -Band gefunden, wenn die Probanden während des Schlafs gegenüber einem Mobiltelefon exponiert waren (LEBEDEVA et al. 2001). Die Multikanal-Korrelationsdimension D2, die als Indikator für Hirnfunktionswechsel bezeichnet wurde, war bei Exposition statistisch signifikant tiefer als in der Kontrollnacht.

Die einzige Studie, die den Effekt einer Exposition durch ein GSM-Telefon während mehrerer Nächte untersuchte, fand bei 10 Männern sowohl nach einer als auch nach sechs Expositions Nächten keinen Einfluss auf das EEG im Vergleich zur Kontrollnacht ohne Exposition (FRITZER et al. 2000). Hingegen war bei den 10 männli-

chen Kontrollpersonen nach sechs (nicht exponierten) Nächten das α -Band während der REM-Phasen im Vergleich zur Kontrollnacht signifikant erhöht. Dafür wird von den Autoren keine Erklärung geliefert. Damit stellt sich die Frage, ob die Methodik der Studie adäquat war.

Evozierte Potentiale

Eine Studie, die den Effekt eines Telefonates mit einem GSM-Telefons auf das visuell evozierte Hirnpotential (VEP) an 10 jungen Frauen und 10 jungen Männern untersuchte, fand keinen Effekt (URBAN et al. 1998, HLADKY et al. 1999). Die durchgeführten Auswertungen sind in der Publikation allerdings nicht transparent beschrieben.

EULITZ et al. 1998 untersuchten die ereignisinduzierte Gehirnaktivität im Beta-Band als Korrelat der neuronalen Aktivität, die mit höheren kognitiven- und Wahrnehmungsprozessen assoziiert ist. Das Untersuchungskollektiv umfasste 13 Männer zwischen 21 und 27 Jahren. Als Emittent wurde ein GSM-Mobiltelefon verwendet. Die über den ganzen Zeitraum gemittelte Amplitude des EEG war bei Exposition im Vergleich zur Kontrollsituation unverändert. Jedoch war im ereignisassoziierten Zeitfenster die Intensität im Frequenzbereich 19–31 Hz in den am stärksten exponierten Hirnregionen erhöht, jedoch nicht im Zeitfenster, das dem testrelevanten Stimulus vorausging. Daraus wurde geschlossen, dass das induzierte Potential (ERP) beeinflusst wird, jedoch nicht das spontane EEG.

Zwei Studien (FREUDE et al. 1998, FREUDE et al. 2000) untersuchten den Einfluss gepulster Mobilfunkstrahlung auf das langsame Hirnpotential (SP). Das langsame Hirnpotential ist eine spezielle Charakteristik der ereignisassoziierten Potentiale. Diese treten vor einer freiwilligen Aktion (Bereitschaftspotential, BP) auf oder zwischen einem Warn- und einem imperativen Stimulus (Contingent negative variation, CNV). Die SP beziehen sich auf Prozesse, die mit ‚sich bereit machen‘ zusammenhängen. Diese Prozesse sind wichtig für eine effektive motorische oder mentale Durchführung der Aktion. Auf der physiologischen Ebene werden SP interpretiert als ein Indikator für die Zuweisung der Ressourcen zu einem spezifischen Netzwerk für die zukünftige Aktion. Die beiden Studien fanden bei jungen Männern, dass bei Exposition gegenüber gepulster Mobilfunkstrahlung das langsame Hirnpotential (SP) signifikant erniedrigt war, wenn die Probanden einen Zeiger genau bei der 12 Uhr-Position stoppen mussten. Es war sowohl die linke als auch die rechte Hirnhälfte betroffen. Die Effekte waren aber stärker in den am meisten exponierten Hirnregionen. Keinen Einfluss auf das SP wurde jedoch bei folgenden, weniger anspruchsvollen Tests festgestellt: i) um das Bereitschaftspotential (BP) zu untersuchen, mussten die Probanden 30 Mal einen Knopf in selbstgewähltem Tempo drücken; ii) für die CNV-Untersuchung musste ein Zeiger gestoppt werden, sobald er sich zu bewegen begann. Die Autoren schliessen aus ihren Ergebnissen, dass eine Assoziation zwischen der Exposition und den SP nur bei Prozessen auftritt, bei denen die kortikalen Hirnregionen involviert sind. Dies war bei den relativ anspruchsvollen Reaktionstests der Fall, nicht aber bei den simplen motorischen Tests.

Ein weiterer Test an 16 freiwilligen Probanden bestand darin, sich Wörter zu merken (Merkphase) und anschliessend zu entscheiden, ob sich ein im ersten Durch-

gang nicht erwähntes Wort unter den in einem zweiten Durchgang präsentierten Wörtern befand (Rückkodierungsphase). Dabei ergaben sich signifikante Effekte einer Mobiltelefonexposition auf das ERP (KRAUSE et al. 2000). Die Wirkung war nur in der Rückkodierungsphase zu beobachten und bestand darin, dass im EEG-Frequenzband von 8–10 Hz die ereignisbezogene Synchronisation (ERS) unter Exposition signifikant erhöht war. In den Frequenzbändern 6–8 Hz sowie 10–12 Hz war die Erhöhung nicht signifikant und im Frequenzband 4–6 Hz war die ERS nicht signifikant erniedrigt. Im 4–6 Hz-Band repräsentiert die ERS kortikale Aktivität, während sie im Bereich 6–12 Hz mit kortikaler Inaktivität assoziiert ist. Die Befunde in allen Frequenzbändern suggerieren demnach, dass die Exposition durch ein Mobiltelefon die kortikale Aktivität erniedrigt. Die Autoren nehmen an, dass eine erniedrigte kortikale Aktivität mit beschleunigten mentalen Prozessen assoziiert ist. Eine solche Beschleunigung wurde in anderen Studien auch bezüglich der Reaktionszeiten gefunden (siehe Kapitel 7.1.4).

Der Einfluss einer Mobiltelefonexposition auf das spontane EEG und das ereignisbezogene Potential (ERP) wurde bei 22 Patienten, die unter Narkolepsie litten, untersucht, indem ihnen visuelle Reize auf einem Bildschirm präsentiert wurden (JECH et al. 2001). Das Mobiltelefon hatte keinen Einfluss auf das spontane EEG nach der Exposition. Jedoch war das ERP während der Exposition verändert, wenn der Stimulus auf der rechten Bildschirmseite präsentiert wurde. Dieser Befund wurde mit den unterschiedlichen Funktionalitäten der beiden Hirnhälften und der asymmetrischen Expositionsanordnung erklärt.

CROFT et al. 2002 zeichneten die Hirnströme als Reaktion auf einen akustischen Stimulus auf. Dabei wurde eine signifikante Abnahme der Amplitude im 12–30 Hz Band beobachtet, sowohl im Durchschnitt als auch als Funktion der Zeit. Eine unter Kontrollbedingungen im Theta-Band beobachtete Abnahme der Amplitude mit der Zeit wurde durch die Exposition gegenüber einem Mobiltelefon unterdrückt. Die Amplitude im Gamma-Band war in den stärker exponierten Kopfgebieten erhöht.

Bewertung

Mehrere Studien haben den Einfluss von Mobiltelefonen auf die Hirnpotentiale mit unterschiedlichen Expositions- und Analysemethoden untersucht. Am konsistentesten nachgewiesen wurde eine Erhöhung der Amplitude im α -Band bei Exposition gegenüber einem Mobiltelefon (VON KLITZING 1995, REISER et al. 1995, MANN and RÖSCHKE 1996, BORBELY et al. 1999, HUBER et al. 2000, HUBER et al. 2002, KRAUSE et al. 2000, LEBEDEVA et al. 2001, CROFT et al. 2002). Mehrfach gefunden wurde auch eine erhöhte Intensität im β -Band (REISER et al. 1995, EULITZ et al. 1998). Die Befunde im θ - und δ -Band waren weniger konsistent, tendenziell wurden jedoch eher erniedrigte Amplituden beobachtet (LEBEDEVA et al. 2001, KRAUSE et al. 2000, CROFT et al. 2002, HIETANEN et al. 2000, REISER et al. 1995). Mehrere Studien zeigten, dass die Wirkung länger als die unmittelbare Expositionszeit andauerte (VON KLITZING 1995, REISER et al. 1995, HUBER et al. 2002, HUTTER 2000, LEBEDEVA et al. 2000). Es gibt Indizien für ein zeitlich verzögertes Auftreten der Effekte (VON KLITZING 1995, REISER et al. 1995, HUBER et al. 2002), jedoch auch für Adaptionseffekte (BORBELY et al. 1999). Es scheint, dass die Effekte bei ereignisbezogenen Hirnpotentialen (ERP) am besten reproduzierbar waren. Eben-

falls recht konsistent waren die Wirkungen beim spontanen EEG im Schlaf, wobei unklar ist, ob nur der paradoxe (REM), orthodoxe oder beide Schlafphasen betroffen waren. Am wenigsten reproduzierbar waren die Resultate beim spontanen EEG im Wachzustand. Teilweise fanden hier Experimente keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Potential im α - oder β -Band und der EMF-Exposition. Möglicherweise erhöhen im Wachzustand andere Einflussfaktoren die Variabilität der Potentiale, so dass der Signifikanznachweis schwieriger wird. Wahrscheinlich spielt auch eine Rolle, dass spontane EEG meistens mittels Spektralanalyse ausgewertet werden, während bei evozierten Potentialen komplexe Analyseverfahren eingesetzt werden. Durch letztere kann ein Signal besser aus dem Hintergrundrauschen extrahiert werden.

Die beobachteten Effekte traten bei Intensitäten auf, bei denen die Temperaturerhöhung im Gehirn nicht mehr als 0.2 °C beträgt. Eine solche Erhöhung sollte physiologisch kompensiert werden können. Es ist daher wahrscheinlich, dass nicht-thermische Wirkungsmechanismen eine Rolle spielen. Diese Hypothese wird auch dadurch gestützt, dass in einer Studie bei gleicher SAR ein pulsmoduliertes und kontinuierliches Feld unterschiedliche Effekte hatten (HUBER et al. 2002).

Die Gesundheitsrelevanz der gefundenen Effekte ist schwierig zu beurteilen. Die beobachteten EEG-Änderungen stellen sicherlich nicht direkt ein Gesundheitsrisiko dar. CROFT et al. 2002 beschreiben die Einflüsse als stärker als die Wirkung einer starken Tasse Kaffee, jedoch als schwächer als das Schliessen der Augen. Einerseits könnte es sich um reversible physiologische Effekte handeln, vergleichbar der Anpassung der Pupille bei unterschiedlichem Lichteinfall. Auf der anderen Seite ist auch denkbar, dass es sich nicht um einen direkten Effekt auf das EEG handelt, sondern dass sich andere Wirkungen auf das Zentralnervensystem im veränderten EEG manifestieren. Insbesondere wenn die Wirkung länger als die unmittelbare Exposition anhält, kann es sich nur um indirekte/komplexe Wirkungen handeln. Um welche Art Prozesse es sich handeln könnte, und ob diese mit pathologischen Wirkungen assoziiert sind, ist zur Zeit ungeklärt.

Zusammenfassend werden die Befunde als insgesamt recht konsistent beurteilt. Es ist wahrscheinlich, dass die Exposition gegenüber einem Mobiltelefon das EEG beeinflusst. Was dies für die Gesundheit bedeutet, ist nicht beurteilbar. Die Effekte traten im allgemeinen bei einer lokalen SAR₁₀ von rund 1 W/kg auf. Einige Arbeiten fanden Effekte bei tieferen Expositionen. In diesen Studien wurde die Exposition jedoch nur unzuverlässig bestimmt.

7.1.4 Reizwahrnehmung und Reizverarbeitung

Einführung

Der Einfluss einer Mobiltelefonexposition auf die Reizwahrnehmung und -verarbeitung durch das Zentralnervensystem wurde in einigen Studien mit verschiedenen experimentellen Tests untersucht. Ziel dieser Tests war es, Hirnfunktionen in verschiedenen Hirnregionen spezifisch zu untersuchen. Entsprechend sind verschiedene Prozesse der Reizwahrnehmung und Reizverarbeitung im Zentralnervensystem beteiligt.

Dabei gelangten folgende Experimente zum Einsatz:

- Simple Reaktionstests: Bei diesen Tests müssen die Probanden einen unspezifischen Stimulus (auditiv oder visuell) möglichst rasch quittieren, z.B. mit einem Mausklick.
- Wahl-Reaktionstests: Bei diesen Tests wird von den Probanden verlangt, auf einen spezifischen Stimulus mit einer spezifischen Reaktion zu antworten. Beispielsweise erscheinen zufällig Zahlen zwischen 0 und 9 auf einem Bildschirm, die entsprechend über die Tastatur eingegeben werden müssen.
- Wachsamkeitstests: Solche Tests stellen keine grossen kognitiven Herausforderungen dar, verlangen jedoch eine konzentrierte Aufmerksamkeit über eine gewisse Zeitspanne.
- Arbeitsgedächtnistests: In diesen Tests wird zuerst eine Information präsentiert, die man sich im Gedächtnis merken muss. Darauf folgt eine Aufgabe, bei der die memorierten Informationen abgerufen werden müssen.
- Arithmetische Tests: Die Probanden haben Rechenaufgaben zu lösen. Dabei ist das Arbeitsgedächtnis involviert.
- Objekterkennung: Erkennen von Formen, Bildern, Mustern oder Objekten
- Semantik: Die Erfassung der Bedeutung von Wörtern

Während bei den simplen Reaktionstests praktisch keine kognitiven Gehirnfunktionen beteiligt sind, erfordern komplexere Tests eine grosse kognitive Leistung oder den Einsatz des Arbeitsgedächtnisses.

Resultate

Die Studien zu Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung auf die Reizwahrnehmung und -verarbeitung sind in Tabelle 20 zusammengestellt.

In einer deutschen Studie zu den Einflüssen der Mobiltelefonexposition auf das evozierte Hirnpotential (siehe S. 83) mussten Probanden drei Tests mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad absolvieren (FREUDE et al. 1998, FREUDE et al. 2000). Die Leistung in diesen Tests (Anteil richtiger Antworten) war nicht mit der Exposition assoziiert. PREECE et al. 1999 führten bei insgesamt 36 Probanden eine Reihe von unterschiedlichen Tests bei drei Expositionssituationen durch: Scheinexposition, Analogtelefon mit einer Leistung von 1 W und Digitaltelefon mit 0.125 W mittlerer Leistung. Statistisch signifikant verkürzt war die Wahlreaktionszeit, und zwar am stärksten beim Analogtelefon. Die Reaktionszeit in den anderen Tests war tendenziell unter Exposition ebenfalls kürzer, die Ergebnisse waren jedoch statistisch nicht signifikant. Die Richtigkeit der Testergebnisse zeigte keinen konsistenten Zusammenhang mit der Expositionssituation. Bei diesen Experimenten mit einem Mobiltelefon in der üblichen Gesprächshaltung war der Gyrus angularis am stärksten exponiert. Der Gyrus angularis befindet sich seitlich im hinteren Teil des Kopfes, etwa dort, wo sich auch die Antenne bei der üblichen Mobiltelefonhaltung befindet. Nur auf der linken Hirnseite (auch bei Linkshändern) dient er als Relaisstation zwischen den visuellen und sprachlichen Hirnregionen. Er ist somit involviert in physiologische Prozesse bei Wahlreaktionstests. Dass bei der Studie von PREECE et al. 1999 kein Einfluss auf Gedächtnisprozesse gefunden wurde, führen die Autoren darauf zurück, dass sich die beteiligten Hirnareale tiefer im Kopf oder weiter weg von der Antenne befinden und weniger exponiert waren.

Ebenfalls Wahlreaktionstests wurden in der Studie von CROFT et al. 2002 durchgeführt (siehe S. 79). Bei Exposition gegenüber einem Mobiltelefon waren die Richtigkeit der Zuordnung tendenziell besser und die Reaktionszeit verkürzt. Die Befunde waren jedoch nicht statistisch signifikant.

Tabelle 20: Übersicht über Studien zu Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung auf die Reizwahrnehmung/Reizverarbeitung.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
MEISTER A. et al. 1989	Mikrowellen-therapiegerät	K	2450	1–10 W/m ²	~0.06–0.64	+Zahlensuchzeit ±Erkennungsschwelle (tachistoskopische Wahrnehmungsprobe)	
FREUDE et al. 1998	Mobiltelefon	U/K	916.2 (p)		0.9		Genauigkeit bei einem Reaktionstest
PREECE et al. 1999	Mobiltelefon	U/K	915 (analog) 915 (p)	1 W 0.125 W	~2.3 ~0.3	-Reaktionszeit in Wahl-Reaktionstest* -div. Reaktionszeiten	Richtigkeit der Tests Arbeitsgedächtnis
FREUDE et al. 2000	Mobiltelefon	U/K	916.2 (p)		0.9		Genauigkeit bei einem Reaktionstest
FRITZER et al. 2000	Mobiltelefon-imitat	M ¹⁾	900 (p)		<2		Aufmerksamkeits- und Gedächtnisfunktionen
KOIVISTO et al. 2000B	Mobiltelefon	U/M	902 (p)	0.25 W	~0.6	-Fehlerrate bei Wachsamkeitstest* -simple Reaktionszeit* -Reaktionszeit bei Wachsamkeitstest* -Rechenzeit*	Fehlerrate (außer bei Wachsamkeitstest), Zeit für Bild-/Objekterkennung, Semantik, Wahlreaktionszeit
KOIVISTO et al. 2000A	Mobiltelefon	U/M	902 (p)	0.25 W	~0.6	-Reaktionszeit bei hoher Arbeitsgedächtnisladung*	Arbeitsgedächtnis: Richtigkeit, Zeit
KRAUSE et al. 2000	Mobiltelefon	U/K	900 (p)	0.25 W	~0.6		Richtigkeit bei einem auditiven Gedächtnistrainig
JECH et al. 2001	Mobiltelefon	U/K ¹⁾	900	0.25 W	0.06	-Reaktionszeit für Mustererkennung	
LEE et al. 2001	Mobiltelefon	L ¹⁾	-	bei Normalgebrauch	<~2	+ Richtigkeit bei Aufmerksamkeitstest (Wege zeichnen)*	Richtigkeit bei Aufmerksamkeitstest (sortieren, Worterkennung)
MAIER 2001	Mobiltelefon	U/K ¹⁾	902 (p)	1 mW/m ²	~8·10 ⁻⁵	+Zeit für Bestimmung der Ordnungsschwelle	
EDELSTYN and OLDERSHAW 2002	Mobiltelefon	U	900 (p)		1.2	+ Aufmerksamkeitskapazität* -Verarbeitungszeit*	
CROFT et al. 2002	Mobiltelefon	U	900 (p)	~3–4 mW	~0.009	+Richtigkeit -Reaktionszeit	

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; U=unmittelbar, K=Kurzzeit, M=mittel, L=Langzeit, (p)=gepulste Strahlung; ~bezeichnet geschätzte Werte.)

¹⁾ Tests wurden nicht während der Exposition durchgeführt.

In einer Reihe von Tests wurden von KOIVISTO et al. 2000B verschiedene Hirnfunktionen unter dem Einfluss eines Mobiltelefons untersucht. Die Rechenzeit bei einem arithmetischen Test sowie die Reaktionszeit in einem simplen Reaktions- und einem Wachsamkeitstest waren unter Feldeinfluss signifikant kürzer. Die Reaktionszeiten in den übrigen Tests waren unter Feldeinfluss mehrheitlich kürzer, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Die Fehlerrate war beim Wachsamkeitstest unter Feldeinfluss signifikant geringer, bei den übrigen Tests gab es keine signifikanten Unterschiede.

In einer weiteren Studie der gleichen Gruppe wurden Effekte auf das Arbeitsgedächtnis untersucht (KOIVISTO et al. 2000A). Dabei wurde unter Feldeinfluss eine verkürzte Verarbeitungszeit beobachtet, wenn die Ladung des Arbeitsgedächtnisses hoch war, nicht aber bei den anspruchslöseren Testsituationen. Die Fehlerrate war nicht mit der Exposition assoziiert. Bei einer ähnlichen, in einer anderen Studie (KRAUSE et al. 2000) verwendeten Testsituation wurde ebenfalls festgestellt, dass die Richtigkeit von Arbeitsgedächtnisprozessen unbeeinflusst von der Mobiltelefonexposition war. Die Bearbeitungszeit wurde in dieser Studie nicht analysiert (siehe S. 84).

EDELSTYN and OLDERSHAW 2002 führten bei 38 Probanden, die mittels eines Mobiltelefons während 30 Minuten entweder real- oder scheinexponiert wurden, vier Aufmerksamkeits- und zwei Verarbeitungsgeschwindigkeitstests durch. Von den 4 Aufmerksamkeits- und zwei Verarbeitungsgeschwindigkeitstests, die im Wesentlichen darin bestanden, mündlich präsentierte Daten nach verschiedenen Regeln zu wiederholen, schnitten die Probanden bei zwei Tests unter Exposition signifikant besser ab. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit war bei einem Test signifikant verkürzt.

Eine signifikante Verkürzung der Reaktionszeit um rund 20 ms wurde bei Narkoleptikern in Mustererkennungstests unter Mobiltelefonexposition festgestellt (JECH et al. 2001, siehe S. 84).

Bei einem Experiment mussten Probanden auf einem Blatt zufällig verstreute Zahlen von 1 bis 49 in der richtigen Reihenfolge antippen (MEISTER A. et al. 1989). Die Exposition erfolgte durch ein Mikrowellentherapiegerät der Frequenz 2.45 GHz. Bei einer Feldstärke von 61 V/m war die benötigte Zeit länger als bei Scheinexposition. Dies war in erster Linie auf das vermehrte Auftreten von ‚blockings‘, d.h. Reaktionszeiten länger als 6 Sekunden zurückzuführen. Bei einer Feldstärke von 43 V/m wurden keine Unterschiede festgestellt und bei 19 V/m benötigte nur das Kollektiv eine längere Zeit, welches im 2. Versuchsabschnitt exponiert wurde. Dies deuteten die Autoren als eine EMF-Wirkung, die nur im vorbelasteten Organismus zum Tragen komme. Die Wahrnehmungsfähigkeit wurde anhand der Erkennungsschwelle für die tachistoskopische Wahrnehmungsprobe evaluiert. Dabei wurde bestimmt, wie lange die Probanden brauchen, um festzustellen, an welcher Position sich eine Öffnung in einem visuell präsentierten Ring befindet. Bei einer Frequenz von 2.45 GHz war bei der stärksten Belastung von 61 V/m die Erkennungszeit reduziert, bei 43 V/m erhöht und bei 19 V/m wurde kein Effekt gefunden. Keiner der Befunde war statistisch signifikant.

Ebenfalls den Einfluss auf die Wahrnehmungsfähigkeit untersuchte MAIER 2001, indem er die Zeit für die Bestimmung der Ordnungsschwelle (OS) nach der Exposition gegenüber einem Mobiltelefon bzw. einer Scheinexposition ermittelte. Die OS ist definiert als der zeitliche Abstand zweier auditiver Reize, bei dem es dem Probanden gerade noch gelingt, die zeitliche Abfolge der Seiten (links/rechts bzw. rechts/links) fehlerfrei zu bestimmen. Die Probanden bestimmten die OS vor und nach einer 50-minütigen Exposition durch ein GSM-Telefon (902 MHz/217 Hz), das 4 cm vom linken Ohr entfernt platziert war. Die Leistungsflussdichte wurde mit 1 mW/m^2 angegeben, was für die beschriebene Expositionssituation erstaunlich tief ist. Es wurde beobachtet, dass 9 von 11 Probanden nach der Exposition länger für die Bestimmung der Ordnungsschwelle brauchten, als wenn sie während der Pause nicht exponiert waren. Der Autor verweist darauf, dass ein Zusammenhang zwischen der kognitiven Leistungsfähigkeit und der Bestimmung der Ordnungsschwelle bestehe. Er schliesst aus der Studie, dass die Mobilfunkexposition die mentale Regeneration reduziert, und dass dadurch die kognitive Leistungsfähigkeit verringert wird.

FRITZER et al. 2000 (siehe S. 82) untersuchten die Auswirkungen einer längeren Expositionsdauer (6 Nächte unter Bestrahlung) auf Aufmerksamkeits- und Gedächtnisfunktionen. Bei dieser Studie wurden keine Unterschiede zwischen dem real- und dem scheinexponierten Kollektiv gefunden. Die Resultate deuten darauf hin, dass die in anderen Studien gefundenen unmittelbaren Effekte auf die kognitiven Funktionen reversibel sind und nach der Exposition nicht mehr nachgewiesen werden können.

Einen weiteren Versuch, die langfristigen kognitiven Wirkungen der Mobilfunkexposition zu untersuchen, stellt die Studie von LEE et al. 2001 dar. Die Leistung von jugendlichen Mobiltelefonbenutzern in mehreren Konzentrationstests wurde mit derjenigen von Jugendlichen verglichen, die keine Mobiltelefone nutzen. Dabei wurde bei einem von drei Tests beobachtet, dass die Telefonbenutzer signifikant besser abschnitten. Diese Resultate sind jedoch kaum auf eine positive Langzeitwirkung der Mobiltelefonbenützung auf die kognitiven Funktionen zurückzuführen. Wahrscheinlicher ist eine Verzerrung des Resultates durch einen Selbstselektionsbias im Sinne, dass Personen, die besser mit Multi-Tasking-Situationen zurechtkommen, sich eher ein Mobiltelefon zulegen (PETRIDES 2001).

Bewertung

Die bisherigen Studien legen nahe, dass unter Exposition durch ein Mobiltelefon die Reaktionszeit tendenziell verkürzt wird. Praktisch alle Studien zeigen diese Tendenz, obwohl die Resultate nicht absolut konsistent sind. Teilweise trat der Effekt nur bei simplen Reaktionstests auf. Tendenziell zeichnet sich jedoch ab, dass die Effekte mit zunehmender kognitiver Beanspruchung deutlicher hervortreten. Dennoch gibt es auch Hinweise, dass die Wahrnehmungsfähigkeit eher verschlechtert wird. Zumindest in einer Studie war dieser Befund auf sogenannte ‚Blockings‘ (Mini-Absenzen) zurückzuführen. Das heisst, dass die Reaktionszeit in einzelnen Versuchen deutlich länger war als bei den übrigen Versuchen derselben Person. In

den meisten Studien werden solche Ausreisser in der Datenanalyse nicht berücksichtigt.

Bei diesen Effekten, die alle unterhalb des ICNIRP-Grenzwerts für die lokale SAR₁₀ auftraten, stellt sich die Frage nach dem Wirkungsmechanismus. Beschleunigte Reaktionszeiten werden häufig mit einer milden Erwärmung des Hirngewebes durch die Mikrowellenexposition erklärt, da in vivo und in vitro festgestellt wurde, dass bei einer Temperaturzunahme um 0.3 bis 0.6 °C die Geschwindigkeit von Nervenimpulsen zunimmt (LIN 1999). Diese Hypothese ist jedoch noch nicht bewiesen. Gegen eine thermisch bedingte, schnellere Reizleitung spricht, dass die Temperaturerhöhung im Gehirn, auch wenn man die Wärmeabgabe des Akkus des Mobiltelefons berücksichtigt, kaum über 0.2 °C beträgt (GANDHI et al. 2001). Eher plausibel ist, dass die beobachtete Reduzierung der Reaktionszeiten um etwa 10 ms durch eine veränderte Synapsenphysiologie, möglicherweise durch minimalen thermalen Stress hervorgerufen wird (PREECE et al. 1999). Es wurde auch beobachtet, dass Mikrowellen unter nicht-thermischen Bedingungen zu einem Anstieg von Hitzeschockproteinen führen (FRENCH et al. 2001), die ihrerseits mit einer Vasodilatation (Erweiterung der Blutgefäße) assoziiert sind und dadurch einen Einfluss auf die Hirnphysiologie ausüben könnten (PREECE et al. 1999). Interessant sind in diesem Zusammenhang die Befunde von HUBER et al. 2002 (siehe S. 82). Nach einer 30 minütigen Exposition gegenüber einem GSM 900 Mobiltelefon, konnte mit einem Positron-Emissions-Tomographen (PET) nachgewiesen werden, dass der zerebrale Blutfluss im Stirnbereich der exponierten Kopfseite signifikant erhöht war. Dieser Gehirnbereich ist entscheidend mit Prozessen des Arbeitsgedächtnisses assoziiert.

Insgesamt bilden die bisherigen Studien Evidenz, dass die Exposition gegenüber einem Mobiltelefon mit grosser Wahrscheinlichkeit einen Effekt auf kognitive Prozesse hat. Welche Prozesse des Zentralnervensystems in welcher Art beeinflusst werden, konnte noch nicht konsistent dargelegt werden. Hingegen scheint die Richtigkeit in kognitiven oder Reaktionstests nicht mit der Exposition assoziiert zu sein. Ein diesbezüglicher Zusammenhang scheint eher unwahrscheinlich. Die gefundenen Effekte traten bei maximalen lokalen SAR₁₀ von rund 1 W/kg auf. Studien mit tieferen Expositionen fanden in der Tendenz die gleichen Ergebnisse, jedoch nicht statistisch signifikant.

Inwiefern die gefundenen Effekte gesundheitsrelevant sind, ist zur Zeit nicht beantwortbar. Verkürzte Reaktionszeiten bedeuten an sich keine Gesundheitsgefährdung. Leider gibt es noch praktisch keine Studien, die solche Tests nach der Exposition durchführten und untersuchten, wie lange die Effekte fortbestehen. Dies würde Rückschlüsse auf die Persistenz bzw. Reversibilität der Effekte erlauben. In Analogie zu den Resultaten der EEG-Studien würden über die Exposition hinaus andauernde Wirkungen nicht erstaunen.

7.1.5 Mikrowellen-Hören

Einführung	Das Mikrowellen-Hören ist ein seit langem bekanntes Phänomen, das im Zusammenhang mit gepulster Strahlung auftreten kann (DE SEZE 1998).
Resultate	Bereits anfangs der 60er Jahre wurde beobachtet, dass bei Exposition gegenüber scharf gepulster Mikrowellenstrahlung Geräusche hörbar waren (FREY 1961). Die Geräusche wurden als Klicken, Surren, etc. beschrieben und traten schon bei durchschnittlichen (zeitlich gemittelten) Leistungsflussdichten von einigen zehn mW/m^2 (einigen V/m) auf. Zuerst wurde dieses, als Mikrowellen-Höreffekt bezeichnete Phänomen, als Folge eines nicht-thermischen Wirkungsmechanismus interpretiert. Mittlerweile ist unbestritten, dass der Effekt durch thermoelastische Wellen verursacht wird, die nach der Absorption von gepulster Strahlung im weichen Hirngewebe entstehen (LIN 2001). Massgebend für die Wahrnehmung ist jedoch nicht die durchschnittliche (zeitlich gemittelte) Leistungsflussdichte, sondern die Energieflussdichte pro Puls (in mJ/m^2). Die Wahrnehmungsschwelle ist je nach Proband individuell verschieden. Für kurze Pulse von weniger als $30 \mu\text{s}$ Dauer und einer Trägerfrequenz von 3 GHz liegt sie zwischen 20 und 1400 mJ/m^2 . Ein $30 \mu\text{s}$ -Puls der Stärke 100 mJ/m^2 korrespondiert mit einer maximalen spezifischen Absorption von 10 mJ/kg und entspricht einer momentanen SAR von 300 W/kg während des Pulses (DE SEZE 1998). ICNIRP 1998 beziffert die Wahrnehmungsschwelle mit $100\text{--}400 \text{ mJ/m}^2$ für Pulse $<30 \mu\text{s}$ und leitet daraus eine Schwelle für die spezifische Absorption von $4\text{--}16 \text{ mJ/kg}$ ab.
Bewertung	<p>Das Mikrowellen-Hören ist der einzige nicht-thermische Effekt, der von der ICNIRP berücksichtigt wird. Die kleinste beobachtete Energieflussdichte pro Puls, die einen Mikrowellen-Höreffekt verursacht, beträgt 20 mJ/m^2. Bei einer Pulsdauer von $30 \mu\text{s}$ entspricht dies einer Leistungsflussdichte von rund 670 W/m^2 während des Pulses. Bei repetitiven Pulsen mit kurzer Pulsdauer und langer Wartezeit zwischen den Pulsen, wie dies für Radarstrahlung typisch ist, können die Pulse bereits bei sehr niedriger durchschnittlicher Leistungsflussdichte wahrgenommen werden. ICNIRP hat daher zusätzlich zur zeitlich gemittelten Leistungsflussdichte auch den Spitzenwert der Leistungsflussdichte begrenzt. Dieser wurde pragmatisch 1000 Mal höher als der 6 Minuten Grenzwert festgesetzt. Für Trägerfrequenzen oberhalb von 2 GHz beträgt er $10'000 \text{ W/m}^2$. Bei einer Wahrnehmungsschwelle von nur 670 W/m^2 ist damit auch bei eingehaltenem ICNIRP-Grenzwert mit Höreffekten zu rechnen.</p> <p>Die Pulsierung des GSM-Mobilfunks ist nicht vergleichbar mit der Pulsierung der Radarstrahlung. Die Pulsdauer ist bei GSM mit $577 \mu\text{s}$ fast 20 mal länger als im oben beschriebenen Beispiel. In der Literatur wurde bisher nicht beschrieben, ob so lange Pulse überhaupt hörbar sind. Bisher gibt es keine Hinweise darauf, dass das Phänomen bei der GSM Strahlung bei Einhaltung der ICNIRP-Grenzwerte aufgetreten ist.</p>

7.1.6 Herz-Kreislaufsystem

Einführung

Herz-Kreislaferkrankungen gehören in den industrialisierten Ländern zu den häufigsten Krankheiten und Todesursachen. Allfällige schädliche Wirkungen von elektromagnetischen Feldern in diesem Bereich sind deshalb von erheblichem Interesse.

Resultate

Die Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das Herz-Kreislaufsystem sind in Tabelle 21 zusammengestellt.

In der Schwarzenburg-Studie (siehe S. 71) wurde anhand einer Befragung von Personen, die in drei unterschiedlich belasteten Gebieten um einen Kurzwellensender lebten, ein Einfluss der Kurzwellenstrahlung auf den Bluthochdruck untersucht (ALTPETER et al. 1995). Bluthochdruck wurde in den 3 unterschiedlich exponierten Zonen statistisch signifikant verschieden angegeben. In der am stärksten belasteten Zone A gaben 17% an, unter Bluthochdruck zu leiden, in Zone B 15% und in Zone C 12%. Ärztlich diagnostizierter Bluthochdruck wurde von 14%, 8% und 8% der Personen in den Zonen A, B und C angegeben. Eine Nachuntersuchung zeigte, dass die selbst gemachten Angaben relativ zuverlässig mit Blutdruckmessungen übereinstimmten (Sensitivität: 88%; Spezifität: 82%). Mit einer Korrektur für mögliche Falschangaben ergab sich allerdings kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Bluthochdruck und Expositionsstatus mehr (OR=1.4; 95%-CI: 0.75–2.5).

Eine polnische Studie untersuchte Einflüsse der Radiostrahlung auf das Herz-Kreislaufsystem bei 71 exponierten männlichen Arbeitern auf einer Radiostation im Vergleich zu einem Kontrollkollektiv (BORTKIEWICZ et al. 1996, BORTKIEWICZ et al. 1997, BORTKIEWICZ et al. 1995). Die mittlere Exposition während eines Arbeitstages lag bei rund 15 V/m. Höchstwerte variierten zwischen den Personen des Kollektivs und betragen im Mittel 164 V/m, wobei individuell Feldstärken bis 500 V/m während einiger Minuten täglich auftraten. Bei den exponierten Arbeitern wurden signifikant mehr Abnormalitäten in den Ruhe-EKG- und 24h-EKG-Daten beobachtet als im Kontrollkollektiv. Analysen, unterteilt nach den verschiedenen Abnormalitäten, ergaben die grössten Unterschiede für Rhythmusstörungen ($p=0.06$). Nur gering waren die Unterschiede in den Leitungs- und Repolarisationsstörungen. Der F3-Parameter, interpretiert als Indikator für den parasympathischen Nervensystemtonus, war signifikant negativ mit der Exposition korreliert. Pathologische EKG-Befunde sowie Pulsrate und Bluthochdruck waren zwischen Exponierten und Kontrollen nicht signifikant verschieden, jedoch war das Tag-Nacht-Verhältnis des systolischen Blutdruckes und der Pulsrate im exponierten Kollektiv signifikant tiefer.

Tabelle 21: Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das Herz-/Kreislaufsystem.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
ALTPETER et al. 995	Kurzwellenradiosender	L	6.1–21.8	1–50 mA/m ¹ (~0.4–20 V/m)		+selbstreportierter Bluthochdruck*	
BORTKIEWICZ et al. 1996, BORTKIEWICZ et al. 1997, BORTKIEWICZ et al. 1995	Radiosender	K/L	0.74–.5	Max.: 164V/m Durchschnitt: 15 V/m		+Abnormalitäten im Ruhe- und 24h-EKG* +Rhythmusstörungen -F3-Parameter*	Pathologische EKG-Abnormalitäten, Pulsrate, Bluthochdruck
BRAUNE et al. 1998 ²⁾	Mobiltelefon	U	900 (p)	0.25 W ³⁾	~0.6	+diastolischer BD* +systolischer BD* +Vasokonstriktion* -Puls*	
MANN et al. 1998	Mobiltelefon	U, K	900 (p)	0.2 W/m ²	0.3		Pulsrate
DREYER et al. 1999A	Mobiltelefon	L	800–900 & 1800	Bei Normalgebrauch	<~2		Herz-Kreislauf-Todesfälle
BRAUNE et al. 2002	Mobiltelefon	U	900 (p)	0.25 W	0.5		diastolischer BD, systolischer BD, Vasokonstriktion, Puls

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; U=unmittelbar, K=Kurzzeit, L=Langzeit, (p)=gepulste Strahlung; ~bezeichnet geschätzte Werte.)

¹⁾ Zeitlicher Höchstwert (einige Stunden pro Tag, während der die Aufenthaltsorte in Senderichtung lagen)

²⁾ Ergebnisse zurückgezogen

³⁾ in der Publikation nicht klar beschrieben, wahrscheinlich 2 W Spitzenleistung, 0.25 W Durchschnittsleistung

Experimentell wurde von BRAUNE et al. 1998 der Einfluss einer 35-minütigen Exposition durch ein Mobiltelefon in der üblichen Gebrauchshaltung auf Kreislaufparameter untersucht. Dabei wurde beobachtet, dass bei realer Exposition der systolische und der diastolische Blutdruck signifikant um 5–10 mm Hg höher waren als bei Scheinexposition. Bei anschliessend durchgeführten Bewegungsübungen war die Vasokonstriktion bei vorheriger Exposition signifikant stärker als ohne, beim Blutdruck bestanden keine signifikanten Unterschiede. Bei Exposition durch das Mobiltelefon war die Pulsfrequenz sowohl während der Expositionsphase als auch während der Bewegungsübungen signifikant tiefer als bei Scheinexposition. Um Langzeiteffekte der Exposition zu eliminieren, wurde immer zuerst die Scheinexposition durchgeführt und dann die reale Exposition, ohne dass dies den Probanden mitgeteilt wurde. Dennoch ist dies als methodische Limitierung zu betrachten. Die Autoren der Studien haben 4 Jahre später ihre Ergebnisse zurückgezogen (BRAUNE et al. 2002). Sie konnten zeigen, dass im Verlaufe des Experimentes der Blutdruck anstieg, unabhängig von der Expositionssituation. Bei der ersten Studie, bei der die wahre Exposition immer nach der Scheinexposition erfolgte, sei dieser Anstieg des

Blutdrucks fälschlicherweise als Folge der Mobiltelefonexposition interpretiert worden. Die wissenschaftliche Bewertung der 2. Studie ist heikel. Die Varianzanalyse wird ohne p-Werte für den Faktor Mobilfunkstrahlung präsentiert (nur als nicht signifikant bezeichnet), Interaktionsterme mit dem Faktor Mobilfunkstrahlung fehlen und graphische Analysen zum kapillaren Blutfluss lassen einen Effekt der Mobiltelefonexposition vermuten. Dies wird jedoch in der Studie nicht kommentiert.

Die Exposition gegenüber einem Mobiltelefon im Schlaf hatte bei einer lokalen SAR₁₀ von 0.3 W/kg keinen signifikanten Einfluss auf die Pulsrate (MANN et al. 1998, siehe S. 72).

Eine amerikanische Studie analysierte die Todesfälle einer Kohorte von knapp 300'000 Mobiltelefonbenutzern in Bezug auf den verwendeten Telefentyp: handgehaltene Geräte mit eingebauter Antenne versus Geräte mit externer Antenne (DREYER et al. 1999A). Es wurde angenommen, dass die Benutzer von letzteren weniger stark strahlungsexponiert sind als die Benutzer von handgehaltenen Geräten. Bezüglich 176 Herz-Kreislauftodesfällen wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Benutzergruppen gefunden.

Bewertung

Der Einfluss von hochfrequenter Strahlung auf das Herz-Kreislaufsystem wurde bisher kaum untersucht. Es gibt zur Zeit wenig Ansätze für eine Hypothese, wie solche Effekte direkt durch hochfrequente Strahlung verursacht sein könnten. Diskutiert wird zuweilen eine Beeinflussung über den physiologischen Schrittmacher des Herzens (Sinusknoten). Denkbar wäre auch, dass sich im Herz-Kreislaufsystem Effekte von elektromagnetischer Strahlung indirekt manifestieren. Beispielsweise, dass Strahlungsexposition einen psychischen Stress erzeugt, den Schlaf beeinflusst, etc. und sich dies im Herz-Kreislaufsystem manifestiert, so dass möglicherweise der Bluthochdruck als Indikator für den erlebten Stress steht. Die Resultate der Schwarzenburg-Studie sind möglicherweise in diese Richtung interpretierbar. Einerseits bestand im Studiengebiet schon vor der Untersuchung seit längerem eine Polemik um die Schädlichkeit des Senders, andererseits wurden Zusammenhänge zwischen der Exposition und der Schlafqualität gefunden (siehe Kapitel 7.2.3).

Eine polnische Studie zeigte (BORTKIEWICZ et al. 1996, BORTKIEWICZ et al. 1997, BORTKIEWICZ et al. 1995), dass verschiedene Parameter des Herz-Kreislaufsystems durch eine relativ hohe Exposition gegenüber Radiostrahlung beeinflusst wurden. Die Aussagekraft dieser Studie ist davon abhängig, ob das exponierte Kollektiv mit dem Kontrollkollektiv vergleichbar war. Der Einfluss von Alter und Geschlecht wurde berücksichtigt. Jedoch kann der Einfluss von anderen Faktoren (z.B. Sportverhalten) nicht beurteilt werden. Die Autoren schliessen aus ihrer Studie, dass eine mehrjährige Exposition gegenüber Radiostrahlung mit hohen Feldstärken keinen beträchtlichen Risikofaktor für ischämische Herzkrankheiten darstelle. Jedoch scheine die Strahlung die Funktion des autonomen Nervensystems zu beeinflussen.

Zwei experimentelle Studien zu den Wirkungen der Mobiltelefonexposition auf den Blutdruck sind schwierig zu interpretieren (BRAUNE et al. 1998, BRAUNE et al. 2002). Die erste Studie ist methodisch mangelhaft und die Ergebnisse wurden zurückgezogen. Die zweite Studie ist schlecht dokumentiert.

Kein statistischer Zusammenhang zwischen Mobiltelefonbenutzung und Herz-Kreislauftodesfällen wurde in der grossen amerikanischen Registerstudie (DREYER et al. 1999B) gefunden. Es ist allerdings fraglich, ob mit dem gewählten Studienansatz ein reales Risiko signifikant hätte festgestellt werden können. Bei solchen Registerstudien besteht nämlich das Problem, dass die Personen, die als Mobiltelefon-Benutzer registriert sind, häufig nicht mit den tatsächlichen Benutzern übereinstimmen (Eltern, Geschäftstelefone, etc.). Dazu kommt, dass die Langzeitexposition der beiden Kollektive in der Realität möglicherweise nicht so unterschiedlich war, wie dies für den Studiendesign angenommen wurde. Handgehaltene Telefone mit integrierter Antenne, denen eine höhere Exposition zugeschrieben wurde, sind in Amerika nämlich noch nicht so lange verbreitet wie die Autotelefone. Das bedeutet, dass die durchschnittliche Benützungsdauer von handgehaltenen Telefonen kürzer ist als die von Autotelefonen. Andererseits ist die Sendeleistung bei Geräten mit einer externen Antenne rund 5 Mal höher.

Insgesamt ist auf der Basis der bisherigen Studien nicht beurteilbar, ob das Herz-Kreislaufsystem bei Expositionen unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte beeinträchtigt wird. Eine Studie gibt einen Hinweis, dass hohe Feldstärken auf das autonome Nervensystem wirken, und sich dadurch Parameter des Herz-Kreislaufsystems verändern. Diese Veränderungen wurden als nicht pathologisch klassifiziert. Die Gesundheitsrelevanz von Einflüssen auf das Herz-Kreislaufsystem lässt sich nicht generell klassifizieren. In Anbetracht der Tatsache, dass Herz-Kreislaufkrankungen in den industrialisierten Ländern zu den häufigsten Krankheiten und Todesursachen gehören, sind Veränderungen potenziell gravierend. Bereits eine geringe Risikohöherung würde eine grosse Anzahl von Fällen bedeuten. Individuell stellen kleine Veränderungen von Herz-Kreislaufparametern (z.B. Pulsrate) jedoch nicht unbedingt ein Gesundheitsrisiko dar.

7.2 Wirkungen auf das Befinden

Es gibt eine Reihe von Studien, die mit Hilfe von Befragungen einen Zusammenhang zwischen hochfrequenter Strahlung und dem Befinden untersucht haben, häufig bei Benutzern von Mobiltelefonen. Charakteristisch bei diesen Untersuchungen ist, dass es sich um selbst wahrgenommene Symptome handelt. Zu den Symptomen, die im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern am häufigsten genannt werden, gehören Schlafstörungen, Kopfschmerzen, Schwindelgefühl, Tinnitus, Nervosität, Konzentrationsstörungen, Hitzegefühl, Hautausschläge, Müdigkeit, Muskelverspannungen, Rheuma und Depressionen. Viele der genannten Symptome sind durch viele Faktoren (mit-)beeinflusst und unspezifisch. Die Objektivierbarkeit durch Messungen/Diagnosen ist oft erschwert. Dennoch sind bei diesen Studien zum Teil neben den Befragungen auch Methoden zur Messung der Symptome eingesetzt worden. Im vorliegenden Kapitel sind die untersuchten Beschwerden in die Unterkapitel allgemeines Wohlbefinden, Kopfschmerzen, Schlaf, psychisches Befinden und elektromagnetische Hypersensibilität unterteilt (siehe 7.2.1 bis 7.2.5).

7.2.1 Wohlbefinden allgemein

Einführung

Es gibt viele Spontanberichte, wonach sich das allgemeine Befinden bei Exposition gegenüber elektromagnetischer Strahlung verschlechtert. Typisch genannte Symptome in diesem Zusammenhang sind Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel, Müdigkeit/Mattigkeit, Antriebslosigkeit, Kribbelgefühle, Hitzegefühl oder Brennen auf der Haut. Im hochfrequenten Bereich wurden solche Symptome bisher vor allem bei Benutzern von Mobiltelefonen untersucht.

Resultate

Die Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das allgemeine Befinden sind in Tabelle 22 zusammengestellt.

Obwohl es viele Einzelfallberichte zu unspezifischen Symptomen bei Exposition gegenüber elektromagnetischer Strahlung gibt, sind nur wenige wissenschaftlich publiziert. HOCKING and WESTERMAN 2000 berichteten über den Fall eines 72-jährigen Geschäftsmannes, der an 2 aufeinanderfolgenden Tagen ein je einstündiges Telefonat mit einem GSM-Telefon durchführte. Anschliessend traten Dysästhesiesymptome (Empfindungsstörungen) auf der rechten Gesichtseite auf. Ein Neurologe fand keine Gleichgewichts- oder Hörstörungen. Die Wahrnehmungsschwelle für Berührung war auf der rechten Gesichtseite 3 mal höher als normal, links wurden normale Werte gemessen. Beim zweiten Einzelfall handelte es sich um einen Antennenoperator, der bei der Arbeit versehentlich der Strahlung einer Antenne ausgesetzt war (HOCKING and WESTERMAN 2001). Die Feldstärke wird mit 7.5 (Schulter) bis 15 V/m (Kopf) beziffert, was für Antennennähe relativ tief ist. Er fühlte während der Exposition ein Wärmegefühl im Bauch, danach traten Kopfschmerzen und in der folgenden Nacht Schlaflosigkeit auf. Am nächsten Tag berichtete der Arbeiter über einen trüben Blick. Neurophysiologische Sensibilitätstests waren einen Monat nach der Exposition noch deutlich verschieden vom Normalbereich. Nach 6 Monaten waren die Werte immer noch leicht erhöht, aber im Normalbereich.

Mehrere Studien untersuchten das Befinden von Mobiltelefonbenutzern. 40 Freiwillige, die sich auf ein Inserat gemeldet hatten, berichteten hauptsächlich über ein unangenehmes Wärmegefühl (11 Personen), dumpfen Schmerz (10) und verschiedene andere Symptome wie Schmerzen, Klopfen, Stechen und Druck (HOCKING 1998). Am häufigsten wurden die Symptome in der Schläfengegend wahrgenommen (17), am Ohr (9) und am Hinterkopf (9). Die Symptome begannen meist Minuten nach dem Telefonat (23), manchmal auch mit grösserer Verzögerung (11). Sie klangen teilweise innerhalb einer Stunde ab (19), dauerten bis zum Abend (15) oder bis zum nächsten Tag (5) an. Bei Freisprecheinrichtungen traten keine Symptome auf, 3 Personen hatten jedoch Beschwerden, wenn sie das Telefon am Gürtel mittrugen.

Neben diesem selbstselektierten Kollektiv wurden Symptome im Zusammenhang mit der Mobiltelefonbenützung in Skandinavien an rund 17'000 zufällig ausgewählten Personen untersucht (SANDSTROM et al. 2001, OFTEDAL et al. 2000). Die Befragten benutzten beruflich entweder ein analoges Telefon (NMT) oder ein digitales GSM-Telefon. In Schweden gaben 13% der Befragten Beschwerden im Zusam-

menhang mit Mobiltelefonen an, in Norwegen war der Anteil mit 31% deutlich höher. Die Symptome und deren Häufigkeitsreihenfolge waren in beiden Ländern ähnlich. Am häufigsten wurde über ein Wärmegefühl am Ohr geklagt, dann folgten brennende Haut, Kopfschmerzen, Schwindel, Unbehagen und Müdigkeit. Wärmegefühl und Brennen traten praktisch immer schon während des Gesprächs auf, die anderen Symptome häufig erst danach. Die Symptome verschwanden meistens innerhalb von 2 Stunden, manchmal dauerten sie aber länger als 6 Stunden an. Alle Symptome traten bei Personen, die länger bzw. häufiger telefonierten, vermehrt auf. Multivariate Analysen bestätigten diesen Befund. Zusätzlich ergaben sich statistisch signifikant mehr Symptome bei Analogtelefonbenutzern als bei GSM-Benutzern. Ausgehend von der Hypothese, dass das Symptom ‚Wärmegefühl am Ohr‘ durch die Wärmeabgabe des Akkus verursacht sein könnte und nicht durch die hochfrequente Strahlung, wurde eine zusätzliche Datenanalyse ohne dieses Symptom durchgeführt. Die Resultate blieben unverändert. In Norwegen haben 1.6%, in Schweden 0.5% der Befragten wegen dieser Symptome bereits einen Arzt aufgesucht. Der assoziierte Arbeitsausfall betrug 1.1% (Norwegen) bzw. 0.13% (Schweden).

Tabelle 22: Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das allgemeine Befinden.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
HOCKING 1998	Mobiltelefon	U		bei Normalgebrauch	<~2	+Brennende Haut +dumpfer Schmerz +Kopfschmerzen	
CHIA et al. 2000B, CHIA et al. 2000A	Mobiltelefon	U/L	v.a. GSM	bei Normalgebrauch	<~2	+Kopfschmerzen*	Visuelle Störungen, Prickeln im Gesicht/ Ohr, Müdigkeit/ Mattigkeit, Gedächtnis- schwierigkeiten, Konzentrations- schwierigkeiten, Schwindel
FRITZER et al. 2000	Antenne	U/M	900 (p)		<2		Befindlichkeit
HOCKING and WESTERMAN 2000	Mobiltelefon	U/K	GSM	bei Normalgebrauch	<~2	+Dysästhesie	
OFTEDAL et al. 2000	Mobiltelefon	U/L	GSM/ NMT	bei Normalgebrauch	<~2	+Brennende Haut* +Wärmegefühl* +Kopfschmerzen* +Schwindel* +Unbehagen* +Müdigkeit* +Konzentrations-schwierigkeit* +Gedächtnisschwierigkeit* +Kribbeln*	

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
HOCKING and WESTERMAN 2001 (Fallbeispiel)	Mobilfunk-basisstation	U	878.49	0.15–0.6 W/m ² ~7.5–15 V/m	~0.01–0.05	+Kopfschmerzen +trüber Blick +Sensitivitätstest	
KOIVISTO et al. 2001	Mobiltelefon	U	902 (p)	0.25 W	~0.6		Kopfschmerzen, Schwindel, Müdigkeit, prickelnde/juckende Haut, Hautrötungen, Wärmegefühl
SANDSTROM et al. 2001	Mobiltelefon	U/L	GSM/ NMT	bei Normalgebrauch	<~2	+Wärmegefühl* +Brennende Haut* +Kopfschmerzen* +Schwindel* +Unbehagen* +Müdigkeit* +Konzentrationsschwierigkeit* +Gedächtnisschwierigkeit* +Kribbeln*	
SANTINI et al. 2001B	Mobiltelefon	U/L	900/1800	bei Normalgebrauch	<~2	Unterschiede zwischen GSM 1800- und GSM 900- Benutzern: +Konzentrationsschwierigkeit*	keine Unterschiede zwischen Mobiltele- fon-Benutzern und Nicht-Benutzern
SANTINI et al. 2001A, SANTINI et al. 2002	Mobilfunk-Basisstation	M/L	900/1800	Wohndistanz 0–300m		+Müdigkeit* +Reizbarkeit* +Kopfschmerzen* +Übelkeit* +Appetitlosigkeit* +Schlafstörungen* +Neigung zu Depressionen* +Unwohlsein* +Konzentrationsschwierigkeiten* +Gedächtnisverlust* +Hautprobleme* +Sehstörungen* +Hörstörungen* +Schwindel* +Störungen des Bewegungsap- parates* +Herz-Kreislaufprobleme*	

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; U=unmittelbar, M=mittel, L=Langzeit, (p)=gepulste Strahlung; ~bezeichnet geschätzte Werte.)

Bei einer Fragebogenstudie mit 161 Studenten und Arbeitern einer französischen Ingenieurschule wurde nach Kopfschmerzen, Konzentrations- und Gedächtnisschwierigkeiten, Müdigkeit, Schlafstörungen, Unbehagen und Wärmegefühl im Gesicht/am Ohr gefragt (SANTINI et al. 2001B). Die Symptommhäufigkeit war zwischen Mobiltelefonbenutzern und Nicht-Benutzern nicht verschieden. Benutzer von 1800 MHz-Geräten hatten jedoch signifikant häufiger Konzentrationsschwierigkeiten als Benutzer von 900 MHz-Geräten.

In einer Querschnittsstudie bei 808 zufällig ausgewählten Männern und Frauen zwischen 12 und 70 Jahren wurde nach spezifischen Gesundheitsbeschwerden des Zentralnervensystems und dem Gebrauch von Mobiltelefonen gefragt (CHIA et al. 2000B). Dabei zeigte sich, dass rund 45% der Befragten Mobiltelefone benutzten. Kopfschmerzen waren signifikant mit der Häufigkeit des Mobiltelefongebrauchs assoziiert. Für die anderen untersuchten Symptome wurden keine statistisch signifikanten Zusammenhänge zum Mobiltelefongebrauch gefunden. Prickeln und brennende Empfindungen im Gesicht oder am Ohr waren bei Mobiltelefonierenden häufiger, während Schwindel, visuelle Störungen, Müdigkeit, Gedächtnis- und Konzentrationsschwierigkeiten tendenziell bei Nicht-Benutzern häufiger waren.

Keinen Einfluss auf das morgendliche Befinden fanden FRITZER et al. 2000 in einer Studie, bei der die Auswirkungen einer nächtlichen Mobiltelefonexposition untersucht wurden (siehe S. 82). Ebenfalls keinen Effekt auf das Befinden fanden KOIVISTO et al. 2001 bei einer experimentellen Studie. Dabei wurden 48 Probanden an 2 aufeinanderfolgenden Tagen einmal während 60 Minuten einem GSM-Telefon ausgesetzt und einmal scheinexponiert (einfachblind, zufällige Reihenfolge). Danach wurden sie nach der Stärke verschiedener Symptome (Kopfschmerzen, Schwindel, Müdigkeit, prickelnde/juckende Haut, Hautrötungen und Wärmegefühl) befragt.

SANTINI et al. 2002 publizierten eine Studie, die die Häufigkeit von unspezifischen Gesundheitssymptomen in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Wohnort und Mobilfunkbasisstationen untersuchte. Dabei wurden 530 Fragebogen analysiert, mit denen Angaben zum Schweregrad und zur Auftretenshäufigkeit verschiedener Symptome erfragt wurden. Die Studienteilnehmer hatten zudem die Wohndistanz zur Mobilfunkbasisstation zu schätzen. Folgende Symptome traten in der Nähe von Mobilfunkantennen signifikant häufiger auf: Müdigkeit, Reizbarkeit, Kopfschmerzen, Übelkeit, Appetitlosigkeit, Schlafstörungen, Neigung zu Depressionen, Unwohlsein, Konzentrationsschwierigkeiten, Gedächtnisverlust, Hautprobleme, Sehstörungen, Hörstörungen, Schwindel, Störungen des Bewegungsapparates und Herz-Kreislaufprobleme. Die Studie erfüllt jedoch die grundlegendsten Anforderungen an eine wissenschaftliche Publikation nicht, da die angewandte Methode nur mangelhaft beschrieben wurde. Es ist beispielsweise nicht klar, welche Personen einen Fragebogen ausgefüllt haben, wie sie ausgewählt wurden, nach welchen Symptomen gefragt wurde, wie zuverlässig die Schätzung der Distanz zur Basisstation ist, etc. Zudem wurde schon mehrfach gezeigt, dass bei zufällig ausgewählten Punkten keine Korrelation zwischen der Feldstärke und der Distanz zur Basisstation besteht (siehe Abbildung 4). Damit ist die Distanz zur nächsten Basisstationen ein ungeeignetes Expositionsmass. In dieser Form publiziert kann nur spekuliert werden, wie die Ergebnisse dieser Studie zustande kamen. Mögliche Erklärungen sind eine selektive Auswahl der Personen, die einen Fragebogen ausfüllten, systematische Fehler bei der Schätzung der Distanz zwischen Wohnort und Basisstation oder bei den Angaben zu den Symptomen.

Bewertung

Im Zusammenhang mit dem Gebrauch von Mobiltelefonen wurden folgende Symptome genannt: ein Wärmegefühl am Ohr, brennende Haut, Kopfschmerzen,

Schwindel, Unbehagen, Müdigkeit, Schmerzen und Druckgefühle (SANDSTROM et al. 2001, OFTEDAL et al. 2000, HOCKING 1998). Die Symptome traten im Verlauf des Telefonates oder unmittelbar danach auf und klangen in den meisten Fällen innerhalb von 1 bis 2 Stunden ab. Andere Studien fanden jedoch keinen Zusammenhang zwischen der Mobiltelefonbenützung und den genannten Symptomen (SANTINI et al. 2001B, KOIVISTO et al. 2001, FRITZER et al. 2000).

In der skandinavischen Studie wurde unter zwei Gesichtspunkten eine Dosis-Wirkungsbeziehung beobachtet. Erstens nahm die Symptommhäufigkeit mit dem Mobiltelefongebrauch zu, zweitens waren die Symptome bei den Benutzern der durchschnittlich stärker strahlenden Analogtelefone häufiger als bei den Digitaltelefonbenutzern. Diese Befunde können als Indiz interpretiert werden, dass die Wirkung durch die hochfrequente Strahlung der Telefone verursacht wurde. Hingegen ist die Tatsache, dass dieselbe Untersuchung in Norwegen und Schweden stark unterschiedliche Symptomprävalenzen ergab, ein starkes Indiz, dass die beobachteten Zusammenhänge nicht allein durch Strahlungsemissionen verursacht sein können. Die öffentliche Diskussion bzw. die Abhandlung in den Medien kann eine Rolle spielen. Alternativ ist denkbar, dass die Häufigkeit des Mobiltelefongebrauchs ein Indikator für das allgemeine Stressniveau des Benutzers ist. Weiter könnten eine schlechte Verbindungsqualität oder das Telefonieren in lärmiger Umgebung die Symptome verursachen. In diesen Situation ist eine erhöhte Konzentration nötig oder es erfolgt ein stärkerer Druck des Telefons an das Ohr (COX and LUXON 2000).

Dass in einem relativ homogenen Kollektiv einer Ingenieursschule kein Unterschied in der Symptommhäufigkeit gefunden wurde (SANTINI et al. 2001B), zeigt möglicherweise, dass bei gesunden, jungen Personen weniger Effekte auftreten. Zudem war die Telefonbenützung in diesem Kollektiv geringer als bei den Berufsleuten der skandinavischen Studien.

Auch die Provokationsstudie von KOIVISTO et al. 2001 legt den Schluss nahe, dass eine einmalige Strahlungsexposition in einem jungen, gesunden Studentenkollektiv keine Symptomzunahme bewirkt. Dies schliesst aber nicht aus, dass dies im Einzelfall bei empfindlichen Personen trotzdem vorkommen kann (HOCKING and WESTERMAN 2000).

Die skandinavische Studie deutet darauf hin, dass die pulsierende GSM-Strahlung keinen stärkeren Effekt auf das Befinden hat als die kontinuierliche Analogstrahlung. Neben der Pulsierung unterscheiden sich die Analog- von den Digitaltelefonen durch die höhere Strahlungsleistung (im zeitlichen Mittel), das grössere Gewicht, die stärkere Wärmeentwicklung des Akkus sowie das Verhalten bei schlechter Verbindungsqualität (Rauschen statt Gesprächslücken).

Zusammenfassend kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass wahrscheinlich mit erhöhtem Mobiltelefongebrauch die Häufigkeit von unspezifischen Gesundheitssymptomen zunimmt. Mit den vorliegenden Studien kann nicht beurteilt werden, ob diese Zunahme durch die hochfrequente Strahlung oder durch andere Begleitfaktoren des Mobiltelefonierens verursacht wird. Dies ist für die verschiedenen Symptome möglicherweise unterschiedlich.

Die einzige Studie, die unspezifische Symptome im Zusammenhang mit Basisstationen untersuchte, erfüllt grundlegende wissenschaftliche Kriterien nicht. Sie ist deshalb in Bezug auf die Auswirkung der Strahlung von Mobilfunkbasisstationen nicht aussagekräftig.

7.2.2 Kopfschmerzen

Einführung

Mehrere Fallberichte haben Kopfschmerzen im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung zum Thema. Im Hinblick auf die biologische Plausibilität eines solchen Zusammenhanges werden verschiedene Wirkungsmechanismen diskutiert. FREY 1998 erwägt eine Wirkung via Blut-Hirnschranke oder über das Dopamin-Opiat-System. Die Blut-Hirnschranke regelt die Stoffaufnahme ins Gehirn und schützt es so vor neurotoxischen Stoffen. In mehreren experimentellen Studien mit Tieren wurde gezeigt, dass die Durchlässigkeit der Blut-Hirnschranke für gewisse Stoffe, wahrscheinlich insbesondere solche mit kleinem Molekulargewicht, bei Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung erhöht wird. Es wird vermutet, dass die Durchlässigkeit der Blut-Hirnschranke bei der Entstehung von Kopfschmerzen eine Rolle spielt. Ebenfalls scheint das Dopamin-Opiat-System bei der Entstehung von Kopfschmerzen involviert zu sein, und seinerseits durch Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung beeinflusst zu werden. COX and LUXON 2000 propagierten eine Stimulierung des vestibulären Apparates durch Mobilfunkstrahlung, entweder durch die direkte Wirkung der Radiowellen auf die Endolymphflüssigkeit und die Haarzellen oder durch Konvektionsströme infolge der Wärmeabgabe des Telefons. Letzteres werde begünstigt, da Mobiltelefone enger ans Ohr gedrückt würden als normale Telefone, wenn sie in lärmiger Umgebung benutzt werden.

Resultate

Die Studien zum Zusammenhang zwischen Hochfrequenzstrahlung und Kopfschmerzen sind in Tabelle 23 zusammengestellt.

SCHILLING 1997 publizierte den Fall von 3 Arbeitern, die versehentlich bei Unterhaltsarbeiten an einer Fernsehantenne während 50 Sekunden bis 2.5 Minuten sehr stark exponiert wurden. Die Dosimeter der Arbeiter zeigten in 10 cm Distanz zur Antenne den maximal ablesbaren Wert von 200 W/m^2 (rund 275 V/m) an, wobei die tatsächlichen Expositionen noch deutlich höher gewesen sein dürften. Alle drei Arbeiter entwickelten neben anderen Symptomen etwa eine Stunde nach der Exposition sehr starke Kopfschmerzen, die mehrere Tage anhielten. Die beiden am stärksten exponierten Arbeiter hatten 3 Jahre nach dem Unfall auf der linken (exponierten) Kopfseite immer noch chronische Kopfschmerzen, die bei Sonne oder in der Wärme verstärkt auftraten.

Ebenfalls versehentlich wurde ein Unterhaltsarbeiter einer GSM-Basisstation während 1–2 Stunden exponiert (HOCKING and WESTERMAN 2001, siehe S. 96). Die Feldstärke wurde mit 7.5 (Schulter) bis 15 V/m (Kopf) beziffert. Neben anderen Symptomen traten in der Nacht nach der Exposition starke Kopfschmerzen auf.

Mehrere Befragungen ergaben eine Assoziation zwischen der Benützung von Mobiltelefonen und dem Auftreten von Kopfschmerzen. Von 40 Freiwilligen, die sich

auf ein Inserat meldeten, berichteten 26 Personen, dass die Benützung des Mobiltelefons Schmerzen in der Schläfengegend oder am Hinterkopf verursache (HOCKING 1998, siehe S. 96). Die Schmerzen wurden als dumpfer Schmerz, Klopfen, Stechen oder Druck beschrieben und wurden anders empfunden als gewöhnliche Kopfschmerzen. Die Symptome begannen meist Minuten nach dem Telefonat, manchmal mit grösserer zeitlicher Verzögerung und klangen teilweise innerhalb einer Stunde ab, oder dauerten bis am Abend oder am nächsten Tag. Bei handfreien Geräten traten keine Symptome auf.

In einer Querschnittsstudie an 808 zufällig ausgewählten Männern und Frauen zwischen 12 und 70 Jahren in Singapur wurde nach spezifischen Gesundheitsbeschwerden des Zentralnervensystems und dem Gebrauch von Mobiltelefonen gefragt (CHIA et al. 2000B, siehe S. 99). Dabei zeigte sich, dass rund 45% der Befragten Mobiltelefone benutzten. Bei den Benutzern war das Risiko für Kopfschmerzen statistisch signifikant um 31% höher als bei Nicht-Benutzern. Ebenfalls wurde eine statistisch signifikante Zunahme der Häufigkeit von Kopfschmerzen mit zunehmendem Gebrauch des Telefons gefunden. Benutzer von handfreien Geräten hatten rund 20% weniger häufig Kopfschmerzen als Benutzer von konventionellen Mobiltelefonen.

Ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Mobiltelefonbenützung und dem Auftreten von Kopfschmerzen wurde auch in der Befragung von rund 17'000 skandinavischen Mobiltelefonbenutzern festgestellt (siehe S. 96). Die Zunahme war statistisch signifikant, sowohl bezogen auf die tägliche Benützungsdauer als auch auf die Anzahl Telefonate. Diese Assoziation wurde bei den Benutzern von digitalen (GSM) und von analogen (NMT) Telefonen beobachtet, wobei bei Ersteren die Symptome (statistisch nicht signifikant) weniger häufig waren (SANDSTROM et al. 2001). Bei rund einem Drittel der Benutzer begannen die Kopfschmerzen während des Telefonates, bei einem weiteren Drittel innerhalb einer halben Stunde nach dem Telefonat und beim Rest später. Bei rund der Hälfte der Personen verschwanden die Schmerzen innerhalb von 2 Stunden nach dem Telefonat (OFTEDAL et al. 2000, siehe S. 96).

Tabelle 23: Übersicht über Studien zum Zusammenhang zwischen Hochfrequenzstrahlung und Kopfschmerzen.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
SCHILLING 1997	im Beruf (Fernsehantenne)	K	785	>200 W/m ²	~>16.6	Chronische Kopfschmerzen, bis zu 3 Jahren nach dem Unfall	
HOCKING 1998	Mobiltelefon	U		bei Normalgebrauch	<~2	Kopfschmerzen beim Mobiltelefongebrauch, die sich anders anfühlen als normale Kopfschmerzen	
CHIA et al. 2000B, CHIA et al. 2000A	Mobiltelefon	U/L	v.a. GSM	bei Normalgebrauch	<~2	RR =1.31 (95%-CI: 1.00–1.70)	
OFTEDAL et al. 2000	Mobiltelefon	U/L	GSM/NMT	bei Normalgebrauch	<~2	8% (Norwegen) und 2% (Schweden) bekommen Kopfschmerzen beim Telefonieren	
HOCKING 2001 (Fallbeispiel)	Mobilfunkbasisstation	U	878.49	0.15–0.6 W/m ² ~7.5–15 V/m	~0.01–0.05	Kopfschmerzen nach Exposition	
KOIVISTO et al. 2001	Mobiltelefon	U	902 (p)	0.25 W	~0.6		Kein häufigeres Auftreten von Kopfschmerzen
SANDSTROM et al. 2001	Mobiltelefon	U/L	GSM/NMT	bei Normalgebrauch	<~2	<u>Norwegen:</u> OR=6.5 (95%-CI:2.5–16.8) ¹⁾ OR=6.8 (95%-CI:2.4–19.1) ²⁾ OR=4.2 (95%-CI:2.2–8.0) ³⁾ OR=3.2 (95%-CI:1.7–6.1) ⁴⁾ <u>Schweden:</u> OR=3.6 (95%-CI:1.5–8.8) ¹⁾ OR=2.6 (95%-CI:1.2–5.7) ²⁾ OR=2.4 (95%-CI:1.7–3.3) ³⁾ OR=1.8 (95%-CI:1.3–2.5) ⁴⁾	
SANTINI et al. 2001B	Mobiltelefon	U/L	900/1800	bei Normalgebrauch	<~2	Unterschiede zwischen GSM 1800- und GSM 900-Benutzern: +Kopfschmerzen	keine Unterschiede zwischen Mobiltelefon-Benutzern und Nicht-Benutzern

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; U=unmittelbar, K=Kurzzeit, L=Langzeit, (p)=gepulste Strahlung; ~bezeichnet geschätzte Werte. Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.)

¹⁾ verglichen wurden Benutzer von NMT-Telefonen mit >60 min/d vs. solche mit <2 min/d.

²⁾ verglichen wurden Benutzer von GSM-Telefonen mit >60 min/d vs. solche mit <2 min/d.

³⁾ verglichen wurden Benutzer von NMT-Telefonen mit >4 Anrufe/d vs. <2 A./d.

⁴⁾ verglichen wurden Benutzer von GSM-Telefonen mit >4 Anrufe/d vs. <2 A./d.

Bei einer Fragebogenstudie mit 161 Studenten und Arbeitern einer französischen Ingenieurschule wurde dagegen kein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Kopfschmerzen und der Mobiltelefonbenützung festgestellt (SANTINI et al. 2001B, siehe S. 98). Tendenziell traten Kopfschmerzen bei häufigerer Benützung (>2 Mi-

nuten/Tag) eher seltener auf als bei seltener Benützung (<2 Minuten/Tag). Zwischen Nie-Benutzern und Mobiltelefonierenden gab es keinen Unterschied.

Kein vermehrtes Auftreten von Kopfschmerzen konnten KOIVISTO et al. 2001 bei 48 jungen, gesunden Probanden nach einer einmaligen 60-minütigen Exposition gegenüber einem GSM-Telefon feststellen (siehe S. 99).

Bewertung

Die ungewollten Expositionen von Antennenunterhaltsarbeitern belegen, dass hohe Dosen von Fernseh- und Mobilfunkstrahlung Kopfschmerzen verursachen. Diese Wirkung kann mit einer Reihe von Wirkungsmechanismen biologisch plausibel begründet werden. Es stellt sich somit die Frage nach dem Schwellenwert, ab welchem dieser Effekt ausgelöst wird. Aufgrund der Resultate von Befragungen von Mobiltelefonbenutzern scheint es plausibel, dass bei gewissen Personen bereits die Emission eines Mobiltelefons genügt, um Kopfschmerzen zu verursachen. Studien an jungen Personen fanden keine Effekte, während Studien in der Allgemeinbevölkerung, die auch ältere Personen mit einschlossen, Effekte fanden. Ob und inwiefern andere Faktoren als die Strahlung zu den Ergebnissen der Studien an Mobiltelefonierenden beigetragen haben, kann mit den vorliegenden Daten nicht beurteilt werden.

Insgesamt wird es als wahrscheinlich erachtet, dass mit zunehmender Benützung von Mobiltelefonen die Häufigkeit von Kopfschmerzen zunimmt. Kopfschmerzen stellen eine Verminderung des Wohlbefindens dar.

7.2.3 Schlaf

Einführung

Insbesondere permanent sendende Anlagen wie TV-, Radio- oder Mobilfunkantennen stehen im Verdacht, Schlafbeschwerden zu verursachen. Es besteht die Hypothese, dass der Mensch in der Erholungsphase am empfindlichsten auf fremde Einflüsse reagiert, und dass sich daher Niedrigdosiswirkungen am ehesten im Schlaf manifestieren. In vielen experimentellen Studien wurde die Verteilung und Länge der verschiedenen Schlafphasen bei Exposition im Vergleich zu einer Kontrollsituation analysiert. Die Klassifizierung der Schlafphasen basiert auf den Hirnstromwellen (EEG). Man unterscheidet zwischen vier orthodoxen Schlafstadien (I-IV) und dem paradoxen Schlaf (REM). Die erste orthodoxe Schlafphase (I) ist charakterisiert durch gemischte Frequenzen im EEG mit Akzent bei 2–7 Hz und relativ schwacher Amplitude. Diese Schlafphase ist nur kurz (1–7 Minuten) und tritt beim Einschlafen oder beim Wechsel zwischen anderen Schlafphasen auf. Die zweite Schlafphase (II) weist ebenfalls relativ geringe Amplituden im EEG auf und ist durch das Auftreten von Schlafspindeln charakterisiert. Diese Schlafphase trägt etwa zur Hälfte der gesamten Schlafenszeit bei. Die dritte (III) und vierte (IV) Phase sind Tiefschlafphasen und durch hohe Amplituden der langsamen δ -Wellen charakterisiert. Der paradoxe REM-Schlaf (Rapid Eye Movement) ist durch schnelle Augenbewegungen und unregelmässige, schnelle Hirnstromwellen mit relativ niedriger Amplitude charakterisiert. (LEBEDEVA et al. 2001, siehe S. 82). In dieser Schlafphase finden die Träume statt. Als klassische Schlafparameter gelten die Dauer und Latenzzeit der orthodoxen und paradoxen Schlafphasen.

Resultate

Die Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf den Schlaf sind in Tabelle 24 zusammengestellt.

In mehreren Studien wurden Probanden während der Nacht mit einem Mobiltelefon exponiert. Bei der Studie von MANN and RÖSCHKE 1996 (siehe S. 81) resultierte am Kopf des Probanden bei Exposition durch ein GSM-Telefon eine durchschnittliche Leistungsflussdichte von 0.5 W/m^2 . Die Studie ergab unter Feldeinfluss eine signifikant verkürzte Einschlafdauer. Zudem trat die erste REM-Phase später ein und der REM-Anteil an der gesamten Schlafdauer war insgesamt von 17% auf 14% signifikant reduziert. Bezüglich der orthodoxen Schlafphasen, der totalen Schlafdauer, Schlaffeffizienz und des Durchschlafens wurde kein Feldeinfluss beobachtet. Die Probanden füllten am Morgen einen Fragebogen zu ihrer Schlafwahrnehmung aus. Dabei war kein Einfluss der Exposition auf die Bewertung der Schlafqualität feststellbar. Jedoch fühlten sich die Probanden nach Nächten mit Exposition signifikant ruhiger und gaben an, sie hätten mehr Energie (letzteres knapp nicht signifikant). Die Konzentration und die Ängstlichkeit wurden nicht unterschiedlich beurteilt. Diese Studie wurde mit einer niedrigeren Exposition wiederholt (WAGNER et al. 1998, MANN et al. 1998, siehe S. 72, 81) Bei einer Leistungsflussdichte von 0.2 W/m^2 wurden wiederum eine tendenziell verkürzte Einschlafdauer, tendenziell verlängerte Latenzzeit für REM-Phasen und tendenziell kürzere REM-Phasen gefunden, allerdings nicht mehr statistisch signifikant. Eine dritte Studie bei deutlich höherer Strahlenbelastung (WAGNER et al. 2000, siehe S. 81), fand dann keine Unterschiede in diesen klassischen Schlafparametern zwischen Exposition und Scheinexposition.

Die Studie von BORBELY et al. 1999 (siehe S. 82) fand, dass bei intermittierender GSM-Exposition (je 15 Minuten ein und aus) während der Nacht die Wachzeiten signifikant kürzer waren als in einer Kontrollnacht. Jedoch wurde kein Feldeinfluss auf die Latenzzeit für das Einschlafen und die verschiedenen Schlafphasen gefunden. Vom gleichen Labor wurde eine zweite Studie durchgeführt, bei der die Probanden vor dem Schlafen entweder real oder zum Schein gegenüber einem Mobiltelefon exponiert wurden, während des Schlafs aber nicht exponiert waren (HUBER et al. 2000, siehe S. 82). Dabei wurde kein signifikanter Einfluss der Exposition auf die klassischen Schlafparameter (z.B. Schlafphasen, Latenzzeiten) festgestellt. Tendenziell waren bei Exposition die Latenzzeit bis zum Einschlafen und zu der ersten REM-Phase verkürzt, die gesamte Schlafdauer und der REM-Schlaf verlängert. Die subjektive Bewertung der Schlafqualität war bei Exposition und Scheinexposition nicht unterschiedlich. Eine dritte Studie derselben Gruppe (HUBER et al. 2002, siehe S. 82) ergab, dass eine Exposition vor dem Einschlafen weder mit kontinuierlicher Hochfrequenzstrahlung noch mit gepulster GSM-Strahlung die Werte der klassischen Schlafparameter veränderte, im Vergleich zu einer Kontrollnacht ohne Exposition vor dem Einschlafen.

LEBEDEVA et al. 2001 zogen aus ihren Analysen der Hirnströme von Probanden, die im Schlaf gegenüber einem GSM-Telefon exponiert waren, die Schlussfolgerung, dass unter Feldeinfluss die Schlafphase II gehäuft auftrat, was typisch für den Schlaf von älteren Personen sei.

Tabelle 24: Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf den Schlaf.

Studie	Expositi- onsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
ALTPETER et al. 1995	Kurzwellen- radiosender	L	6.1–21.8	1–50 mA/m ¹⁾ (~0.4–20 V/m)		+Einschlafstörungen* +Durchschlafstörungen*	
MANN and RÖSCHKE 1996	Mobiltelefon	K	900 (p)	8 W (40 cm) 0.5 W/m ²	~0.04	-Einschlafatenzzeit* +Latenzzeit zur 1. REM-Phase* -Dauer der REM-Phase* +sich ruhiger fühlen* +Energie haben	gesamte Schlafzeit, Schlafeffizienz, Anzahl Erwachen, orthodoxe Schlafstadien, subjektive Schlafqualität
WAGNER et al. 1998, MANN et al. 1998	Mobiltelefon	U/K	900 (p)	0.2 W/m ²	0.6	-Einschlafatenzzeit +Latenzzeit zur 1. REM-Phase -Dauer der REM-Phase	
BORBELY et al. 1999	drei λ/2- Antennen	U/K	900 (p)		1	-Wachzeiten während der Nacht*	Einschlafdauer, Schlafphasen
FRITZER et al. 2000	Mobiltelefon	U/M	900 (p)		<2	-Einschlafatenzzeit	Sonstige klassische Schlafparameter
HUBER et al. 2000	planare Antenne	U ²⁾	900 (p)		1	-Einschlafatenzzeit +Latenzzeit zur 1. REM-Phase +gesamte Schlafdauer +Dauer des REM-Schlafs	Subjektive Bewertung der Schlafqualität
WAGNER et al. 2000	Mobiltelefon		900 (p)	50 W/m ²	1.8		EEG-Amplitude in allen Bändern
LEBEDEVA et al. 2001	Mobiltelefon	U/K	GSM	bei Normal- gebrauch ³⁾	<~2	+Schlafphase II	
SANTINI et al. 2001b	Mobiltelefon	U/L	900/1800	bei Normal- gebrauch	<~2	Telefonierende Frauen hatten mehr Schlafprobleme als telefonierende Männer*	keine Unterschiede zwi- schen Mobiltelefon-Benüt- zern und Nicht-Benützern
SANTINI et al. 2001a, SANTINI et al. 2002	Mobilfunk- Basisstation	M/L	900/1800	Wohndistanz 0–300m		Schlafstörungen	
HUBER et al. 2002	planare Antenne	U ²⁾	900 (p) 900 (cw)		1		Klassische Schlafparame- ter

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; U=unmittelbar, K=Kurzzeit, M=mittel, L=Langzeit, (p)=gepulste Strahlung, (cw)=kontinuierliche Strahlung; ~bezeichnet geschätzte Werte.)

¹⁾ Zeitlicher Höchstwert (einige Stunden pro Tag, während der die Aufenthaltsorte in Senderichtung lagen)

²⁾ Exposition vor dem Schlaf

³⁾ nicht näher spezifiziert

FRITZER et al. 2000 untersuchten den Einfluss einer Mobiltelefonexposition (GSM) während einer und während 6 Expositions-Nächten (siehe S. 82). Statistisch signifikante Einflüsse der Exposition wurden nicht gefunden. Tendenziell war die Latenzzeit bis zum Einschlafen sowohl nach einer als auch nach 6 Nächten unter Exposition verkürzt. Die gesamte Dauer der REM-Phasen war nach einer Nacht bei Exposition tendenziell höher. Nach 6 Nächten war praktisch kein Unterschied zwischen der Kontroll- und der Expositionssituation erkennbar. Die Latenzzeit der REM-Phase war in der ersten Nacht bei Exposition länger.

Bei einer Befragung von 161 Studierenden und Arbeitern einer französischen Ingenieursschule waren Schlafprobleme bei Mobiltelefonierenden nicht häufiger als bei Personen, die keine Mobiltelefone verwendeten (SANTINI et al. 2001B, siehe S. 98). Unter den Telefonierenden hatten die Frauen allerdings signifikant mehr Schlaf-

probleme als die Männer. Das bedeutet implizit, dass für Frauen ein positiver, für Männer ein negativer Zusammenhang zur Mobiltelefonbenützung besteht. Dieser Unterschied wurde bei den Nicht-Benützern nicht gefunden.

In der Schwarzenburg-Studie (siehe S. 71) wurden die Auswirkungen eines Kurzwellensenders auf den Schlaf mit drei unterschiedlichen Methoden untersucht (ALTPETER et al. 1995). Erstens wurde eine Befragung von 404 Personen, die in drei unterschiedlich exponierten Gebieten wohnten, bezüglich der Schlafqualität ausgewertet (Querschnittsbefragung). Zweitens wurden während 30 Tagen aufgezeichnete Tagebucheinträge von 187 Personen in Bezug auf die variierende Sende- richtung der Antenne analysiert. Drittens füllten in einer Längsschnittstudie 60 Personen während 10 Tagen ein Tagebuch aus. Dabei war der Sender vom 3. bis 6. Tag abgestellt. Alle drei Methoden ergaben einen statistisch signifikanten Zusammen- hang zwischen der Magnetfeldexposition und der Häufigkeit von Ein- und Durch- schlafstörungen. Die Querschnittsbefragung ergab, dass der Anteil von Personen mit Einschlafstörungen in der stark belasteten Zone A 23% betrug, in der Zone B 18% und in der Zone C (Hintergrundbelastung) 7%. Der Anteil von Personen mit Durchschlafstörungen betrug 32% in der Zone A, 19% in der Zone B und 9% in der Zone C. Die Analyse in Bezug auf die Senderrichtungen ergab, dass bei einer Erhö- hung der magnetischen Feldstärke (24-Stunden-Mittelwert) von 1 mA/m auf 10 mA/m (~3.8 V/m) die Schlafstörungen um 13% zunahmen (95%-Vertrauens- intervall: 4–23%). Die Längsschnittstudie zeigt, dass das Abstellen des Senders mit einer Verzögerung von einem Tag von einer Verbesserung der im Tagebuch ange- gebenen Schlafqualität begleitet war.

Eine Zunahme von Schlafstörungen mit abnehmender Wohndistanz zu einer Basis- station wurde in einer französischen Fragebogenerhebung beobachtet (SANTINI et al. 2001A, SANTINI et al. 2002). Die Studie weist jedoch gravierende methodische Mängel auf (siehe S. 99).

Bewertung

Beim grössten Teil der Studien zu den Auswirkungen von hochfrequenter Strahlung auf den Schlaf handelt es sich um Laborstudien, die bei gesunden, freiwilligen, jungen Probanden die Auswirkungen einer nächtlichen Exposition durch ein GSM- Mobiltelefon untersuchten. In mehreren Studien wurden dabei Effekte gefunden. Mehrfach gefunden wurden eine verkürzte Einschlafzeit sowie Effekte der Strah- lung auf den Anteil der REM-Phasen, wobei sowohl Zunahmen als auch Abnahmen registriert wurden. Eine Studie fand signifikant verminderte Wachzeiten nach dem Einschlafen. Ähnliche Befunde, die als verbesserter Schlaf unter Exposition inter- pretiert werden könnten, wurden tendenziell auch in anderen Studien gefunden, wenn auch nicht statistisch signifikant. Die subjektive Bewertung der Schlafqualität zeigte in mehreren Studien keinen Zusammenhang zur Exposition. Aus diesen Stu- dien kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass Schlafparameter durch hochfrequente Strahlung beeinflusst werden, diese Beeinflussung jedoch nicht not- wendigerweise als negativ empfunden wird. Hinzuzufügen ist, dass die Exposition mit einem während der ganzen Nacht sendenden Telefon für das tägliche Leben sehr unrealistisch ist.

Zu einer ganz anderen Schlussfolgerung kommt man aufgrund der Bevölkerungsstudien, die unfreiwillig exponierte Kollektive, entsprechend der allgemeinen Bevölkerung aus jungen und alten Menschen bestehend, untersuchten. Mit drei unterschiedlichen Methoden wurde um einen Radiosender konsistent ein Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke und Ein- sowie Durchschlafstörungen gefunden. Nicht absolut klar war bei dieser Untersuchung, ob die Bevölkerung blind gegenüber dem Expositionstatus war. Möglicherweise wirkten metallische Gegenstände als Antenne und machten so hörbar, ob der Sender lief oder nicht. Weiter könnte auch die bestehende Polemik um den Sender das Resultat einer Querschnitterhebung verfälscht haben. Auch bei der beobachteten Zunahme von Schlafstörungen mit abnehmender Wohndistanz zu Mobilfunkbasisstationen bestehen erhebliche methodische Probleme. Die Distanz zu einer Basisstation sagt nämlich nichts über die Feldstärke aus. Weiter sind wichtige methodische Aspekte in der Publikation nicht dargelegt. Dennoch decken sich die Befunde dieser zwei epidemiologischen Studien mit Berichten aus der Bevölkerung (RÖÖSLI et al. 2002A).

Diese epidemiologischen Studien können aufgrund methodischer Unklarheiten nicht als definitiver Nachweis für einen Zusammenhang gelten. Es fällt auf, dass die Befunde der Labor- und der epidemiologischen Studien sich widersprechen. Falls dies nicht methodisch bedingt ist, wäre eine mögliche Erklärung, dass sich Auswirkungen auf den Schlaf erst nach einer gewissen Expositionszeit manifestieren, und daher nur in Situationen zu beobachten sind, wo das untersuchte Kollektiv schon jahrelang exponiert war, nicht aber in den Laborstudien mit maximal 6 Nächten Exposition. Eine andere Möglichkeit ist, dass junge, gesunde Menschen, die sich für Laborstudien zur Verfügung stellen, nicht repräsentativ für die Bevölkerung sind, sondern ein besonders robustes Kollektiv darstellen. Effekte auf den Schlaf wären daher nur in einem Kollektiv, das der allgemeinen Bevölkerung entspricht und die ganze Breite an Stärken und Schwächen umfasst, zu beobachten. Weiter stellt sich die Frage, ob die Unterschiede in den Befunden auf die unterschiedliche Strahlungscharakteristik (Frequenz, Pulsierung, etc.) zurückzuführen sind. Möglicherweise spielen auch Ängste eine Rolle. So fanden HUTTER et al. 2002 in einer nur als Abstract publizierten Studie einen Zusammenhang zwischen Schlafstörungen und der Stärke der Exposition durch Mobilfunkbasisstationen, jedoch nur bei Menschen, die angaben, sich Sorgen um die Schädlichkeit von elektromagnetischen Feldern zu machen. Bei den übrigen Personen war dieser Zusammenhang nicht zu beobachten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Schlafstörungen bereits bei niedrigen Feldstärken im Bereich des Anlagegrenzwertes als möglich erachtet werden. Jedoch erlauben methodische Schwächen der bisherigen Untersuchungen noch keine endgültigen Schlussfolgerungen. In diesem Bereich besteht ein dringender Bedarf nach weiteren Untersuchungen. Schlafstörungen stellen eine Einschränkung des Wohlbefindens dar, was bei chronischem Verlauf mit gesundheitlichen Folgen assoziiert ist.

7.2.4 Psychisches Befinden

Einführung	<p>In mehreren Studien wurde der Frage nachgegangen, ob die Exposition gegenüber niederfrequenten Feldern mit dem psychischen Befinden assoziiert ist. Dabei stand insbesondere zur Diskussion, ob bei Feldexposition vermehrt Suizide oder Depressionen zu beobachten sind (z.B. VAN WIJNGAARDEN et al. 2000, VERKASALO et al. 1997, MCMAHAN et al. 1994). Die biologische Plausibilität wird mit einer Feldwirkung auf den Melatoninhaushalt begründet, die in einigen Studien beobachtet wurde (WILSON 1988). Bezüglich der Wirkung von hochfrequenter Strahlung auf das psychische Befinden gibt es jedoch noch praktisch keine Untersuchungen.</p>
Resultate	<p>FRITZER et al. 2000 erhoben die momentane Befindlichkeit mit einem Fragebogen (siehe S. 82). Dabei wurden Probanden sowohl nach einer Kontrollnacht im Schlaflabor ohne Exposition, als auch nach 6 Expositions-Nächten bzw. 6 Scheinexpositions-Nächten befragt. Als Expositionsquelle diente ein Mobiltelefon ($SAR_{10} < 2 \text{ W/kg}$). Dabei wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede für die während sechs Nächten exponierten Probanden im Vergleich zum nie exponierten Kontrollkollektiv gefunden.</p> <p>Ebenfalls die akute Befindlichkeit untersuchten MEISTER A. et al. 1989 (siehe S. 88) nach einer 30-minütigen Exposition gegenüber Mikrowellen einer Frequenz von 2.45 GHz bei 8 Probanden ($SAR_{10}: \sim 0.06\text{--}0.64 \text{ W/kg}$). Tendenziell gingen die Befunde in die Richtung einer Befindlichkeitsverschlechterung bei der stärksten Belastung von 60 V/m im Vergleich zur niedrigsten Belastung von 20 V/m. Aufgrund der kleinen Untersuchungsgruppe ist eine Interpretation der Resultate nicht möglich.</p> <p>CROFT et al. 2002 (siehe S. 79) befragten 24 freiwillige Probanden mittels eines psychologischen Fragebogens (AD-ACL) zu ihrer Stimmung während realer ($SAR_{10}: \sim 0.009 \text{ W/kg}$) und während Scheinexpositionen. Es wurde kein Zusammenhang zwischen der Stimmung und der Exposition gefunden.</p>
Bewertung	<p>Die Effekte von Langzeitexpositionen hochfrequenter Strahlung auf das psychische Befinden wurden bisher nicht untersucht. Die akute Befindlichkeit bei kurzfristiger Exposition wurde in 3 Studien untersucht. Die Resultate lassen noch keine Schlussfolgerungen zu. Zwei Studien fanden keinen Effekt, die dritte bei hohen Belastungen tendenziell eine Befindlichkeitsverschlechterung. Gesundheitlich relevant wäre jedoch ein langfristiger Effekt, der sich beispielsweise in der Ausprägung einer Depression manifestieren würde. Dies wurde bisher nicht untersucht. Ein Einfluss von hochfrequenter Strahlung auf den Melatoninhaushalt, welcher als möglicher Wirkungsmechanismus für das psychische Befinden postuliert wurde, konnte bisher nicht nachgewiesen werden (siehe Kapitel 7.1.1). Andere biologische Mechanismen können jedoch nicht ausgeschlossen werden.</p> <p>Insgesamt ist die Datenlage zu gering, um einen allfälligen Einfluss hochfrequenter Strahlung auf das psychische Befinden beurteilen zu können.</p>

7.2.5 Elektromagnetische Hypersensibilität

Einführung

Da sich einerseits ein Teil der Bevölkerung über unspezifische Krankheitssymptome bei Expositionen gegenüber schwachen elektromagnetischen Feldern beklagt, der grössere Teil bei diesen niedrigen Feldstärken jedoch keinen Effekt spürt, entstand die Hypothese der Elektrosensibilität. Dieses auch als elektromagnetische Hypersensibilität bezeichnete Phänomen besagt, dass es eine Gruppe von Personen gibt, die besonders empfindlich auf Felder reagieren, wobei die Gründe und der Wirkungsmechanismus unbekannt sind. In der Literatur werden die Begriffe **Elektrosensibilität** und **Elektrosensitivität** verwendet, aber nicht immer konsequent unterschieden. **Elektrosensitive** Personen sind fähig, schwache elektromagnetische Felder bewusst wahrzunehmen, was mit Provokationsstudien messbar ist. Bei Provokationsstudien müssen Probanden eine Scheinexposition von einer realen Exposition unterscheiden, wobei die Feldstärke deutlich geringer gehalten wird als die Schwelle für eine Wärmewahrnehmung. Diese liegt bei der im Mobilfunk verwendeten Frequenz bei einer Leistungsflussdichte von 500 W/m^2 bzw. einer Feldstärke von 450 V/m (SILNY 1999). Gesundheitsbeschwerden müssen mit Elektrosensitivität nicht unbedingt verbunden sein. Im Gegensatz dazu wird **Elektrosensibilität** in erster Linie als subjektives Phänomen betrachtet, da Personen ihre Symptome in der Regel aufgrund eigener Beobachtungen und Rückschlüsse auf den Einfluss elektromagnetischer Felder zurückführen. Der objektive Nachweis eines kausalen Zusammenhanges ist im Einzelfall kaum je möglich. Es scheint, dass die beiden Phänomene unabhängig voneinander bestehen, d.h. dass jemand, der unter Elektrosensibilität leidet, keine überdurchschnittliche Feldwahrnehmung haben muss und umgekehrt (MUELLER et al. 2002).

Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik der Strahlung ist es möglicherweise angezeigt, Elektrosensibilität gegenüber nieder- und hochfrequenten Feldern als zwei unabhängige Phänomene zu betrachten. Die Elektrosensibilität gegenüber hochfrequenter Strahlung ist bisher kaum untersucht worden.

Resultate

Die einzige wissenschaftlich publizierte Provokationsstudie im hochfrequenten Bereich untersuchte die Elektrosensitivität von 11 Personen, die sich selber als elektrosensibel bezeichneten (RADON and MASCHKE 1998). Dabei wurden mit den Probanden während eines Tages 12 Experimente durchgeführt. Bei jedem Experiment wurden die Probanden während jeweils 2 Minuten einmal real und zwei Mal zum Schein exponiert. Anschliessend mussten sie angeben, in welchem der drei Intervalle sie exponiert waren. Exponiert wurden die Probanden mit einem GSM 900 Signal mit einer Leistungsflussdichte von 0.24 W/m^2 (SAR_{10} : $\sim 0.02 \text{ W/kg}$). Die Autoren berechneten nach dem 3-AFC-Verfahren eine Wahrnehmungsschwelle, die sie als Nachweis für Elektrosensibilität deklarierten. Dabei wurde jemand als elektrosensibel klassifiziert, wenn er in mindestens 8 der 12 Experimente richtig geantwortet hatte. Das würde bei reinem Raten mit einer Wahrscheinlichkeit von 1.4% eintreten. Diese Wahrnehmungsschwelle wurde weder im Gruppenmittel noch von einzelnen Probanden erreicht. Die Autoren schlossen daraus, dass die Studie keinen Hinweis für Elektrosensibilität liefert. Bemerkenswert ist jedoch, dass nur 2 Personen weniger richtige Antworten erreichten als es einer reinen Ratewahrscheinlich-

keit entsprechen würde, während 6 Personen eine bessere Feldzuordnung erzielten. Von diesen 6 Personen erreichten 2 Personen ein Ergebnis, das bei reinem Raten mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 4% zu erwarten gewesen wäre und daher als signifikant zu betrachten ist. Diese beiden Personen schnitten in der ersten Hälfte der Versuche deutlich besser ab als in der 2. Hälfte. Zusammen mit einer 3. Person meldeten sich die beiden ungefragt am nächsten Tag bei der Studienleitung und gaben an, grosse Nachwirkungen zu verspüren. Beide litten unter Atemnot, eine Person zusätzlich unter Kribbeln im Gesicht, die andere zusätzlich unter Ausschlägen am Arm sowie unter Ohrgeräuschen. Es ist anzumerken, dass mit diesem Studiendesign im Prinzip die Elektrosensitivität und nicht die Elektrosensibilität untersucht wurde.

Bewertung

Diese Provokationsstudie mit hochfrequenter Strahlung kommt zu ähnlichen Ergebnissen wie entsprechende Studien im niederfrequenten Bereich (z.B. REA et al. 1991, MUELLER et al. 2002). Die Studie liefert einen Hinweis, dass es Personen gibt, die schwache Felder überzufällig gut wahrnehmen können. Gleichzeitig zeigt sie aber auch, dass es Personen gibt, die ihre Symptome elektromagnetischen Feldern zuschreiben und in einer Testsituation nicht überzufällig bessere Wahrnehmungshäufigkeiten aufweisen. Damit bleiben einige Fragen offen. Erstens ist unklar, ob die Wahrnehmungsfähigkeit als notwendiges Kriterium für Elektrosensibilität erachtet werden muss. Aufgrund von theoretischen Überlegungen ist dies nicht gegeben. Entsprechend kann aus einer fehlenden Wahrnehmungsfähigkeit nicht auf eine fehlende Elektrosensibilität geschlossen werden. Zudem stellt sich die Frage, ob die Detektionsfähigkeit in einer Laborsituation vergleichbar mit der Situation zu Hause ist. Allenfalls erlauben bekannte Örtlichkeiten und gewohnte Situationen eine bessere Vergleichbarkeit und Unterscheidungsfähigkeit für verschiedene Expositionszustände. Zumindest in Bezug auf Felder von Bildschirmen wurde diese Hypothese allerdings nicht bestätigt (FLODIN et al. 2000). Unklar ist weiter, wieso die Häufigkeit von Elektrosensibilität in verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich ist – sie tritt in nordeuropäischen Ländern deutlich häufiger auf als im Süden Europas – trotz vergleichbaren Expositionen (SILNY 1999). Dies kann als Indiz gewertet werden, dass andere Faktoren bei der Elektrosensibilität ebenfalls eine Rolle spielen, beispielsweise die öffentliche Diskussion über die Thematik. Dennoch kann aus dieser Beobachtung nicht die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es sich bei der Elektrosensibilität um ein rein subjektives Phänomen handeln muss.

Tatsache ist, dass sich ein Teil der Bevölkerung als elektrosensibel deklariert (RÖÖSLI et al. 2002A). Das Resultat der bisher einzigen Provokationsstudie mit Expositionen im hochfrequenten Bereich kann als Indiz dafür gewertet werden, dass es tatsächlich elektrosensitive Personen gibt. Obwohl noch erheblicher Forschungsbedarf besteht, wird es aufgrund dieser Ergebnisse als möglich erachtet, dass Personen bei einer Feldstärke im Bereich der Anlagegrenzwerte sensibel auf hochfrequente Strahlung reagieren.

7.3 Kanzerogene Wirkungen

Allfällige kanzerogene Wirkungen von hochfrequenter Strahlung werden schon seit Jahrzehnten kontrovers diskutiert. Krebs ist einerseits die gravierendste denkbare gesundheitliche Folge solcher Strahlung, andererseits ist die Erforschung eines Zusammenhanges wegen der langen Latenzzeit zwischen der Exposition und dem Auftreten des Tumors sehr schwierig. Verdachtsmomente bestehen vor allem hinsichtlich Leukämien, Tumoren des Zentralnervensystems sowie Brustkrebs.

Krebs ist eine multifaktorielle Krankheit, sowohl auf das Individuum als auch auf die ganze Bevölkerung bezogen. Auf Bevölkerungsebene kann die gleiche Krebserkrankung bei verschiedenen Personen unterschiedliche Ursachen haben. Auf individueller Basis ist eine Krebserkrankung das Resultat des Zusammentreffens verschiedener Faktoren wie einer genetischen Prädisposition, Umweltschadstoffen, viralen Infektionen, dem Lebensstil, etc. Die Krebserkrankung gilt als mehrstufiger Prozess, bei dem verschiedene Risikofaktoren zu verschiedenen Zeiten den Prozess bestimmen oder beeinflussen.

Als unbedingt notwendige Voraussetzung für die Kanzerogenese gilt die dauerhafte Veränderung einer somatischen Zelle. Diese erste Stufe wird als Initiation bezeichnet und kann durch direkte oder indirekte Schädigung der DNS verursacht werden. Eine direkte Schädigung erfolgt durch Interaktion des Karzinogens mit der DNS, beispielsweise durch Eingehen einer chemischen (kovalenten) Bindung. Karzinogene können aber auch zur vermehrten Bildung von oxidierenden Stoffwechselprodukten (Metaboliten) führen, welche wiederum mit der DNS reagieren (indirekte Schädigung). Eine kanzerogene Substanz, die auf dieser ersten Stufe der Krebsentstehung wirkt, ist genotoxisch und wird als Initiator bezeichnet. Eine Rolle spielt in dieser Phase auch der zelleigene DNS-Reparaturmechanismus, der schadhafte DNS-Sequenzen wieder instand stellt. Auch die Effizienz dieses Reparaturmechanismus kann durch karzinogene Substanzen beeinträchtigt werden.

Die Zeitspanne zwischen der Initiation und der Manifestation eines Tumors bezeichnet man als Latenzzeit oder Promotionsphase. Je nach Umständen kann sie Monate bis Jahrzehnte dauern. Ein Agens, welches in dieser Phase eingreift, bezeichnet man als Promotor. Promotoren spielen eine entscheidende Rolle für die Länge der Latenzzeit. Sie können die Synthese von Wachstumsfaktoren sowie ihre Freisetzung stimulieren, den Übergang des Zellzyklus von der Ruhe- in die Synthesephase forcieren, restitutives Wachstum nach zytotoxischen Effekten induzieren oder Prozesse der Zelldifferenzierung hemmen, die normalerweise mit dem Ende der Zellteilung gekoppelt sind. Sie beeinflussen auch die interzelluläre Kommunikation, die eine ordnungsgemäße Zellteilung regelt.

Die dritte und letzte Stufe der Kanzerogenese, das maligne Wachstum, wird als Progression bezeichnet.

Als Karzinogen wird ein Agens bezeichnet, welches das Krebsrisiko bei exponierten Personen erhöht. Dies kann in allen drei Phasen der Kanzerogenese geschehen: Initiation, Promotion und Progression (HENNIES et al. 2000).

7.3.1 Genotoxizität

Einführung

Ein Agens gilt als genotoxisch, wenn es direkt oder indirekt das Erbgut einer Zelle schädigt und folglich auf der ersten Stufe der Kanzerogenese als Initiator wirken kann. Untersuchungen zur Genotoxizität werden vorwiegend *in vitro* mit exponierten Zellkulturen oder im Tiermodell durchgeführt. In diesem Kapitel werden nur solche Studien diskutiert, welche die Genotoxizität von Hochfrequenzstrahlung auf menschliche Zellen zum Gegenstand haben, welche *in vivo* exponiert waren. Konkret handelt es sich um Personen, die beruflich mit hochfrequenter Strahlung zu tun haben, und deren Lymphozyten bezüglich Chromosomen- und DNS-Schäden untersucht wurden.

Die Strahlung im Mega- und Gigahertz-Frequenzbereich hat zu wenig Quantenenergie, um Moleküle zu ionisieren, deshalb auch die Bezeichnung nicht-ionisierende Strahlung. Auch die Bindungsstärke von Wasserstoffbrücken ist grösser als die Quantenenergie der hochfrequenten Strahlung. Eine direkte Schädigung der DNS ist deshalb auszuschliessen. Eine allfällige genotoxische Wirkung erklärt man sich eher mit einer indirekten Wirkung durch Metaboliten, z.B. über das Oxidase-Antioxidase-Verhältnis (HENNIES et al. 2000, FRENCH et al. 2001, REPACHOLI 1998). Darüber hinaus wird auch ein Promotionseffekt bei einer bereits genetisch vorgeschädigten Zelle diskutiert (BLETTNER and SCHLEHOFER 1999).

Resultate

Die Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf *in vivo* exponierte Zellen sind in Tabelle 25 zusammengestellt.

GARSON et al. 1991 verglichen Chromosomenschäden im Blut von 38 Antennentechnikern, die seit mindestens fünf Jahren gegenüber Hochfrequenzstrahlung im Bereich 400 kHz bis 20 GHz exponiert waren, mit Büroangestellten im gleichen Alter, die nicht exponiert waren. Die Exposition erfolgte bei Intensitäten unterhalb der australischen Grenzwerte, wurde aber nicht genauer spezifiziert. Der australische Grenzwert liegt im Frequenzbereich von 400 kHz–3 MHz bei 614 V/m und im Bereich 30 MHz–20 GHz bei 61.4 V/m ($SAR_{10}: \sim 0.8 \text{ W/kg}$). Zwischen 3 und 30 MHz nimmt er mit zunehmender Frequenz ab. Es wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den exponierten und nicht exponierten Arbeitern gefunden. Tendenziell waren Chromosomenlücken und Chromosomenbrüche bei den exponierten Radiotechnikern häufiger. Die Berücksichtigung der Einflussfaktoren Rauchen, vorhergehende Infektionen und Röntgenuntersuchungen änderte die Analyseresultate nicht.

Die Studie von MAES et al. 1995 untersuchte die Häufigkeit von Chromosomen- und DNS-Schäden in Lymphozyten von Unterhaltsarbeitern von Mobilfunkbasisstationen im Vergleich zu einem Kontrollkollektiv. Es wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede gefunden. Bei den exponierten Personen traten Chromatidenbrüche rund 2.5 Mal häufiger auf als beim Kontrollkollektiv. Azentrische Fragmente und Chromosomenbrüche waren in den beiden Kollektiven praktisch gleich häufig. Beim Kontrollkollektiv waren dafür Chromosomenlücken knapp 3 Mal häufiger. Über die Exposition der Unterhaltsarbeiter ist nur bekannt, dass sie seit mindestens einem Jahr mindestens 1 Stunde pro Tag exponiert waren. Die Kontrollen wa-

ren bezüglich Alter und Lebensstil ähnlich wie die Exponierten. Die in der gleichen Untersuchung applizierte in vitro-Exposition von Lymphozyten hatte signifikant mehr genetische Schäden zur Folge.

Ähnliche Befunde wurden von LALIC et al. 2001 publiziert. Sie verglichen Chromosomen- und DNS-Schäden von drei unterschiedlich exponierten Kollektiven: i) 25 Ärzte, Krankenschwestern und Röntgentechniker, die im Spital gegenüber ionisierender Strahlung exponiert waren (positive Kontrolle), ii) 18 Männer und 2 Frauen, die bei ihrer Arbeit bei einer Radio-Relais Station gegenüber Radiowellen exponiert waren, iii) ein Kontrollkollektiv. Die Häufigkeit von azentrischen Fragmenten war bei den Radiowellen-Exponierten am höchsten (14.8/1000 Zellen), bei den ionisierend Exponierten geringer (11.8/1000) und bei den Kontrollen am kleinsten (4.2/1000). Ungefähr das gleiche Bild ergab sich bei den dizentrischen Fragmenten, wo die Häufigkeit bei den Radiowellen-Exponierten 50% höher als bei den ionisierend Exponierten und 12 Mal höher als bei den Kontrollen war. Chromatidenbrüche waren bei den Radiowellen-Exponierten zwar deutlich seltener als bei den ionisierend Exponierten (0.7/1000 vs. 3.8/1000), aber dennoch deutlich häufiger als bei den Kontrollen (0.26/1000). Die Aussagekraft dieser Studie ist jedoch geschmälert, da keine Aussagen über das Kontrollkollektiv gemacht wurden. Es kann deshalb nicht beurteilt werden, ob die Kollektive in bezug auf andere Risikofaktoren (z.B. Alter, Rauchen) vergleichbar waren.

FUCIC et al. 1992 verglichen die Grössenverteilung von jeweils 100 zufällig ausgewählten Mikrokernen von Personen, die beruflich entweder gegenüber Röntgenstrahlung, Hochfrequenzstrahlung oder Vinylchlorid exponiert waren. Mikrokern werden als Indikator für Schäden am Erbgut betrachtet. FUCIC et al. 1992 stellten fest, dass sich die Grössenverteilung der Mikrokern bei den gegenüber Hochfrequenzstrahlung Exponierten signifikant von derjenigen der Kontrollen unterschied. Aufgrund der bimodalen Grössenverteilung schlossen die Autoren, dass Hochfrequenzstrahlung sowohl die Wirkungscharakteristik von ionisierender Strahlung besitze, die vor allem Chromosomenbrüche bewirke, als auch die Wirkungscharakteristik eines chemischen Mutagens, das primär Chromatidenbrüche bewirke. Die Aussagekraft dieser Studie ist erstens stark eingeschränkt, weil keine Angabe über die absoluten Häufigkeiten der Mikrokern gemacht werden. Zweitens handelte es sich bei den Kontrollen um Raucher, während die gegenüber Hochfrequenzstrahlung Exponierten Nichtraucher waren. Die Vergleichbarkeit ist damit nicht gegeben.

Tabelle 25: Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf in vivo exponierte Blutzellen.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine Assoziation
GARSON et al. 1991	im Beruf (TV, Radio, Satelliten)	L	400 kHz–20 GHz	<614 V/m (Grenzwert)		+Chromosomenlücken +Chromosomenbrüche	Chromatidenlücken, Chromatidenbrüche, andere Chromosomenveränderungen
FUCIC et al. 1992	im Beruf	L	1250–1350 MHz (p)	0.1–200 W/m ²	~0.007–15	Größenverteilung der Mikrokerne*	
MAES et al. 1995	im Beruf (GSM-Antennen)	L	450/1800 MHz (p)	?	?	+Chromatidenbrüche -Chromosomenlücken	Azentrische Fragmente, Chromosomenbrüche
LALIC et al. 2001	im Beruf (Radiorelaisstation)	L	<8 GHz	<10 W/m ²	<~0.8	+azentrische Fragmente* +dizentrische Fragmente* +Chromatidenbrüche	

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; U=unmittelbar, K=Kurzzeit, M=mittel, L=Langzeit, (p)=gepulste Strahlung; ~bezeichnet geschätzte Werte.)

Bewertung

Drei Studien (GARSON et al. 1991, MAES et al. 1995, LALIC et al. 2001) untersuchten die Häufigkeit von genetischen Schäden in Blutzellen von Personen, die während ihrer Arbeit gegenüber hochfrequenter Strahlung exponiert waren. Es wurden keine statistisch signifikanten Zusammenhänge gefunden. In zwei Studien waren azentrische Fragmente und Chromatidenbrüche bei den exponierten Personen häufiger als bei einem Kontrollkollektiv. Dizentrische Fragmente wurden nur in einer Studie untersucht, wo sie bei den Exponierten ebenfalls häufiger auftraten. Die dritte Studie fand diese Zusammenhänge nicht, dafür tendenziell häufiger Chromosomenlücken und Chromosomenbrüche bei den Exponierten. Die Hauptschwierigkeit bei der Bewertung dieser Befunde ist die möglicherweise beschränkte Vergleichbarkeit des nicht exponierten Kontrollkollektivs mit dem exponierten Kollektiv. Zwei Studien enthalten diesbezüglich keine oder nur wenige Angaben. Die gefundenen Resultate könnten beispielsweise auf Unterschiede in den Rauchgewohnheiten der beiden Kollektive zurückgeführt werden, was nicht diskutiert wird. Auch andere potenzielle Risikofaktoren wie Genetik, UV-Exposition (insbesondere beim Vergleich von Antennentechnikern mit Büropersonal) etc. könnten eine Rolle spielen. Die vierte Studie zur Größenverteilung von Mikrokernen ist nicht aussagekräftig (FUCIC et al. 1992).

Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Datenlage zu gering, um zu beurteilen, ob hochfrequente Strahlung bei in vivo exponierten menschlichen Zellen genotoxisch wirkt. Zu dieser Thematik gibt es zusätzlich eine Vielzahl von in vitro Studien, die bisher jedoch ebenfalls widersprüchliche Resultate lieferten.

7.3.2 Leukämien, maligne Lymphome

Einführung

Leukämien sind unheilbare Erkrankungen der weissen Blutzellen. Faktoren, die das Leukämierisiko wahrscheinlich erhöhen, sind Chemikalien, ionisierende Strahlung,

Zytostatika, onkogene Viren und eine genetische Disposition. Je nach Verlauf, Reifegrad und Abstammung der Leukozyten erfolgt eine Einteilung in akute Leukämie (weiter unterteilt in akute lymphatische Leukämie und akute myeloische Leukämie) und chronische Leukämie (weiter unterteilt in chronisch-myeloische Leukämie und chronisch lymphatische Leukämie). Maligne Lymphome bezeichnen Neoplasmen, die vom lymphatischen Gewebe der Lymphknoten, Tonsillen, Milz oder anderen Organen ausgehen. Man unterscheidet zwischen Morbus Hodgkin und Non-Hodgkin-Lymphomen (ZINK 1990).

Der Zusammenhang zwischen hochfrequenter Strahlung und dem Risiko für Leukämien oder Lymphome wurde bisher für drei verschiedene Expositionssituationen mit epidemiologischen Studien untersucht:

1. Expositionen durch TV- und Radiosender mittels Clusterstudien
2. Expositionen im Beruf, Militär und bei der Hobbytätigkeit mittels Fall-Kontroll- oder Registerstudien
3. Expositionen bei der Benützung eines Mobiltelefons mit Registerstudien.

In allen Studien wurden die Risikoerhöhung für die exponierte Gruppe und das dazugehörige Vertrauensintervall berechnet. Je nach Studientyp wird die Risikoerhöhung mit anderen statistischen Massen angegeben (Odds Ratio (OR), standardisiertes Inzidenzverhältnis, standardisiertes Mortalitätsverhältnis). Für kleine Risiken sind diese Masse ungefähr äquivalent und können als Risikofaktor bzw. relatives Risiko interpretiert werden, d.h. ein Faktor von 1.1 entspricht einer Risikoerhöhung um 10%.

Resultate

Alle Studien zu Tumoren des blutbildenden und lymphatischen Systems sind in Tabelle 26 zusammengestellt.

Berufs- Militär- und Freizeitexpositionen

MILHAM 1988B verglich in einer Registerstudie die Todesursachen von lizenzierten Amateurfunkern in den Staaten Kalifornien und Washington mit denjenigen der dort lebenden Bevölkerung. Bei den Amateurfunkern war das Todesfallrisiko sowohl gesamthaft (für alle Todesursachen zusammen) als auch für Krebs (für alle Krebsarten zusammen) signifikant tiefer als in der Allgemeinbevölkerung. Hingegen war bei den Funkern das Todesfallrisiko infolge akuter myeloischer Leukämie sowie infolge von Tumoren in anderen lymphatischen Geweben statistisch signifikant erhöht. Für alle Lymphome und Leukämien zusammen war das Risiko bei den Funkern 23 Prozent höher (knapp nicht signifikant). In einem Brief wird angemerkt, dass die Befunde möglicherweise durch AIDS beeinflusst sind (KURT 1988), was der Autor der Studie als unwahrscheinlich erachtet (MILHAM 1988A). In einer zusätzlichen Analyse wurden die Daten separat für 5 verschiedene Kategorien von Funklizenzen analysiert. Die Lizenzklasse wurde dabei als grobes Mass für die Expositionsdauer verwendet. Für alle Tumore des lymphatischen und blutbildenden Systems zusammen, sowie für myeloische Leukämien wurden die kleinsten Risiken bei den Novizen gefunden, was vom Autor als Hinweis auf eine Dosis-Wirkungsbeziehung interpretiert wurde (MILHAM 1988C).

In einer Studie an polnischen Militärdienstleistenden zwischen 1971 und 1985 wurde die Krebsmortalität von Personen, die gegenüber Radio- oder Mikrowellen ex-

poniert waren, untersucht (SZMIGIELSKI 1996). Messungen an den exponierten Arbeitsplätzen ergaben Feldstärken bis maximal 48 V/m. Exponierte Personen wiesen signifikant erhöhte Mortalitätsraten für alle Arten von Tumoren des lymphatischen und blutbildenden Systems auf. Für andere Tumore wurde teilweise ebenfalls eine erhöhte Mortalitätsrate gefunden, jedoch nicht so ausgeprägt. In den Analysen wurden ausser für das Alter keine Korrekturen für weitere mögliche Einflussfaktoren vorgenommen. Eine ähnliche Studie bei amerikanischen Radararbeitern im Koreakrieg (ROBINETTE et al. 1980) berechnete ein standardisiertes Mortalitätsverhältnis für Leukämie bei den Exponierten von 1.18 und bei den Nicht-Exponierten von 0.83. Damit resultiert ein rund 40 Prozent erhöhtes Risiko. Vertrauensintervalle sind keine angegeben. Es wurde eine Zunahme des Risikos mit der Anzahl möglicher Hochbelastungssituationen gefunden, jedoch ergaben sich praktisch die gleichen Resultate auch für die Tumore der Verdauungs- und Atmungsorgane, was als Hinweis für den Einfluss anderer Faktoren gedeutet wurde.

Kein Zusammenhang zwischen beruflicher Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung und Tumoren des blutbildenden Systems wurde in einer arbeitsmedizinischen Studie an rund 200'000 Angestellten der Firma Motorola beobachtet (MORGAN et al. 2000). Die Exposition wurde aufgrund der Berufsbezeichnung abgeschätzt. Es wurden einerseits das Verhältnis der standardisierten Mortalitätsraten (RR) berechnet, andererseits innerhalb der Kohorte mittels Poisson Regressionen der Einfluss verschiedener Expositionsparameter wie kumulative Belastung, typische Belastung, Spitzenbelastung analysiert. Es ergaben sich niedrige Mortalitätsraten, z.B. RR=0.66 (95%-CI: 0.64–0.67) für alle Todesfälle zusammen und RR=0.78 (0.75–0.82) für alle Krebstodesfälle. Da bei der Berechnung der Mortalitätsraten ausser Alter und Geschlecht keine Einflussfaktoren berücksichtigt sind, deuten diese niedrigen Werte auf ein generell gesundes Arbeitskollektiv hin. Jedoch ergaben auch die Vergleiche **innerhalb** des untersuchten Kollektivs für verschieden exponierte Personen keinen Hinweis auf eine Dosis-Wirkungsbeziehung.

Eine Fall-Kontrollstudie in Frankreich (FABBRO-PERAY et al. 2001) mit 445 Non-Hodgkin-Fällen in verschiedenen Berufen ergab ein dreifach erhöhtes Risiko für Radiotechniker. Bei den Fällen erfolgte die erste Exposition früher als bei den Kontrollen, die Expositionsdauer war aber insgesamt kürzer. Dieser paradoxe Befund wird von den Autoren mit der Tatsache erklärt, dass in Frankreich bei bekannten Risikoberufen ein Berufswechsel propagiert wird.

CANO and POLLAN 2001 eruierten in Schweden aufgrund der Berufsangabe in der Volkszählung und den Daten des nationalen Krebsregisters rund 40 verschiedene Berufe mit erhöhtem Risiko für Non-Hodgkin's Lymphome. Zu diesen Berufen gehörten auch Telegraph- und Radiooperatoren. Die Autoren vermuten Exposition durch elektromagnetische Strahlung als Grund für diesen Befund.

Exposition durch TV- und Radiosender

In einer Reihe von weiteren Studien wurde das Risiko für Tumoren des lymphatischen und blutbildenden Systems bei Bewohnern um Radio- und TV-Sender untersucht. Eine räumliche Analyse der Kinderkrebsfälle um einen kalifornischen TV-/Radiosender ergab keine statistische Häufung um den Sender, weder für Kinderleukämien noch für Hodgkin- und Non-Hodgkin Lymphome (SELVIN et al. 1992).

Abschätzungen der relativen Risiken für diese Krankheiten für Kinder mit einem Wohnort näher als 3.5 km zum Sender im Vergleich zu einem Wohnort weiter weg (bis max. rund 10 km) ergaben Werte, die nicht statistisch signifikant von 1 abwichen. Powerberechnungen der Studien ergaben, dass nur relative Risiken von mindestens einem Faktor 3 statistisch signifikant hätten nachgewiesen werden können.

Zwischen 1979 und 1990 wurden in Hawaii in der Nähe eines im Kilohertzbereich emittierenden Militärsenders 12 Fälle von akuter Kinderleukämie diagnostiziert (MASKARINEC et al. 1994). Das standardisierte Inzidenzverhältnis war statistisch signifikant erhöht (2.09; 95%-CI: 1.08–3.65). Basierend auf diesen 12 Fällen wurde eine Fall-Kontrollstudie durchgeführt, wobei verschiedene Risikofaktoren in der Analyse mitberücksichtigt wurden. Für die Bewohner im Abstand bis zu 4 Kilometern wurde ein doppelt so hohes Kinderleukämierisiko gefunden, welches wegen der geringen Fallzahl allerdings nicht signifikant war (95%-CI: 0.6–8.3). Die Assoziation kam durch 7 Fälle zwischen 1982 und 1984 zustande, die ungewöhnlich in Bezug auf Alter, Geschlecht und Leukämietyp waren. Ab 1984 war die Leukämierate nicht mehr höher als erwartet, obwohl der Sender in Betrieb blieb. Die Autoren konnten kein Ereignis ausmachen, das diesen örtlich und zeitlich befristeten Cluster erklären konnte.

Die Studie von HOCKING et al. 1996 um 3 australische TV- und Radiosender wurde geplant, ohne dass im Studiengebiet bereits Hinweise auf erhöhte Leukämieraten vorlagen. Die Inzidenz für alle Leukämiearten zusammen war sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen im Abstand bis 4 km um die Sender signifikant erhöht. Ebenfalls signifikant erhöht waren die Inzidenzen von lymphatischen Leukämien, während myeloische Leukämien zwar erhöht waren, jedoch nicht statistisch signifikant. Die Analysen der Mortalitätsrisiken für Leukämien ergaben ähnliche Ergebnisse wie die Analysen der Inzidenzen. Die Autoren erachteten es als unwahrscheinlich, dass die Assoziation durch sozioökonomische Faktoren zustande gekommen war. Ein allfälliger Einfluss der Verkehrsdichte, die im exponierten Gebiet höher war, einer Radiumfabrik, die bis 1970 am Rande des exponierten Gebietes in Betrieb war sowie einer Leukämieklinik im exponierten Gebiet, die möglicherweise Leukämiefälle angezogen hatte, konnte von den Autoren nicht quantifiziert werden. MCKENZIE et al. 1998 führten eine Re-Analyse der Fälle bei Kindern mit akuten lymphatischen Leukämien – der häufigsten Art – durch. Sie fanden für die drei am stärksten exponierten Bezirke ein erhöhtes Risiko von rund 50%, das statistisch knapp nicht signifikant war. Diese Risikoerhöhung war durch die gehäufte Anzahl von Fällen in einem exponierten Bezirk bedingt. In den beiden anderen exponierten Bezirken war die akute lymphatische Kinderleukämierate nicht höher als erwartet.

Eine weitere Studie untersuchte die Krebsinzidenz von 1974 bis 1986 um den englischen TV- und Radiosender Sutton Coldfield (DOLK et al. 1997B). Bis zu einem Abstand von 10 km vom Sender waren die standardisierten Inzidenzverhältnisse (SIR) für Tumore des lymphatischen und blutbildenden Systems erhöht. Statistisch signifikant erhöht waren die chronisch lymphatischen Leukämien und die Non-Hodgkin Lymphome. Im engeren Umkreis, bis zu einem Abstand von 2 km vom Sender, waren die SIR für alle Leukämietypen zusammen erhöht. Auffällig an den Resultaten der Studie ist eine kontinuierliche Abnahme des relativen Risikos mit

der Distanz zum Sender für alle Leukämien zusammen von 9.1 (Abstand 0–500 m) bis zu 0.8 (Abstand 9.2–10 km). Der Wert 0.8 entspricht genau dem standardisierten Inzidenzverhältnis dieses Bezirkes im Vergleich zu den nationalen Daten, die als Grundlage für die Risikoberechnung dienten. Das Studiendesign erlaubte in der Analyse keine Berücksichtigung von anderen Risikofaktoren als Alter und Geschlecht. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde eine zweite, grössere Studie durchgeführt, und die Krebsinzidenzen um 20 Sendetürme in England untersucht (DOLK et al. 1997A). Tendenziell wurden im Umkreis der Sender bis zu einem Abstand von 10 km leicht höhere Leukämieraten gefunden als erwartet. Interessanterweise war dieser Zusammenhang um die stärker strahlenden Sender signifikant, während er bei den schwächer sendenden Anlagen nicht gefunden wurde. Bei den stärker strahlenden Antennen trat das maximale Leukämierisiko im Abstand von 2–3 km auf. Aufgrund der räumlichen Abstrahlungsprofile der Antennen ist es wahrscheinlich, dass auf Bodenhöhe die höchsten Feldstärken in dieser Distanz auftreten. Kürzlich wurde eine Studie zum Sender Sutton Coldfield mit neueren Daten (Inzidenz von 1987 bis 1994) publiziert (COOPER et al. 2001). Bis zu einem Abstand von 10 km vom Sender war die standardisierte Inzidenz für alle Leukämietypen zusammen signifikant höher als erwartet. Separate Analysen für die einzelnen Tumorarten ergaben generell höhere Inzidenzen als erwartet, jedoch nicht statistisch signifikant. Bei den Knaben bis 15 Jahre wurde für die Leukämieinzidenz eine statistisch signifikante Abnahme mit der Distanz zum Sender gefunden.

Ebenfalls eine signifikant zunehmende Leukämiemortalität mit abnehmender Wohndistanz zum Radiosender des Vatikans wurde von MICHELOZZI et al. 2002 nachgewiesen. Diese Assoziation galt für Männer (beruhend auf 21 Todesfällen) und für Kinder (beruhend auf 8 Fällen), nicht aber für die 19 weiblichen Fälle. Bei Kindern traten alle Fälle innerhalb von 6 km Distanz zum Sender auf, so dass für dieses Gebiet ein statistisch signifikantes standardisiertes Inzidenzverhältnis von 2.2 resultierte.

Mobiltelefone

Zwei Registerstudien untersuchten das Mortalitätsrisiko für Tumore des lymphatischen und blutbildenden Systems bei Mobiltelefonbenutzern. DREYER et al. 1999A untersuchten in den USA die Leukämiemortalität in Abhängigkeit des benutzten Telefentyps (siehe S. 94). Es wurde angenommen, dass Benutzer von Telefonen mit externer Antenne eine geringere Strahlungsbelastung erfahren als Benutzer von handgehaltenen Geräten mit integrierter Antenne. Die Analysen zeigten für letztere kein erhöhtes Leukämierisiko im Vergleich zu den Benutzern von Telefonen mit externer Antenne.

Ebenfalls eine Registerstudie wurde mit Mobiltelefonierenden in Dänemark durchgeführt (JOHANSEN et al. 2001). Die standardisierten Inzidenzen (SIR) waren weder für Leukämien noch für Hodgkin- und Non-Hodgkin's Lymphome erhöht. Etwas höher als erwartet waren die SIR für Personen, die sowohl Analog- als auch Digitaltelefone benutzten (1.4; 95%-CI: 0.7–2.5), und möglicherweise zu den besonders starken Benutzern von Mobiltelefonen gehören. Für Benutzer von digitalen Mobiltelefonen wurde eine geringe, nicht signifikante Zunahme der SIR mit der Abonnementdauer beobachtet.

Tabelle 26: Übersicht über Studien zu Tumoren des blutbildenden und lymphatischen Systems.

Tabelliert sind die gefundenen Risiken¹⁾, entweder als Verhältnis der standardisierten Raten (RR) oder als Odds Ratio (OR), und das 95%-Vertrauensintervall in Klammern.

Studie	Expositionsquelle (Frequenz)	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp	Mass (Anzahl Fälle)	Lymphome und Leukämien	Alle Leukämien	Akute myeloische Leukämie	Akute lymphatische Leukämie	Chron. lymphatische Leukämie	Chron. myeloische Leukämie	Hodgkin Lymphom	Non-Hodgkin Lymphom	Bemerkung
ROBINETTE et al. 1980	Radar (-)	<600 V/m	<~61.2	Register-/Kohortenstudie (46)	SMR		1.42							auch gehäuft Tumore der Verdauungs- und Atmungsorgane
MILHAM 1988B, MILHAM 1988C	Funkgerät (-)	Bei Ausübung des Hobbys		Register (89)	SMR	1.23 (0.99–1.52)	1.24 (0.87–1.72)	1.76 (1.03–2.85)	1.20 (0.26–3.81)	1.09 (0.40–2.38)	0.86 (0.17–2.50)	1.23 (0.40–2.88)	-	anderes lymphatisches Gewebe: 1.62 (1.17–2.18)
SELVIN et al. 1992	TV-/Radiosender (-)	<6 km		Cluster (51)	SIR	0.89 (n.s.) ^{a)}	0.73 (n.s.) ^{a)}				1.23 (n.s.) ^{a)}		1.03 (n.s.) ^{a)}	
MASKARINEC et al. 1994	Radiosender (23.4 kHz)	?		Cluster Fall-Kontroll (12)	SIR/OR			2.09 ^{a)} (1.08–3.65)						Fall-Kontrollstudie zu diesen Fällen: OR=2.0 (95%-CI: 0.6–8.3)
HOCKING et al. 1996	3 TV-/Radiosender (63–533 MHz)	0.002–0.08 W/m ²	~2·10 ⁻⁴ –9·10 ⁻³	Cluster (1206 Erwachsene, 134 Kinder)	SIR		1.24 (1.09–1.40) 1.58 ^{a)} (1.07–2.34)		1.32 (1.09–1.59) 1.55 ^{a)} (1.00–2.41)		1.09 (0.91–1.32) 1.73 ^{a)} (0.62–4.81)			andere Leukämien: 1.67 (1.12–2.49) andere Leukämien: ^{a)} 1.65 (0.33–8.19)
SZMIGIELSKI 1996	Radio- oder Radarstrahlung	85% des Kollektivs: <2 W/m ² Rest: 2–6 W/m ²	<~0.2 ~0.25–2.3	Arbeitsmedizin, Register (ca. 133)	SMR	6.31 (3.12–14.31)		8.62 (3.54–13.67)	5.75 (1.22–18.16)	3.68 (1.45–5.18)	13.9 (6.72–22.12)	2.96 (1.32–4.37)	5.82 (2.11–9.74)	
DOLK et al. 1997B	TV-/Radiosender (30–600 MHz)	0.007–0.07 W/m ² <10 km	~8·10 ⁻⁴ –8·10 ⁻³	Cluster (935)	SIR	1.04 (0.98–1.11)	1.01 (0.90–1.13)	0.85 (0.68–1.05)	1.02 (0.67–1.56)	1.32 (1.08–1.62)	1.05 (0.78–1.42)		1.23 (1.11–1.36)	
DOLK et al. 1997A	TV-/Radiosender (FM/TV)	<0.07 W/m ² <10 km	<~8·10 ⁻³	Cluster (3305)	SIR		1.03 (1.00–1.07)	1.06 (1.00–1.13)	1.00 (0.88–1.15)	1.02 (0.95–1.08)	1.00 (0.91–1.10)			

Studie	Expositionsquelle (Frequenz)	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp (Anzahl Fälle)	Mass	Lymphome und Leukämien	Alle Leukämien	Akute myeloische Leukämie	Akute lymphatische Leukämie	Chron. lymphatische Leukämie	Chron.-myeloische Leukämie	Hodgkin Lymphom	Non-Hodgkin Lymphom	Bemerkung
DREYER et al. 1999a	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register (26)	SMR	Leukämierate bei Benutzern von Telefonen mit ext. Ant höher [7.0 (2.6–11)] als bei Benutzern von handgehaltenen Geräten [<2min/Tag: 1.6 (-); >2 min/Tag: 4.9 (-)]								alle Raten pro 100'000
MORGAN et al. 2000	im Beruf	>Median	-	Arbeitsmedizin (203)	SMR	0.67 (0.40–1.05)	0.57 (0.28–1.04)					0.95 (0.25–2.84)	0.59 (0.22–1.33)	
CANO and POLLAN 2001	im Beruf	-	-	Register (5 ^d , 25 ^e)	SIR								2.43 ^d (1.01–5.83) 1.46 ^e (0.98–2.16)	
COOPER et al. 2001	TV-/Radiosender	0.007–0.07 W/m ² <10 km	$\sim 8 \cdot 10^{-4}$ – $8 \cdot 10^{-3}$	Cluster (717 Erw.; 26 Kinder)	SIR	1.08 (0.99–1.16)	1.16 (1.04–1.29)	1.21 (0.98–1.44)	1.29 (0.81–1.96)	1.19 (0.97–1.40)	1.28 (0.95–1.62)		1.06 (0.95–1.17)	signifikante Zunahme des Risikos mit abnehmender Distanz zum Sender bei Knaben, nicht aber bei Mädchen.
FABBRO-PERAY et al. 2001	im Beruf	-	-	Fall-Kontroll (517)	OR								3.1 (1.4–66)	Für Radiotechniker
JOHANSEN et al. 2001	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register (84)	SIR		1.07 ^b (0.43–2.20) 0.97 ^c (0.76–1.21)					1.18 ^b (0.24–3.43) 0.88 ^c (0.58–1.29)	1.04 ^b (0.52–1.86) 0.93 ^c (0.77–1.13)	
MICHELOZZI et al. 2002	TV-/Radiosender (0.5–1.6 MHz und 4–22 MHz)	<95 V/m <10 km		Cluster (21 ^c , 19 ^b , 8 ^a)	SMR ^{b,c} SIR ^a		1.2 (0.8–1.9) ^b 1.0 (0.5–9.0) ^c 1.2 (0.6–2.3) ^a							signifikante Zunahme des Risikos mit abnehmender Distanz zum Sender bei Männern und Kindern, nicht aber bei Frauen.

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.)

a) bezieht sich auf Tumoren bei Kindern. b) bezieht sich auf Tumoren bei Frauen. c) bezieht sich auf Tumoren bei Männern.

d) bezieht sich auf Telegraph- und Radiooperateur im Vergleich zur Gesamtbevölkerung

e) bezieht sich auf Radio- und Fernsehmechaniker im Vergleich zur Gesamtbevölkerung

f) einzig bei der Studie von Dreyer et al. 1999a sind keine Verhältnisse der Raten berechnet worden. Es handelt sich um standardisierte Mortalitätsraten

Bewertung

In 9 der 15 diskutierten Studien finden sich statistisch signifikante Assoziationen zwischen der Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung und Tumoren des blutbildenden und lymphatischen Systems. Insbesondere die Studien um Radiosender fanden erhöhte Risiken. Bei beruflichen Expositionen gingen die Befunde in beide Richtungen und bei den Registerstudien mit Mobiltelefonierenden wurde kein Zusammenhang beobachtet. Es gab keinen Tumortyp des blutbildenden Systems, der besonders konsistent eine Assoziation zur Exposition aufwies.

Trotz der beträchtlichen Anzahl von Studien gibt es eine Reihe von Unklarheiten. Erstens wurden in praktisch allen Studien bei der Datenanalyse nur die groben Einflussfaktoren Alter und Geschlecht berücksichtigt. Es liessen sich daher in jeder Studie andere mögliche Gründe als Hochfrequenzstrahlung für die gefundene Assoziation postulieren, die jedoch nicht überprüft werden können. Zweitens war die Expositionsabschätzung in allen Studien sehr rudimentär. Die Studien zu den Leukämien und Lymphomen um Radio- und TV-Sendeanlagen untersuchten entweder die Abnahme der Leukämierate mit der Distanz zum Sender oder es wurde die Leukämierate in einem definierten Gebiet um den Sender (z.B. bis max. 10 km Distanz) mit der landesweiten Leukämierate verglichen. Bei ersterem wurde angenommen, dass die Strahlung mit der Distanz kontinuierlich abnimmt. Infolge der Abstrahleigenschaften der betreffenden Antennen und ihrer grossen Höhe über Boden trifft dies aber erst ab einigen Kilometern Distanz zum Sender zu. In der näheren Umgebung des Senders ist die generelle Abnahme mit der Distanz von mehreren lokalen Maxima überlagert (DOLK et al. 1997B, CHERRY 2000) (siehe Kapitel 4.2.3). Dieser Umstand kann zu einer Missklassifikation der Exposition führen, was eine Unterschätzung der Dosis-Wirkungsbeziehung zur Folge hat. Die Bestimmung der Höhe der Exposition um Rundfunksender ist mit Unsicherheiten verbunden, da in den jeweiligen Studien nur wenige Messungen gemacht wurden. Die höchsten gemessenen Feldstärken um den Sutton Coldfield sowie um die australischen Sender betrugen rund 5.5 V/m. DOLK et al. 1997B schätzen innerhalb der 10 km eine Abnahme der Feldstärke auf einen Drittel bis auf die Hälfte des Maximalwertes. Damit kann geschlossen werden, dass die Feldstärke um diese stark sendenden Anlagen im Bereich des schweizerischen Anlagegrenzwertes lag.

Für die Bewertung der Evidenz dürfte die Studie um 20 englische Sendetürme am stärksten zu gewichten sein (DOLK et al. 1997A). In dieser Studie wurde ein sehr grosses Kollektiv untersucht und die wissenschaftliche Qualität der Studie ist hoch. Die Resultate waren sehr konsistent: Um stärker sendende Anlagen wurden höhere Risiken gefunden als um schwächer sendende Anlagen. Zudem wurden die höchsten Inzidenzen in 2–3 km Distanz zum Sender gefunden, wo die höchsten Expositionen erwartet werden. Dort war das Leukämierisiko rund 20–30% höher als erwartet. Im gesamten Gebiet innerhalb von 10 km um stark sendende Anlagen war das Risiko noch etwa 5% höher als erwartet. Diese Befunde sowie ergänzende Befunde aus anderen Studien sprechen für eine gewisse Evidenz, dass um stark sendende Rundfunksender die Leukämie- und Lymphomraten erhöht sind. Jedoch verbleibt wegen der rudimentären Expositionsabschätzung und der Nichtberücksichtigung von möglichen Störgrössen in der Analyse ein Interpretationsspielraum, so dass

nach wissenschaftlichen Kriterien ein Zusammenhang nicht als nachgewiesen gelten kann. Entsprechend werden in verschiedenen Übersichtsartikeln von Wissenschaftlern unterschiedliche Meinungen vertreten (z.B. HOCKING 1999, ELWOOD 1999, BLETTNER and SCHLEHOFER 1999, ICNIRP 1998, GOLDSMITH 1997A, GOLDSMITH 1997B, MOULDER et al. 1999, ROTHMAN 2000).

Insgesamt wird es als möglich erachtet, dass um stark sendende Rundfunksender bei Exposition in der Grössenordnung des schweizerischen Anlagegrenzwertes das Risiko für Tumore des blutbildenden und lymphatischen Systems erhöht ist. Ob auch der Gebrauch von Mobiltelefonen mit einem möglicherweise erhöhten Risiko assoziiert ist, kann mit den bisherigen Studien nicht beurteilt werden. Leukämien und Lymphome sind gesundheitlich gravierend.

7.3.3 Tumore des Zentralnervensystems

Einführung

Bei der Reizübermittlung und Reizverarbeitung im Hirn und Zentralnervensystem spielen elektrophysiologische Vorgänge eine zentrale Rolle. Gerade beim mobilen Telefonieren gehört das Zentralnervensystem zu den am stärksten exponierten Körperpartien. Bisher wurde der Einfluss von drei unterschiedlichen hochfrequenten Expositionssituationen untersucht: Berufsexposition, Bewohner um Radio-/TV-Sender und Benützung von Mobiltelefonen.

Resultate

Alle Studien zu Tumoren des Zentralnervensystems sind in Tabelle 27 zusammengestellt.

Berufs- Militär- und Freizeitexpositionen

Zum Hirntumorrisiko in verschiedenen Berufen mit Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Studien durchgeführt. KHEIFETS et al. 1995 fassten die Ergebnisse von 29 Einzelstudien, die bis 1994 publiziert waren, mittels einer Meta-Analyse zusammen. Für alle Berufe zusammen, die mit EMF-Exposition einhergingen, ergab sich ein um 20% statistisch signifikant erhöhtes Hirntumorrisiko. Für Elektroingenieure war die Risikoerhöhung am grössten mit einem Wert von 70% (Vertrauensintervall: 10–150%). Spezifische Untersuchungen für radiofrequenzexponierte Berufsgruppen wurden nicht gemacht. Der Anteil von hoch- und niederfrequenten Expositionen in den einzelnen Berufsgruppen ist deshalb nicht eruierbar.

Die Metaanalyse von KHEIFETS et al. 1995 schliesst die Studie zum Hirntumorrisiko von Amateurfunkern (MILHAM 1988B, MILHAM 1988C, siehe S. 116) nicht mit ein. Die altersstandardisierte Mortalität durch Hirntumore war in der untersuchten Gruppe der Amateurfunker 39% höher als bei der Allgemeinbevölkerung. In einer Zusatzanalyse wurde die Mortalitätsrate getrennt nach Lizenzkategorien ausgewertet, welche als grobes Mass für die Expositionsdauer betrachtet werden können. Das standardisierte Mortalitätsverhältnis war bei den Kategorien ‚Advanced‘ und ‚General‘ deutlich höher als bei der Kategorie ‚Novizen‘, welche wahrscheinlich am kürzesten exponiert war.

Die Studie von GRAYSON 1996 untersuchte den Einfluss der Nieder- und Hochfrequenzstrahlung auf das Auftreten von Hirntumoren bei rund 880'000 Angehörigen der Air Force. Im Untersuchungszeitraum von 1970 bis 1989 traten in diesem Kollektiv 230 Hirntumorfälle auf. Männer, die aufgrund ihrer Berufsbezeichnung mit grosser Wahrscheinlichkeit gegenüber hochfrequenter Strahlung exponiert waren, hatten ein um 40% statistisch signifikant erhöhtes Hirntumorrisiko. Eine Zunahme des Hirntumorrisikos mit der Expositionsdauer konnte hingegen nicht aufgezeigt werden. In der Analyse wurden das Alter, die Ethnie und der militärische Rang berücksichtigt.

Auch eine polnische Studie untersuchte das Hirntumorrisiko bei Personen, die im Militär gegenüber hochfrequenter Strahlung exponiert waren (SZMIGIELSKI 1996, siehe S. 117). Diese hatten ein um 90 Prozent statistisch signifikant erhöhtes Risiko für Tumore des Zentralnervensystems.

Kein Zusammenhang zwischen beruflicher Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung und dem Hirntumorrisiko wurde in einer arbeitsmedizinischen Studie an rund 200'000 Angestellten der Firma Motorola beobachtet (MORGAN et al. 2000, siehe S. 117). Die Exposition wurde aufgrund der Berufsbezeichnung abgeschätzt. Es wurden einerseits das Verhältnis der standardisierten Mortalitätsraten berechnet, andererseits innerhalb der Kohorte mittels Poisson-Regressionen der Einfluss verschiedener Expositionsparameter wie kumulative Belastung, typische Belastung und Spitzenbelastung analysiert. Dabei ergaben sich keine Hinweise für eine Dosis-Wirkungsbeziehung.

Eine amerikanische Studie ging der Frage nach, ob bei Kindern, deren Eltern beruflich gegenüber elektromagnetischen Feldern exponiert waren, Neuroblastome (Tumor bei nicht ausgereiften Nervenzellen) häufiger auftraten (DE ROOS et al. 2001). Diese Studie ist im Kapitel 7.4.1 besprochen.

Exposition durch
TV- und Radiosender

Das Hirntumorrisiko für Kinder unter 20 Jahren in der Nähe von TV- und Radiosendern untersuchte die Studie von SELVIN et al. 1992 (siehe S. 117). Kinder mit einem Wohnort näher als 3.5 km zum Sender hatten ein um 16 Prozent statistisch nicht signifikant erhöhtes Hirntumorrisiko im Vergleich zu Kindern an einem weiter entfernten Wohnort (bis max. rund 10 km). Powerberechnungen der Studien ergaben, dass nur relative Risiken von mindestens einem Faktor 3 statistisch signifikant hätten nachgewiesen werden können.

Kein Zusammenhang zwischen Hirntumoren und der Nähe des Wohnortes zu 3 australischen TV- und Radiosendern wurde in der Studie von HOCKING et al. 1996 festgestellt (siehe S. 118). Bei den exponierten Erwachsenen traten Hirntumore geringfügig seltener, bei Kindern bis 14 Jahren geringfügig häufiger auf als erwartet. Bei beiden Gruppen war die Mortalität wegen Hirntumoren niedriger als erwartet. Auch die Studien um englische TV- und Radiosender lieferten keinen Hinweis auf erhöhte Hirntumorraten in der Nähe der Sendeanlagen (DOLK et al. 1997B, DOLK et al. 1997A, siehe S. 118).

Mobiltelefone

Eine Reihe von neuen Studien untersuchte das Hirntumorrisiko von Mobiltelefonbenutzern. DREYER et al. 1999A analysierten in einer Registerstudie in den USA die Mortalität wegen Hirntumoren in Abhängigkeit des benutzten Telefentyps (siehe S. 94). Es wurde angenommen, dass Benutzer von Telefonen mit externer Antenne eine geringere Strahlenbelastung erfuhren als Benutzer von handgehaltenen Geräten mit integrierter Antenne. Die Dauer der täglichen Benutzung betrug 2 Minuten pro Tag (Medianwert). 20 Prozent des untersuchten Kollektivs benutzten Mobiltelefone seit mehr als 3 Jahren. Die Analysen zeigten für letztere kein erhöhtes Hirntumorrisiko. Innerhalb der Gruppe mit handgehaltenen Geräten wurde für jene, die ihre Geräte länger als 3 Jahre benutzten, eine höhere standardisierte Hirnturmortalität gefunden als für jene mit kürzerer Benutzungsdauer. Dieses Ergebnis basiert allerdings nur auf zwei Fällen und ist somit nicht aussagekräftig.

Tabelle 27: Übersicht über Studien zu Tumoren des Zentralnervensystems. Tabelliert sind die gefundenen Risiken^{d)} und in Klammern das 95%-Vertrauensintervall.

Studie	Expositionsquelle (Frequenz)	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp (Anzahl Fälle)	Mass	Tumorart	Stärke der Assoziation
MILHAM 1988B, MILHAM 1988C	Bei Ausübung des Hobbys (Funkgerät)	-	-	Register (29)	SMR	Hirn	RR=1.39 (0.93–2.00)
SELVIN et al. 1992	Radio-/TV-Sender	-	-	Cluster (35)	SMR	Hirn (<20 Jahre)	RR=1.16 (n.s.)
KHEIFETS et al. 1995	im Beruf	-	-	Meta-Analyse	RR	Hirn	RR=1.2 (1.1–1.3) alle EMF-Exponierten RR=1.1(1.0–1.3) Elektriker RR=1.7 (1.1–2.5) Elektroingenieure RR=1.3 (1.1–1.5) Schweisser
GRAYSON 1996	im Militär	<100 W/m ²	<~6.4	Fall-Kontroll (230)	OR	Hirn	OR=1.39 (1.01–1.90)
HOCKING et al. 1996	drei TV-/Radiosender (63–533 MHz)	0.002–0.08 W/m ²	~0.2–9	Cluster (606 Erwachsene, 30 Kinder)	SIR	Hirn (Erw. und Kinder)	RR=0.89 (0.71–1.11) RR=1.10 (0.59–2.06) ^{a)}
SZMIGIELSKI 1996	im Militär (Radio- oder Radarstrahlung)	85% des Kollektivs: <2W/m ² Rest: 2–6 W/m ²	<~0.25 ~0.25–2.3	Arbeits-medizin/ Register (ca. 44)	SMR	Zentralnervensystem	RR=1.91 (1.08–3.47)
DOLK et al. 1997B	TV-/Radiosender	0.007–0.07 W/m ² <10 km	~8·10 ⁻⁴ –8·10 ⁻³	Cluster (332)	SIR	Hirn (gut- und bösartig)	0–2 km: RR=1.29 (0.80–2.06) 0–10 km: RR=1.04 (0.94–1.16)
DOLK et al. 1997A	TV-/Radiosender	<0.07 W/m ² <10 km	<~8·10 ⁻³	Cluster (244)	SIR	Hirn (gut- und bösartig)	0–2 km: RR=0.62 (0.17–1.59) ^{a)} 0–10 km: RR=1.06 (0.93–1.20) ^{a)}
DREYER et al. 1999A	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register (6)	SMR	Hirn	Rate pro 100'000 bei Benutzern von Telefonen mit ext. Ant etwa gleich [2] wie bei Benutzern von handgehaltenen Geräten [<2min/Tag: 3.7; >2 min/Tag: 0]
HARDELL et al. 1999, HARDELL et al. 2000	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (233)	OR	alle Hirntumore nur ipsilaterale	OR=0.98 (0.69–1.41) OR=2.62 (1.02–6.71)
MORGAN et al. 2000	im Beruf	>Median		Arbeitsmedizin (51)	SMR	Hirn	RR=0.91 (0.41–1.86)

Studie	Expositionsquelle (Frequenz)	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp (Anzahl Fälle)	Mass	Tumorart	Stärke der Assoziation
MUSCAT et al. 2000	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (469)	OR	Hirn	OR=0.85 (0.6–1.2) (mehr Tumore auf der ipsilateralen Seite)
INSKIP et al. 2001	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (782)	OR	Hirn	OR=1.0 (0.6–1.5) (keine grössere Tumorfrequenz ipsilateral)
JOHANSEN et al. 2001	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register (154)	SIR	Nervensystem	Männer: RR=0.95 (0.79-1.12) Frauen: RR=1.03 (0.62-1.61)
AUVINEN et al. 2002	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Registerbasierte Fall-Kontroll (398)	OR	Alle Hirntumore Glioma	OR=1.3 (0.9–1.8) OR=1.6 (1.1–2.3) ^{b)} OR=1.5 (1.0–2.4) 2.1 (1.3–3.4) ^{b)}
HARDELL et al. 2002A, HARDELL et al. 2002B	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (1617)	OR	Hirn	OR=1.3 (1.02–1.6) ^{b)} OR=1.0 (0.8–1.2) ^{c)}
MUSCAT et al. 2002	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (90)	OR	Akustikusneurinome	1–2 Jahre Gebrauch: OR=0.5 (0.2-1.3) 3–6 Jahre Gebrauch: OR=1.7 (0.5-5.1)

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.)

^{a)} bezieht sich auf Tumoren bei Kindern.

^{b)} bezieht sich nur auf Benutzer von analogen Telefonen

^{c)} bezieht sich nur auf Benutzer von GSM Telefonen

^{d)} bei Dreyer et al. 1999a sind es standardisierte Mortalitätsraten

Eine schwedische Studie untersuchte das Hirntumorrisiko in medizinischen Berufen mittels einer Fall-Kontrollstudie (HARDELL et al. 1999, HARDELL et al. 2000). Dabei wurde auch die Benützung von Mobiltelefonen erhoben. 38 Prozent der untersuchten Personen benützten ein Mobiltelefon. Die mittlere lebenslang kumulierte Benützungsdauer der Telefonierenden lag bei 136 Stunden (Medianwert). Insgesamt war das Hirntumorrisiko bei Benützern von Mobiltelefonen nicht höher als bei den Nicht-Benützern. Separate Analysen für die verschiedenen Hirntumortypen ergaben für keinen Typ ein erhöhtes Risiko, jedoch traten Tumore an den Schläfen und am Hinterhauptsbein signifikant häufiger auf derjenigen Kopfseite auf, an der normalerweise das Telefon gehalten wird (ipsilateral). Dieser Zusammenhang wurde nur für analoge Mobiltelefone (NMT) gefunden. Die Autoren führen an, dass analoge Telefone mit einer stärkeren durchschnittlichen Leistung senden als GSM-Telefone und dass erstere schon länger auf dem Markt sind, was bei der relativ langen Induktionszeit für Hirntumore relevant sein könnte.

Eine weitere Studie derselben Forschungsgruppe ist die bisher grösste zu Hirntumoren (HARDELL et al. 2002A, HARDELL et al. 2002B). Insgesamt wurden 1617 Fälle und ebenso viele Kontrollen untersucht. Im Untersuchungskollektiv benützten 15 Prozent ein analoges Telefon, 30 Prozent ein digitales (GSM) und ebenfalls 30%

ein Schnurlostelefon. Die analogen Telefone wurden im Mittel seit 7 Jahren, GSM-Telefone seit 3 Jahren und Schnurlostelefone seit 5 Jahren benützt. Das Benütungsverhalten wurde mittels eines Fragebogens erhoben. Aus diesem Grund konnten nur überlebende Fälle in die Untersuchung eingeschlossen werden. Während die Analysen für Benutzer von GSM-Telefonen und Schnurlostelefonen insgesamt kein erhöhtes Hirntumorrisiko ergaben, war das Risiko für Benutzer von Analogtelefonen signifikant um 30% erhöht. Wurde das Telefon seit mindestens 10 Jahren benützt, war das Hirntumorrisiko signifikant um 80% erhöht. Akustikusneurinome traten bei Benutzern von Analogtelefonen 3.5 Mal häufiger auf als erwartet. Auf der ipsilateralen Kopfseite traten bei Benutzern von Analogtelefonen Tumore 80 Prozent häufiger auf als erwartet, bei Benutzern von GSM- und Schnurlostelefonen 30 Prozent häufiger. Dieser Befund war an der Grenze zur Signifikanz (HARDELL et al. 2002A). Separate Analysen für maligne (bösartige) Hirntumoren ergaben tendenziell geringere Risiken. Die Befunde waren aber nicht sehr verschieden von den kombinierten Analysen für alle Hirntumortypen. Wiederum wurde signifikant häufigeres Auftreten auf der ipsilateralen Kopfseite beobachtet (HARDELL et al. 2002B).

Eine Fall-Kontrollstudie an 469 Fällen und 422 Kontrollen fand kein erhöhtes Hirntumorrisiko für Mobiltelefonbenutzer (MUSCAT et al. 2000). 16 Prozent des untersuchten Kollektivs benützten Mobiltelefone. Von diesen wurde das Telefon im Mittel seit knapp 3 Jahren während etwa 2.5 Stunden pro Monat benutzt. Analysen für die einzelnen Tumortypen ergaben für einen seltenen Tumortyp (neuroepithelial) ein nichtsignifikant erhöhtes Risiko (OR= 2.1; 95%-CI: 0.9–4.7), ansonsten wurden nur Werte unter 1 gefunden. Bei 41 Fällen konnte eruiert werden, welche Kopfseite beim Telefonieren bevorzugt wurde. Bei diesen Fällen traten Tumore auf der ipsilateralen Seite häufiger (26) auf als auf der kontralateralen Seite (15). Dieses Ergebnis war statistisch knapp nicht signifikant ($p=0.06$). Die Aussagekraft dieser Studie wird von verschiedenen Autoren in Frage gestellt. Kritisiert wird unter anderem, dass die Kontrollen im Durchschnitt 5 Monate später als die Fälle interviewt wurden. Da in diesem Zeitraum die Mobiltelefonbenützung in der Bevölkerung zugenommen hat, führt dies zu einer Unterschätzung eines allfälligen Risikos (HARDELL and MILD 2001). Weitere Kritikpunkte sind: die kurze Telefonbenutzungsdauer im Vergleich zur Latenzzeit, der Ausschluss gewisser Fälle aus der Studie, die Durchführung der Interviews bereits 24–48 Stunden nach der Operation, die Vermischung von verschiedenen Telefontypen (handgehaltene und solche mit externer Antenne) (HARDELL and MILD 2001, FREY 2001, ERMAN et al. 2001, KANE 2001).

Eine weitere Fall-Kontrollstudie an 782 Fällen und 799 Kontrollen fand keinen Zusammenhang zwischen dem Gebrauch des Mobiltelefons und der Hirntumorhäufigkeit (INSKIP et al. 2001). 80 Prozent der Fälle benützten nie oder kaum je ein Mobiltelefon. Rund 10 Prozent der Fälle benützten Mobiltelefone bereits vor 1992. (Die Befragung fand zwischen 1994 und 1998 statt.) Nur bei 3.5 Prozent der Fälle war die berechnete kumulative Gebrauchsdauer grösser als 500 Stunden. Bezüglich der verschiedenen Tumortypen wurde nur für Meningeome (Hirnhauttumor) ein erhöhtes Risiko gefunden (OR=1.4; 95%-CI:0.6–3.5). Auf der beim Telefonieren stärker exponierten Kopfseite traten Tumore nicht häufiger auf. Die Aussagekraft

dieser Studie wurde aufgrund der geringen Telefonbenützung, der langen Latenzzeit für Hirntumore sowie eines möglichen Erinnerungsbias bei Hirntumorerkrankten von verschiedenen Wissenschaftlern in Frage gestellt (ERMAN et al. 2001, FREY 2001, NELSON 2001).

Eine dänische Registerkohortenstudie fand kein erhöhtes Risiko für Tumore des Nervensystems bei Mobiltelefonbenutzern im Vergleich zur allgemeinen Bevölkerung (JOHANSEN et al. 2001, siehe S. 119). Die Abonnementsdauer war nur für die Benutzer von GSM-Telefonen eruierbar. Von diesen waren rund 8 Prozent seit mindestens 3 Jahre eingeschrieben. Bei den Benutzern von analogen Telefonen dürfte die Benützungsdauer länger gewesen sein. In Bezug auf die Lokalität des Tumors ergab sich das höchste standardisierte Inzidenzverhältnis für Tumore am Hinterkopf. Es betrug 1.79 (0.58–4.17). Der Hinterkopf dürfte im Kollektiv im Durchschnitt am stärksten exponiert sein, wenn ein Teil der Personen das Telefon am linken, die anderen am rechten Ohr benutzen. Mit zunehmender Abonnementsdauer ergab sich eine Zunahme des Risikos. Diese war jedoch statistisch nicht signifikant ($p=0.19$). Kritisiert wurde an dieser Studie, dass der Gebrauch firmeneigener Mobiltelefone am Arbeitsplatz nicht berücksichtigt wurde. Damit wurden Personen, die nicht persönlich als Kunde bei einer Mobiltelefongesellschaft eingeschrieben waren, zur Referenzgruppe gezählt, auch wenn sie das Telefon am Arbeitsplatz sehr häufig benutzten. Dies zieht unweigerlich eine Unterschätzung der wahren Dosis-Wirkungsbeziehung nach sich (GODWARD et al. 2001, HOCKING 2001).

Eine finnische, registerbasierte Fall-Kontrollstudie fand ein geringfügig, statistisch nicht signifikant erhöhtes Hirntumorrisiko für alle Mobiltelefonbenutzer (AUVINEN et al. 2002). Das war in erster Linie auf das erhöhte Risiko von Benutzern von Analogtelefonen zurückzuführen. Benutzer von GSM-Telefonen hatten kein erhöhtes Risiko. Weiter zeigten die Untersuchungen, dass das Risiko mit der Abonnementsdauer von 1.0 (95%-CI: 0.6–2.1) für eine Dauer von weniger als einem Jahr auf 1.5 (0.9–2.5) für eine Dauer von mehr als 2 Jahren zunahm (für alle Benutzer). Separate Analysen für verschiedene Hirntumortypen ergaben für Gliome das höchste Risiko. Im untersuchten Kollektiv benutzten 13 Prozent ein Mobiltelefon. Die mittlere Abonnementsdauer betrug bei den Benutzern von Analogtelefonen 2–3 Jahre, bei den Benutzern von GSM-Telefonen weniger als ein Jahr.

MUSCAT et al. 2002 verglichen 90 Fälle von Akustikusneurinomen mit 86 Kontrollen. 20 Prozent der Fälle und 27 Prozent der Kontrollen benutzten ein Mobiltelefon. Die durchschnittliche kumulierte lebenslange Benützung betrug bei den Fällen 226 Stunden und bei den Kontrollen 174 Stunden. Die Analysen ergaben generell kein erhöhtes Tumorrisiko in Bezug auf Häufigkeit, Abonnementsdauer und kumulativen Gebrauch des Telefons. Einzig für Personen, die ein Mobiltelefon länger als 3 Jahre benutzten, wurde ein statistisch nicht signifikant erhöhtes Tumorrisiko gefunden (OR=1.7, 95%-CI: 0.5–5.1). Die Tumore traten häufiger auf der dem Telefon entgegengesetzten Kopfseite auf (kontralateral). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Akustikusneurinome zu einer Hörminderung führen und es zu erwarten ist, dass mit dem besseren Ohr telefoniert wird.

Bewertung

Studien, die den Zusammenhang von beruflichen Expositionen und Tumoren des Zentralnervensystems untersuchten, fanden wiederholt erhöhte Risiken für Berufe mit elektromagnetischer Exposition. Der höchste beobachtete Wert für das zusätzliche Risiko beträgt 90 Prozent. Die Studie an Motorola-Arbeitern fand hingegen ein um 10 Prozent reduziertes Risiko. Als Ganzes betrachtet können diese Studien als Hinweis für einen Zusammenhang interpretiert werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei diesen Berufen wahrscheinlich immer sowohl nieder- als auch hochfrequente Expositionen vorlagen. Welche Feldart für einen allfälligen Effekt verantwortlich ist, kann aus den Daten nicht extrahiert werden. Weiter stellt sich die Frage nach zusätzlichen Expositionsfaktoren in diesen Berufen, welche in den Studien nicht erfasst wurden. Ein diesbezüglicher systematischer Fehler kann nicht ausgeschlossen werden.

Keine der bisher publizierten Studien zum Hirntumorrisiko um TV- und Radiosender fand einen Zusammenhang. Eine abschliessende Beurteilung ist aufgrund von 3 Studien noch nicht möglich. Die Wahrscheinlichkeit einer Assoziation kann aber als gering erachtet werden.

Von den 8 Studien, die das Hirntumorrisiko von Mobiltelefonbenutzern untersuchten, fanden 6 Studien kein erhöhtes Hirntumorrisiko (HARDELL et al. 1999, HARDELL et al. 2000, DREYER et al. 1999A, MUSCAT et al. 2000, MUSCAT et al. 2002, INSKIP et al. 2001, JOHANSEN et al. 2001) und 2 Studien ein erhöhtes Risiko (HARDELL et al. 2002A, HARDELL et al. 2002B, AUVINEN et al. 2002), insbesondere für Benutzer von Analogtelefonen. Analogtelefone sind schon länger im Gebrauch als die heute üblichen digitalen GSM-Telefone. Wegen der langen Latenzzeit für die Entstehung von Hirntumoren ist es plausibel, dass Effekte vor allem für die bereits länger eingesetzten Analogtelefone nachgewiesen werden können. Zudem strahlen Analogtelefone stärker als moderne GSM-Telefone. Schwierig zu interpretieren sind Analysen, die die Kopfseite des Mobiltelefongebrauchs mit dem Ort des Tumorauftritts verglichen haben. So ist es möglich, dass positive Zusammenhänge auf Recall-Bias zurückzuführen sind (HARDELL et al. 2002A, HARDELL et al. 2002B, HARDELL et al. 2000, HARDELL et al. 1999, MUSCAT et al. 2000), während negative Assoziationen die Folge einer Hörverminderung durch Akustikusneurinome sein könnten (MUSCAT et al. 2002).

Bei der Bewertung der Resultate ist insbesondere die Dauer und Häufigkeit des Gebrauchs mit der Latenzzeit von Hirntumoren in Beziehung zu setzen. In den untersuchten Kollektiven war der Anteil der Mobiltelefonbenutzer durchwegs gering, d.h. im Bereich von 15 bis 30 Prozent. Diese benützten ausser bei HARDELL et al. 2002A, HARDELL et al. 2002B das Telefon im Durchschnitt seit weniger als 3 Jahren. In Anbetracht der langen Induktions- bzw. Latenzzeit für Hirntumore sind diese Studien deshalb ungeeignet, um schon Schlussfolgerungen zu ziehen. So wurde beispielsweise für den bekannten Risikofaktor Röntgenbestrahlung des Schädels mit hohen Dosen ein Effekt erst fünf oder mehr Jahre nach der Exposition festgestellt (DAENTZER and BOKER 1999). Unter diesem Aspekt ist es deshalb besonders bemerkenswert, dass gerade die umfassendste Studie, sowohl in Bezug auf die An-

zahl Fälle als auch auf die Dauer und Häufigkeit der Mobiltelefonbenützung, die deutlichsten Zusammenhänge zwischen Mobiltelefonbenützung und Hirntumorrisiko gefunden hat (HARDELL et al. 2002A).

Insgesamt bilden diese Ergebnisse eine Evidenz, dass bei starker Bestrahlung des Kopfes, wie sie durch Mobiltelefone stattfindet, das Hirntumorrisiko möglicherweise erhöht ist. Endgültige Schlussfolgerungen werden jedoch erst mit Studien möglich sein, die den Effekt von längeren Benützungsdauern von Mobiltelefonen untersuchen. Zur Zeit sind in mehreren Ländern im Rahmen des Projektes INTERPHONE mehrere Studien zu dieser Thematik am Laufen. Ergebnisse sind frühestens im Jahre 2004/2005 zu erwarten.

7.3.4 Brustkrebs

Einführung

Stevens postulierte einen Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und Brustkrebs (STEVENS 1987). Die ursprüngliche Hypothese (die inzwischen verfeinert und abgewandelt wurde) beinhaltete eine Verringerung der Melatoninproduktion unter dem Einfluss von niederfrequenten elektrischen Feldern. Dies führe zu einer gesteigerten Produktion von Östrogenen und Prolaktin. Dadurch werde die Zellteilungsrate im Brustgewebe erhöht und die Zellen antworteten verändert auf Karzinogene. Ausgehend von dieser so genannten Melatonin-Hypothese wurde ein Zusammenhang zwischen Brustkrebs und elektromagnetischen Feldern in mehreren Studien, insbesondere in arbeitsmedizinischen Studien untersucht.

Resultate

Die Studien zu Brustkrebs sind in Tabelle 28 zusammengestellt.

Eine arbeitsmedizinische Studie, bei der auch Expositionsmessungen durchgeführt wurden, untersuchte das Brustkrebsrisiko von Frauen, die im Radio- oder Telegraphiebereich auf norwegischen Schiffen gearbeitet hatten (TYNES et al. 1996). Die Frauen arbeiteten viel nachts und waren nieder- und hochfrequenten elektromagnetischen Feldern sowie künstlichem Licht in der Nacht ausgesetzt. Die Studie ergab ein um rund 50 Prozent erhöhtes Brustkrebsrisiko. Altersspezifische Analysen ergaben höhere Risiken für Frauen, die älter als 50 Jahre waren. Die Daten unterstützen die Hypothese, dass chronobiologische Störungen das Brustkrebsrisiko erhöhen. Inwiefern die Exposition gegenüber Radiostrahlung zu dieser Risikoerhöhung beigetragen hat, ist unklar.

Tabelle 28: Übersicht über Studien zu Brustkrebs. Tabelliert sind die gefundenen Risiken und in Klammern das 95%-Vertrauensintervall.

Studie	Expositionsquelle (Frequenz)	Intensität	Max SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp	Mass	Stärke der Assoziation
TYNES et al. 1996	Funkgeräte (405 kHz–25 MHz)	20 V/m		Arbeitsmedizin	SIR	RR=1.5 (1.1–2.0) (alle) RR=2.5 (1.3–4.3) (50–54-Jährige)
DOLK et al. 1997b	TV-/Radiosender (30 MHz–600 MHz)	0.007–0.07 W/m ² <10 km	$\sim 8 \cdot 10^{-4}$ – $8 \cdot 10^{-3}$	Cluster	SIR	0–2 km: RR=1.08 (0.90–1.31) ^{a)} RR=1.64 (0.04–9.13) ^{b)} 0–10 km: RR=1.05 (1.01–1.10) ^{a)} RR=0.99 (0.60–1.64) ^{b)}
MORGAN et al. 2000	im Beruf	>Median		Arbeitsmedizin	SMR	Alle Motorola-Angestellten: RR=0.78 (0.65–0.90) Angestellte mit Expos.>Mittelwert: RR= 0.95 (0.4–1.8)
JOHANSEN et al. 2001	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register	SIR	Männer: RR=0.99 (0.32–2.32) Frauen: RR=1.08 (0.91–1.26)

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.)

^{a)} Bezieht sich auf Tumoren bei Frauen.

^{b)} Bezieht sich auf Tumoren bei Männern

Die erste englische Radiosender-Studie um den Sender in Sutton Coldfield untersuchte das Brustkrebsrisiko bei Männern und Frauen in Abhängigkeit von der Distanz zum Sender (DOLK et al. 1997B, siehe S. 118). Es zeigte sich kein konsistentes Bild in den Daten. Die Autoren schlossen einen Zusammenhang eher aus und untersuchten in der grösseren Nachfolgestudie das Brustkrebsrisiko nicht mehr (DOLK et al. 1997A, siehe S. 118).

MORGAN et al. 2000 (siehe S. 117) verglichen die Sterblichkeit wegen Brustkrebs von Motorola-Arbeiterinnen mit jener der allgemeinen Bevölkerung. Für alle Motorola-Arbeiterinnen zusammen war die Mortalität rund 25 Prozent tiefer als für die allgemeine Bevölkerung. Bei jenen Motorola-Arbeiterinnen, die in Berufen mit hoher oder moderater Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung arbeiteten, war sie etwa gleich hoch wie in der Allgemeinbevölkerung.

Keine signifikant erhöhte Brustkrebsinzidenz wurde bei dänischen Mobiltelefonierenden im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung gefunden (JOHANSEN et al. 2001, siehe S. 119). Neben den generellen methodischen Problemen von Registerstudien wurde an dieser Studie bemängelt, dass Personen, die Telefone ihres Arbeitgebers benutzten, nicht zur exponierten Gruppe gezählt wurden. Somit wurde eine allenfalls vorhandene Expositions-Wirkungsbeziehung unterschätzt (GODWARD et al. 2001, HOCKING 2001).

Bewertung

Eine Studie fand ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko für Brustkrebs bei Frauen, die im Telegraphiebereich arbeiteten. Die Ursache ist jedoch unklar: in Frage kommen künstliches Licht in der Nacht, niederfrequente elektromagnetische Felder, hochfrequente Strahlung oder chronobiologische Störungen infolge der Schichtarbeit. Die anderen Studien fanden keine klaren Zusammenhänge. Allenfalls könnten gewisse Befunde als Hinweise interpretiert werden, beispielsweise das leicht erhöhte Brustkrebsrisiko von Frauen um Radiosender, oder die Tatsache, dass die SIR von Motorola-Angestellten in Berufen mit überdurchschnittlicher Radiofrequenzstrahlung höher war als die SIR aller Motorola-Angestellten. Hauptproblem ist in diesen Studien die Expositionsbestimmung. Es ist nicht klar, gegenüber welcher Art Strahlung (niederfrequent oder hochfrequent) die Arbeiterinnen exponiert waren und wie hoch die Belastung war. Es wird als nicht möglich erachtet, die Ergebnisse bei niederfrequenter Exposition auf die Expositionssituation gegenüber hochfrequenter Strahlung zu übertragen (BLETTNER and SCHLEHOFER 1999). In Anbetracht der methodischen Schwächen der Studien kann nicht beurteilt werden, ob die Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung das Risiko für die gravierende gesundheitliche Folge Brustkrebs erhöht.

7.3.5 Augentumore

Einführung

Das Auge gehört beim Mobiltelefonieren zu den am stärksten exponierten Bereichen des Kopfes. Zudem ist seine Durchblutung relativ gering, so dass die physiologische Thermoregulation entsprechend wenig effizient ist. Im Hinblick auf Gewebeerwärmungen ist das Auge deshalb besonders sensibel. Es wird vermutet, dass sich eine allfällige kanzerogene Wirkung von hochfrequenter Strahlung bei Mobiltelefonierenden in einem erhöhten Augentumorrisiko manifestieren könnte.

Resultate

Die Studien zu Augentumoren sind in Tabelle 29 zusammengestellt.

STANG et al. 2001 publizierten eine Studie, die den Zusammenhang von verschiedenen beruflichen Expositionen und Augenmelanomen untersuchte. Dabei wurde für Benutzer von Mobiltelefonen und Funkgeräten ein rund drei- bis vierfach erhöhtes, statistisch signifikantes Risiko für Aderhauttumore, dem häufigsten Augentumor, gefunden. Diese Befunde wurden als Indiz für eine kanzerogene Wirkung von Radiofrequenzstrahlung gewertet. Da die Studie jedoch nicht für diese spezifische Fragestellung entwickelt worden war, blieben viele Fragen offen. Die Resultate beruhen auf sehr kleinen Fallzahlen: nur 6 Fälle und 15 Kontrollen benutzten jemals ein Mobiltelefon. Zudem wurde die Mobiltelefonbenützung nur im Rahmen der Berufsausübung erfasst. Des Weiteren ist unklar, ob die UV-Strahlung als mögliche Störgröße in der Analyse hätte berücksichtigt werden müssen (INSKIP 2001).

Tabelle 29: Übersicht über Studien zu Augentumoren. Tabelliert sind die gefundenen Risiken und in Klammern das 95%-Vertrauensintervall.

Studie	Expositionsquelle (Frequenz)	Intensität	Max. SAR10 [W/kg]	Studientyp	Mass	Stärke der Assoziation
DOLK et al. 1997b	TV-/Radiosender (30 MHz-600 MHz)	0.007–0.07 W/m ² <10 km	$\sim 8 \cdot 10^{-4}$ – $8 \cdot 10^{-3}$	Cluster	SIR	0–2 km: RR=0 (keine Fälle) 0–10 km: RR=1.16 (0.75–1.80)
STANG et al. 2001	Im Beruf (Mobiltelefon oder Funkgerät)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll	OR	Mobiltelefon-Benützer: OR=4.2 (1.2–14.5) Funkgerätbenützer: OR=3.3 (1.2-9.2)
JOHANSEN et al. 2001	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register	SIR	Männer: RR=0.65 (0.28–1.27) Frauen: 0 (keine Fälle)

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.)

Kein erhöhtes Augentumorrisiko wurde um den englischen Radiosender Sutton Coldfield gefunden (DOLK et al. 1997B, siehe S. 118). Ebenfalls nicht erhöht war das Augentumorrisiko bei den dänischen Mobiltelefonbenutzern (JOHANSEN et al. 2001, siehe S. 119). Bei den Männern traten 8 Fälle statt der erwarteten 12.4 Fälle auf. Bei den Frauen wurde bei einem Erwartungswert von 1.1 Fällen kein einziger Fall beobachtet. Nach der Publikation von STANG et al. 2001 fokussierte sich Johansen auf diesen Aspekt in seiner Registerstudie und kam zum Schluss, dass keine Evidenz für ein erhöhtes Augentumorrisiko besteht (JOHANSEN et al. 2002). Dies wurde insbesondere auch damit begründet, dass die Augentumorinzidenz in der Bevölkerung in den letzten Jahren konstant blieb. Würde ein Zusammenhang bestehen, müsste sich dies in der Tumorzinzidenz repräsentieren. Dazu ist allerdings kritisch anzumerken, dass Augentumore zu den Tumortypen mit den langsamsten Wachstumsraten gehören.

Bewertung

Die Augen sind insbesondere beim Gebrauch von Mobiltelefonen und Funkgeräten exponiert. Ein damit einhergehendes erhöhtes Augentumorrisiko kann aufgrund der deutschen Augentumorstudie im Moment nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der publizierten Studien scheint es eher unwahrscheinlich, dass in der Nähe von Sendeanlagen wie TV-, Radio oder Mobilfunkantennen das Augentumorrisiko erhöht ist.

7.3.6 Weitere Tumorarten

Einführung

Vor allem in Register- oder Kohortenstudien wurden häufig alle Krebserkrankungen mit der Exposition in Beziehung gesetzt, und nicht nur die Tumorarten, für welche eine a priori Hypothese bestand. Im vorliegenden Abschnitt werden die Studien zu denjenigen Tumorarten diskutiert, die nicht schon oben besprochen wurden.

Resultate

Die Studien über weitere Tumorarten sind in Tabelle 30 zusammengestellt.

Die polnische Militärstudie fand für exponierte Personen für alle Krebsarten zusammengefasst ein erhöhtes Risiko (SZMIGIELSKI 1996, siehe S. 117). Neben den in den vorherigen Kapiteln diskutierten Krebsarten wurden auch Zusammenhänge zu Tumoren in der Speiseröhre, im Magen und im Dickdarm gefunden. Die Studie um den Sutton Coldfield-Sender (DOLK et al. 1997B, siehe S. 118) fand in unmittelbarer Nähe des Senders, bis zu einem Abstand von 2 km, signifikant mehr Haut- und Blasen- und Magentumoren als innerhalb von 10 km um den Sender. Im Abstand von 10 km waren Blasen- und Magentumore signifikant häufiger als in der Allgemeinbevölkerung.

HALLBERG and JOHANSSON 2002 verglichen die Hautkrebsinzidenz in den letzten 50 Jahren mit den Standorten von FM-Radiosendeanlagen in Norwegen, Schweden und den USA. Dabei wurde in Schweden und Norwegen eine signifikante räumliche Korrelation zwischen dem Auftreten der Hautkrebsfälle und dem Standort der Sender festgestellt. Limitierend an dieser Analyse ist die Tatsache, dass in diesen beiden Ländern im Süden deutlich mehr Sendeanlagen stehen als im Norden. Es ist bekannt, dass die Hautkrebsinzidenz infolge der Exposition gegenüber der UV-Strahlung abhängig vom Breitengrad ist. In den USA, wo es im Süden nicht mehr Sender gibt als im Norden, wurde diese räumliche Korrelation nicht festgestellt. Weiter stellten HALLBERG and JOHANSSON 2002 fest, dass sowohl die Hautkrebsinzidenz als auch die Anzahl Sender in den letzten 50 Jahren zugenommen haben, und dies auf eine Assoziation hindeute. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Abnahme des stratosphärischen Ozons und insbesondere ein verändertes Freizeitverhalten mit verstärkter UV-Exposition die dominierende Rolle spielen dürften.

Tabelle 30: Übersicht über Studien zu anderen Tumoren als Tumoren des Zentralnervensystems, des blutbildenden und lymphatischen System, sowie von Augen- und Brusttumoren.

Studie	Expositionsquelle (Frequenz)	Intensität	Max SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp	Assoziation	Keine Assoziation
MILHAM 1988b	Funkgerät (-)	Bei Hobby-Gebrauch		Register	-	Speiseröhre, Magen, Darm, Rektum, Leber, Bauchspeicheldrüse, Atmungsorgane, Prostata, Blasenkrebs, Niere
HAYES et al. 1990	im Beruf	-	-	(Fall-Kontrolle)	Hodenkrebs: OR=3.1 (95%-CI: 1.4–6.9) für selbstgeschätzte Exposition	Hodenkrebs: OR=1.1 für Expositionsabschätzung basierend auf der Berufsbezeichnung
SALVATORE 1993, VOLKERS 1992, DAVIS and MOSTOFI 1993	Radarpistolen	-	-	Register/Kohorte	Hautkrebsinzidenz: RR=1.45 (90%-CI: 1.1–1.9) Hodenkrebsinzidenz: RR = 1.3, (90% CI: 0.9–1.8)	
SZMIGIELSKI 1996	Radio- oder Radarstrahlung	85% des Kollektivs: <2W/m ² Rest: 2–6 W/m ²	<~0.25 ~0.25–2.3	Arbeitsmedizin (Register)	Tumore der Speiseröhre, des Magens und Dickdarms	Mundhöhle, Rachen, Leber, Lunge, Knochen, Haut, Niere, Schilddrüse
DOLK et al. 1997b	TV-/Radiosender (30 MHz-600 MHz)	0.007–0.07 W/m ² <10 km	~8·10 ⁻⁴ –8·10 ⁻³	Cluster	Haut-, Blasen, Magentumore	Lunge, Dickdarm, Prostata
MORGAN et al. 2000	im Beruf	>Median	-	Arbeitsmedizin	-	Haut, Atmungsorgane, Verdauungsorgane, Magen, Bauchspeicheldrüse, Prostata (Männer), weibliche Genitalorgane (ohne Brüste), Blase, Niere
JOHANSEN et al. 2001	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register	-	Rachen, Speiseröhre, Magen, Darm, Rektum, Leber, Bauchspeicheldrüse, Kehlkopf, Lunge, Gebärmutter, Prostata, Hoden, Niere, Blase, Haut, Schilddrüse, unspezifizierte Tumore
HALLBERG and JOHANSSON 2002	FM-Radiosender - (87–108 MHz)	-	-	Register	Räumliche und zeitliche Korrelation von Hautkrebs und FM-Sendeanlagen in Schweden/Norwegen	Keine räumliche Korrelation von Hautkrebs und FM-Sendeanlagen in den USA

(Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.)

In der Öffentlichkeit hat ein mögliches Hodenkrebsrisiko immer wieder Beachtung gefunden. HAYES et al. 1990 untersuchten in einer amerikanischen Studie 271 Männer mit Hodenkrebs im Alter von 18 bis 42 Jahren und 259 Kontrollen. Dabei wurde die Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung auf zwei Arten erhoben: durch die Patienten selbst sowie anhand der Berufsbezeichnung. Für die selbstgeschätzte Exposition bestand ein rund dreifach erhöhtes, statistisch signifikantes

Hodenkrebsrisiko (OR=3.1; 95%-CI: 1.4–6.9), jedoch gab es keinen Zusammenhang zur Strahlungsexposition, welche basierend auf der Berufsbezeichnung geschätzt wurde (OR=1.1). Angehörige von Berufen mit der höchsten Exposition hatten sogar ein um 20% reduziertes Hodenkrebsrisiko. Methodisch limitierend an dieser Studie ist, dass als Kontrollen auch Krebspatienten ausgewählt wurden, welche jedoch an anderen Krebsarten als solchen im Genitalbereich erkrankt waren.

Öffentliches Aufsehen erregten 6 Hodenkrebsfälle, die zwischen 1979 und 1991 in einer Polizistenkohorte von 340 Polizisten auftraten (SALVATORE 1993, VOLKERS 1992, DAVIS and MOSTOFI 1993). Das waren rund 7 Mal mehr Fälle als man für ein solches Kollektiv in diesem Zeitraum erwarten würde. Als einzige mögliche Ursache, die für alle 6 Fälle zutraf, wurden Radarpistolen ausgemacht. Diese werden in unmittelbarer Nähe der Hoden getragen. In der Folge wurde das Krebsrisiko von rund 22'000 Polizisten in Ontario mit demjenigen der Allgemeinbevölkerung verglichen. Für alle Krebsarten zusammen war das Tumorrisiko bei Polizisten 10% kleiner (SIR=0.9; 95%-CI:0.83–0.98). Das Hautkrebsrisiko (SIR = 1.45, 90% CI = 1.1–1.9) und das Hodenkrebsrisiko (SIR = 1.3, 90% CI = 0.9–1.8) waren höher als bei der Allgemeinbevölkerung.

Diesbezüglich sei erwähnt, dass die Studie von JOHANSEN et al. 2001 (siehe S. 119) von allen untersuchten Tumorarten bei Männern für Hodentumore das höchste Risiko fand. Die standardisierte Inzidenz war um 12 Prozent (95%-CI: -3% bis 30%) höher als in der Allgemeinbevölkerung.

Bewertung

Bei epidemiologischen Untersuchungen ist zu unterscheiden zwischen solchen mit einer vorgegebenen Hypothese, z.B. «der Gebrauch von Mobiltelefonen ist mit einem erhöhten Hirntumorrisiko verbunden» und eher explorativen Studien ohne a priori-Hypothese. In explorativen Studien wird das gesammelte Datenmaterial häufig bezüglich vieler Krankheiten analysiert. Dabei fällt eine grosse Anzahl statistischer Vergleiche an und damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass vereinzelt zufällig statistisch signifikante Assoziationen gefunden werden, obschon real kein Kausalzusammenhang zwischen einem Agens und der analysierten Wirkung besteht (Fehler der 1. Art). Einzelne signifikante Ergebnisse ohne a priori Hypothese gelten daher als weniger aussagekräftig. Sie dienen insbesondere zur Generierung neuer Hypothesen, welche in Folgeuntersuchungen spezifisch abzuklären sind. Bei den Register- und Kohortenstudien, die in diesem Kapitel beschrieben wurden, handelt es sich mehrheitlich um explorative Studien mit den genannten Einschränkungen.

Zu den Tumorarten, für die eine a priori Hypothese besteht, dass sie durch hochfrequente Strahlung mitverursacht werden, gehören Tumore des blutbildenden, lymphatischen und Zentralnervensystems sowie Brust- und Augenkrebs. Bei den übrigen Tumoren gibt es aufgrund der bisherigen Studien wenig Evidenz, dass ein Zusammenhang zur Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung bestehen könnte. Eine Ausnahme bilden die Hodentumore. Aufgrund der bisherigen Studienresultate kann ein Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden. Dies erscheint insofern plausibel, als bei den Hoden (wie bei den Augen) der physiologische Temperatur-

ausgleich wenig effizient ist und es deshalb für eine Temperaturerhöhung eine geringere Strahlungsleistung braucht als in gut durchblutetem Gewebe. Zu diesen beiden Tumortypen braucht es sicherlich noch mehr Untersuchungen. In Bezug auf das Risiko durch Mobiltelefone im Stand-by Betrieb, die in Hosentaschen getragen werden, ist anzumerken, dass diese nur sehr kurz senden (ca. 3 Verbindungen pro Stunde). Ein Tumorrisiko ist durch eine solch geringe Belastung mit hochfrequenter Strahlung daher sehr unwahrscheinlich. Höhere Belastungen in den unteren Körperregionen sind allenfalls beim Gebrauch von Telefonen mit Freisprecheinrichtungen oder beim Versenden von SMS zu erwarten, wobei bei letzterem die Verbindungszeit und damit die Strahlenemission gering sind. Diskutiert wird zuweilen auch ein allfälliger schädlicher Effekt durch die Wärmeabgabe des Akkus.

Zusammenfassend wird das Risiko für Hodentumore als nicht beurteilbar erachtet. Für die restlichen Tumortypen scheint ein kausaler Zusammenhang zu der Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung unwahrscheinlich.

7.4 Nicht-karzinogene Wirkungen

7.4.1 Infertilität/Abort

Einführung

Im Zusammenhang mit möglichen zellschädigenden Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung wird auch ein Risiko für die Nachkommen von exponierten Personen diskutiert. Untersucht wurden in diesem Zusammenhang das Risiko für spontane Aborte, angeborene Fehlbildungen, Frühgeburten, Tumorerkrankungen bei Kindern sowie Einflüsse auf das Geburtsgewicht und die Spermienqualität. Am häufigsten untersucht wurde bisher, ob Physiotherapeutinnen, die mit Diathermiegeräten arbeiten, ein höheres Risiko für Aborte oder Nachkommen mit angeborenen Fehlbildungen haben. Kurzwellen-Diathermiegeräte emittieren hochfrequente Strahlung mit einer Frequenz von 27.12 MHz, Mikrowellendiathermiegeräte bei 915 oder 2450 MHz.

Die Studien über Infertilität und Abort sind in Tabelle 31 zusammengestellt.

Resultate

KALLEN et al. 1982 beobachteten ein erhöhtes Risiko für Spontanaborte und angeborene Fehlbildungen bei Nachkommen von Physiotherapeutinnen, die mit Kurzwellendiathermie gearbeitet hatten. TASKINEN et al. 1990 fanden ein rund dreifach erhöhtes Risiko für Spontanaborte nach der 10. Schwangerschaftswoche bei Exposition gegenüber Ultraschall und Diathermiestrahlung. Bei Berücksichtigung von potenziellen Störgrößen war das Risiko nicht mehr statistisch signifikant. Keinen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung und angeborenen Missbildungen fand LARSEN 1991 bei Nachkommen von dänischen Physiotherapeutinnen. Kein Einfluss von Kurz- oder Mikrowellenexposition auf das Geburtsgewicht wurde bei schweizerischen Physiotherapeutinnen festgestellt (GUBERAN et al. 1994).

OUELLET-HELLSTROM and STEWART 1993 untersuchten die Schwangerschaft von rund 12'000 amerikanischen Physiotherapeutinnen, von denen rund 7000 angaben, schon mindestens einmal in ihrer Anstellung mit Kurz- oder Mikrowellen-Diathermiegeräten gearbeitet zu haben. Dabei war Mikrowellenexposition (6 Monaten vor dem ersten Schwangerschaftstrimester bis zum Ende des ersten Trimesters) signifikant mit einem erhöhten Risiko für Fehlgeburten assoziiert (OR=1.28, 95%-CI:1.02–1.59). Nach Berücksichtigung von möglichen Störgrößen verringerte sich das OR auf 1.22 und war nicht mehr signifikant (95%-CI: 0.92–1.63). Das Fehlgeburtenrisiko nahm signifikant zu, je häufiger die Physiotherapeutinnen pro Monat gegenüber dem Mikrowellentherapiegerät exponiert waren. Die am stärksten exponierte Personengruppe war mehr als 20 Mal pro Monat exponiert und hatte ein um 59 Prozent erhöhtes Fehlgeburtenrisiko. Im Gegensatz zur Exposition gegenüber Mikrowellentherapiegeräten war der Gebrauch von Kurzwellen-Diathermiegeräten nicht mit einem häufigeren Auftreten von Fehlgeburten assoziiert. Messungen ergaben bei der Mikrowellentherapie im inhomogenen Feld Leistungsflussdichten zwischen 0.4–166 W/m² (elektrische Feldstärke ungefähr 12–250 V/m) und bei den Kurzwellen-Diathermiegeräten zwischen 0.8–120 W/m² (17–213 V/m). Eine Therapie dauerte im Normalfall einige Minuten.

Eine israelische Studie fand kein erhöhtes Risiko für Spontanaborte und Frühgeburten beim Gebrauch von Kurzwellendiathermiegeräten (LERMAN et al. 2001). Angeborene Missbildungen waren in einer multivariaten Analyse mit dem Gebrauch von Ultraschallgeräten assoziiert, nicht aber mit der Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung (OR=1.33; 95%-CI:0.68–2.75). Jedoch trat bei Exposition gegenüber Hochfrequenzstrahlung signifikant häufiger ein tiefes Geburtsgewicht auf.

Eine amerikanische Studie untersuchte, ob bei Kindern, deren Eltern beruflich gegenüber elektromagnetischen Feldern exponiert waren, Neuroblastome häufiger auftraten (DE ROOS et al. 2001). Das Neuroblastom ist ein Tumor nicht ausgereifter Nervenzellen. Wenn die Mütter in den 2 Jahren vor der Geburt in einem Beruf gearbeitet hatten, in dem sie nach Einschätzung von Arbeitsplatzhygienikern wahrscheinlich gegenüber Hochfrequenzstrahlung exponiert waren, traten bei ihrem Nachwuchs Neuroblastome häufiger auf (OR=2.8; 95%-CI: 0.9–8.7). Bezogen auf den Gebrauch eines Mobiltelefons ergab sich, basierend auf 7 exponierten Müttern, ein Odds Ratio von 2.1 (95%-CI: 0.4–11) für Neuroblastome bei den Nachkommen.

An einem Kollektiv von 12 beruflich exponierten Männern sowie 34 unexponierten Kontrollen untersuchten GRAJEWSKI et al. 2000 einen möglichen schädlichen Effekt von Hochfrequenzstrahlung auf die Spermienqualität. Die exponierten Männer arbeiteten mit dielektrischen Heizgeräten (Frequenzbereich: 3–100 MHz), die zum Nahtschweissen von Luftmatratzen dienen. Die am Arbeitsplatz gemessenen Feldstärken lagen zwischen 35 und 95 V/m. Die Spermienkonzentration war bei exponierten und nicht exponierten Arbeitern nicht unterschiedlich. Die Spermienzahl war bei den Exponierten rund 20 Prozent geringer. Dieser Unterschied wird von den Autoren als statistisch nicht signifikant bezeichnet, aufgrund der angegebenen Standardabweichungen müsste er es aber sein. Die Schlussfolgerung der Autoren ist

in diesem Punkt nicht nachvollziehbar. Von 33 analysierten Parametern zur Spermienqualität war die Lebensfähigkeit der Spermien der Exponierten leicht höher als erwartet (statistisch signifikant.) Die Anzahl doppelköpfiger Spermien war bei den Exponierten geringfügig (statistisch signifikant) tiefer als bei den Kontrollen.

Tabelle 31: Übersicht über Studien zu Infertilität und Abort.

Studie	Expositionsquelle	Intensität	Max SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp	Assoziation	keine Assoziation
KALLEN et al. 1982	im Beruf (Kurzwellendiathermie)	-	-	Kohortenstudie	+Spontanaborte* +Missbildungen*	
TASKINEN et al. 1990	im Beruf (Kurzwellendiathermie)	-	-	Fall-Kontroll		Spontanaborte, Missbildungen
LARSEN 1991	im Beruf	-	-	Fall-Kontroll		Missbildungen
OUELLET-HELLSTROM and STEWART 1993	im Beruf (Kurz- oder Mikrowellendiathermie)	KW: 0.8–120 W/m ² MW: 0.4–166 W/m ²	MW: ~0.03–14	Querschnittsbefragung	MW: Spontanaborte: OR=1.22 (0.92–1.63), Dosis-Wirkungsbeziehung*	KW: Spontanaborte
GUBERAN et al. 1994	im Beruf (Kurzwellendiathermie)			Kohortenstudie		Geburtsgewicht, Geschlechtsverhältnis beim Nachwuchs
GRAJEWSKI et al. 2000	im Beruf (dielektrische Heizer, 3–100 MHz)	35–95 V/m	~0.4–2.7	Kohortenstudie	-Spermienzahl(*?) +Lebensfähigkeit der Spermien* -Anzahl doppelköpfiger Spermien	Spermienkonzentration, 31 Parameter zur Spermienqualität
LERMAN et al. 2001	im Beruf (Kurzwellendiathermie)			Kohortenstudie		Spontanaborte, Frühgeburten
DE ROOS et al. 2001	im Beruf; Gebrauch Mobiltelefon	-	-	Fall-Kontroll	Neuroblastome berufliche Exposition: OR=2.8 (0.9–8.7); Neuroblastome Gebrauch Mobiltelefon: OR=2.1 (0.4–11)	

(KW: Kurzwelle; MW: Mikrowelle; detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.)

Bewertung

Die Studien zum Zusammenhang zwischen dem Gebrauch von Diathermiegeräten durch Physiotherapeutinnen und Aborten sowie angeborenen Missbildungen ergaben insgesamt kein konsistentes Bild. Zum Teil wurden Effekte gefunden, zum Teil nicht. In mehreren Studien wurden die Zusammenhänge schwächer, wenn für mögliche Störgrößen korrigiert wurde. Möglicherweise ist dies ein Indiz dafür, dass der Gebrauch von Diathermiegeräten noch mit anderen Risikofaktoren assoziiert ist. Beachtenswert ist die Studie von OUELLET-HELLSTROM and STEWART 1993, die

keinen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Fehlgeburten und dem Gebrauch von Kurzwellendiathermiegeräten fand, jedoch Hinweise dafür, dass die Verwendung von Mikrowellendiathermiegeräte mit einem erhöhten Fehlgeburtenrisiko assoziiert war. Andere Gründe für den gefundenen Zusammenhang können jedoch auch bei dieser Studie nicht ausgeschlossen werden. Messungen in dieser Studie zeigten, dass lokal relativ hohe Feldstärken auftraten. Die Expositionszeit war relativ kurz. Aufgrund der geringen Fallzahl ist der Einzelbefund zu Neuroblastomen bei Kindern wenig aussagekräftig. In der Studie von GRAJEWSKI et al. 2000 wurden insgesamt 33 Parameter zur Spermienqualität verglichen. Die wenigen signifikanten Zusammenhänge können daher auch zufällig zustande gekommen sein.

Insgesamt kann mit den vorliegenden Studien nicht beurteilt werden, ob das Fehlgeburtenrisiko durch Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung erhöht ist. Auch die einzige Studie zur Spermienqualität ist zu wenig aussagekräftig.

7.4.2 Mortalität

Einführung

Es gibt eine Reihe von Studien, die den Zusammenhang zwischen hochfrequenter Strahlung und der Mortalität untersuchten. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass Mortalitätsdaten üblicherweise routinemässig erhoben werden und relativ einfach zu beschaffen sind. Solche Studien können deshalb mit wenig Aufwand für ein grosses Kollektiv durchgeführt werden, jedoch ist die Berücksichtigung von individuellen Risikofaktoren (z.B. Rauchen) praktisch nicht möglich. Eine erhöhte Mortalität wäre in erster Linie bei einer kanzerogenen Wirkung der Hochfrequenzstrahlung oder bei einer Beeinflussung des Herz-Kreislaufsystems zu erwarten.

Resultate

Die Studien zur Mortalität sind in Tabelle 32 zusammengestellt.

Eine Studie an amerikanischen Radararbeitern, die im Koreakrieg im Einsatz waren, fand ähnliche Mortalitätsraten für exponierte und nicht exponierte Männer (ROBINETTE et al. 1980, siehe S. 117). Bei den Exponierten wurde aufgrund der Berufsbezeichnung von Experten abgeschätzt, wie häufig sie möglicherweise unbeabsichtigt hohen Belastungen ausgesetzt waren. Es wurde eine Zunahme der Sterblichkeit mit der Anzahl möglicher Hochbelastungssituationen gefunden. MILHAM 1988B (siehe S. 116) verglich in einer Registerstudie die Todesursachen von lizenzierten Amateurfunkern in den Bundesstaaten Kalifornien und Washington mit den Todesursachen der dort lebenden Bevölkerung. Bei den Funkern war die Mortalität für alle Ursachen zusammen signifikant tiefer als bei der Allgemeinbevölkerung. Eine amerikanische Studie (ROTHMAN et al. 1996) analysierte die Todesfälle einer Kohorte von 250'000 Mobiltelefonbenutzern in Bezug auf den verwendeten Telefontyp (handgehaltene Geräte mit eingebauter Antenne versus Geräte mit externer Antenne). Es wurde angenommen, dass die Benutzer von letzteren weniger stark strahlungsexponiert sind als die Benutzer von handgehaltenen Geräten. Bei den im Untersuchungszeitraum aufgetretenen 604 Todesfällen wurden praktisch keine Un-

terschiede zwischen den beiden Benutzergruppen gefunden. Zusätzliche Analysen von rund 150'000 Personenjahren einer expandierten Kohorte ergaben für 462 aufgetretene Todesfälle die gleichen Ergebnisse (DREYER et al. 1999A, siehe S. 94). Eine verminderte Mortalität im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung wurde bei Angestellten der Firma Motorola gefunden (MORGAN et al. 2000, siehe S. 117).

Tabelle 32: Übersicht über Studien zur Mortalität.

Studie	Expositionsquelle (Frequenz)	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp	Mass	Stärke der Assoziation
ROBINETTE et al. 1980	Radar (-)	<600 V/m	<~61.2		SMR	Exponierte: RR=0.96 Nicht-Exponierte: RR=1.04
MILHAM 1988a	Funkgerät (-)	Bei Hobby-Gebrauch		Register	SMR	RR=0.71 (0.69–0.74)
ROTHMAN et al. 1996	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register	stand. Mort. Raten	kein Unterschied zw. Benützern von Geräten mit interner und externer Antenne
DREYER et al. 1999a	Mobiltelefon	bei Normalgebrauch	<~2	Register	stand. Mort. Raten	kein Unterschied zw. Benützern von Geräten mit interner und externer Antenne
MORGAN et al. 2000	im Beruf	>Median	-	Arbeitsmedizin	SMR	RR=0.66 (0.64–0.67)

Tabelliert sind die gefundenen Risiken und in Klammern das 95%-Vertrauensintervall (Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 69; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert).

Bewertung

Keine Studie hat bisher eine erhöhte Mortalität im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung gefunden. Im Gegenteil: die Mortalität war meistens deutlich kleiner als bei der Allgemeinbevölkerung. Bei der Beurteilung dieser Befunde muss einerseits berücksichtigt werden, dass all diese Analysen auf standardisierten Mortalitätsverhältnissen beruhen. Das heisst, dass bei der Analyse nur das Alter und das Geschlecht berücksichtigt wurden. Andererseits handelt es sich durchwegs um spezielle Kollektive wie Angestellte, Mobilfunkbenutzer, Amateurfunker. Solche Kollektive können eine spezielle Charakteristik aufweisen, beispielsweise den sogenannten ‚Healthy Worker Effect‘. Auch ist denkbar, dass zumindest in der Anfangszeit des Mobilfunks eher gesunde, vitale Personen ein Telefon benutzten. Dies hätte zur Folge, dass solche Kollektive generell gesünder wären als die Allgemeinbevölkerung. Wenn, wie in obigen Studien, individuelle Risikofaktoren in der Analyse nicht berücksichtigt werden, führt dies daher zu einem kleineren Risiko als bei der Allgemeinbevölkerung. Aus diesem Grund kann aus diesen Studien keinesfalls geschlossen werden, dass die Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung die Lebenserwartung verlängert. Ein Zusammenhang zwischen Mortalität und hochfrequenter Strahlung müsste mit einem Studiendesign untersucht werden, das die Berücksichtigung von individuellen Risikofaktoren ermöglicht.

7.5 Indirekte Wirkungen

7.5.1 Verkehrsunfälle

Einführung

Es ist plausibel, dass durch den Gebrauch von Mobiltelefonen während des Autofahrens die Fahrfähigkeit reduziert wird. Als Ursachen werden dabei weniger die direkte Wirkung der Strahlung des Mobiltelefons, sondern andere Faktoren genannt. Erstens wird durch den Gesprächsinhalt die Konzentration auf den Strassenverkehr reduziert, zweitens muss bei Geräten ohne Freisprecheinrichtung eine Hand für das Halten des Gerätes eingesetzt werden und drittens erfolgt bei der Bedienung des Telefons (z.B. Nummern suchen und wählen) eine visuelle Ablenkung. Entsprechend wurden mittels epidemiologischer und experimenteller Studien die Auswirkungen des Mobiltelefongebrauchs auf die Fahrfähigkeit mehrfach untersucht.

Resultate

Eine kanadische Studie verglich mittels eines Case-Crossover-Studiendesigns anhand von 699 Autounfällen die Häufigkeit des Mobiltelefongebrauchs unmittelbar vor dem Unfall mit dem üblichen Gebrauch der jeweiligen Fahrer (REDELMEIER and TIBSHIRANI 1997, REDELMEIER and TIBSHIRANI 2001). Es wurde beobachtet, dass vor Unfällen der Telefongebrauch mehr als 4 Mal häufiger war als erwartet (RR=4.3; 95%-CI: 3.0–6.5). Dieser Wert basiert auf einer konservativen Analyse, die mit grosser Wahrscheinlichkeit alle Mobiltelefonanrufe nach dem Unfall ausschliesst. Weniger restriktive Analysen führten zu einem deutlich höheren Unfallrisiko. Benutzer von Freisprecheinrichtungen (RR=5.9; 95%-CI: 2.9–24.0) hatten sogar ein noch grösseres Risiko als Benutzer von handgehaltenen Geräten (RR=3.9; 95%-CI: 2.7–6.1).

Ähnliche Resultate lieferte eine Befragung von 9000 norwegischen Autofahrern nach einem Verkehrsunfall (SAGBERG 2001). Es wurde geschätzt, dass bei 0.86% aller Autounfälle ein Mobiltelefon im Spiel war. Diese Häufigkeit war 72% höher als was für unfallfreies Fahren evaluiert worden ist. Von den Unfallverursachern gaben 0.66% an, unmittelbar vor dem Unfall telefoniert zu haben, bei den unschuldig Unfallbeteiligten waren es 0.30%. Am häufigsten waren Auffahrunfälle. Es gab keinen Unterschied zwischen handgehaltenen Geräten und solchen mit Freisprecheinrichtung. SAGBERG 2001 behauptet, dass Radio und CD-Spieler mehr Unfälle verursachen als Mobiltelefone, vermutet aber, dass das wahre Risiko durch das Mobiltelefonieren am Steuer eher noch höher sei als in der Studie deklariert, da wahrscheinlich ein Teil der Personen aus versicherungstechnischen Gründen den Gebrauch des Mobiltelefons verschwiegen hätte. (Die Befragung erfolgte anonym.)

In einer amerikanischen Kohortenstudie wurden die Todesursachen von Mobiltelefonbenutzern untersucht. Die Kategorie ‚Verkehrsunfälle‘ war die einzige Kategorie von Todesursachen, die Ansätze einer Dosis-Wirkungsbeziehung mit der Benutzung des Mobiltelefons zeigte (DREYER et al. 1999A, siehe S. 94). Personen, die ihr Telefon weniger als 2 Minuten pro Tag brauchten, hatten für Autounfälle eine standardisierte Mortalitätsrate von 6/100'000 Personenjahre. Personen mit einer Benutzungsdauer von mehr als 2 Minuten pro Tag hatten eine Rate von 16/100'000. Auf-

grund der geringen Fallzahl – diese Analysen basierten auf nur 15 Todesfällen – ist der Unterschied statistisch nicht signifikant und nur bedingt aussagekräftig.

Verschiedene experimentelle Studien untersuchten die beim Mobiltelefonieren unfallverursachenden Faktoren. Dabei zeichnete sich ab, dass das erhöhte Unfallrisiko in erster Linie durch visuelle Ablenkungen zustande kommt und nicht durch Ablenkung aufgrund der Gesprächsinhalte (FUSE et al. 2001). In einer experimentellen Studie wurde deshalb ein sprachgesteuertes Wählverfahren mit einem Tastatur-Wählverfahren verglichen. Ersteres führte zu weniger Ablenkung und wurde von den Probanden bevorzugt (GRAHAM and CARTER 2001). Vorgeschlagen wird auch ein System im Auto, das erkennt, ob der Fahrer abgelenkt ist, und dann entsprechend warnen kann (DE WAARD et al. 2001).

Bewertung

Verschiedene Studien zeigten, dass der Gebrauch des Mobiltelefons beim Autofahren das Unfallrisiko erhöht. Dabei scheint es keine Rolle zu spielen, ob man Freisprecheinrichtungen oder handgehaltene Geräte benutzt. Die Strahlungsemission des Telefons dürfte jedoch kaum eine Rolle spielen. Wahrscheinlich ist der unfallverursachende Faktor insbesondere die visuelle Ablenkung, z.B. beim Nummern Wählen oder Notizen Machen.

7.5.2 Interferenzerscheinungen bei medizinischen Implantaten

Einführung

Es ist unbestritten, dass Hochfrequenzstrahlung die Funktion technischer Geräte beeinträchtigen kann. Aus diesem Grund ist beispielsweise der Gebrauch von Mobiltelefonen und anderen Hochfrequenzstrahlungsquellen beim Fliegen verboten. Mit diesen Vorgängen befasst sich eine eigene technische Disziplin, die so genannte elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Die Abhandlung dieser Thematik bildet nicht das eigentliche Ziel dieses Berichtes. Da jedoch insbesondere Störungen medizinischer Implantate schwere gesundheitliche Folgen haben können, sind im folgenden die wichtigsten Erkenntnisse in diesem Bereich dargelegt. Diese Zusammenfassung basiert hauptsächlich auf einem kürzlich erschienenen Übersichtsartikel (KAINZ et al. 2001).

Resultate

Folgende medizinischen Implantate haben sich bei Untersuchungen der elektromagnetischen Verträglichkeit als problematisch herausgestellt (in Klammern die Häufigkeit dieser Implantate in den industrialisierten Ländern Europa, Nordamerika, Australien und Japan): Herzschrittmacher (240/100'000), Defibrillatoren (0.1/100'000), Implantate im Gehörgang (1/100'000), Neurostimulatoren (0.1/100'000), Rückenmarksstimulatoren, Medikamenteninfusionssysteme (0.05/100'000) und Rückenmarksinfusionssysteme (5/100'000).

Es wurden störende Einflüsse auf mindestens eines der obigen Implantate durch folgende Quellen elektromagnetischer Felder festgestellt: Kernspinresonanztomographie (MRI), elektrochirurgische Geräte, Geräte der Zahnmedizin, Rückenmarkstimulatoren, elektrische Rasierer und Zahnbürsten, Induktionskochherde und andere Haushaltgeräte, elektronische Selbstverteidigungsgeräte, laufende Automotoren,

Arbeitsplätze mit hoher Belastung durch elektromagnetische Felder, Hochspannungsleitungen, EKG-Monitoren, Metalldetektoren, Mobiltelefone, Diebstahlsicherungsanlagen in Geschäften sowie gewisse Anwendungsgeräte der Physiotherapie. Zumindest die letzten 3 Quellen emittieren vorwiegend Hochfrequenzstrahlung. Interferenzerscheinungen sind abhängig von der Bauart des gestörten Gerätes sowie von der Frequenz und Signalform des Störsignals. Ein Beispiel dafür gibt die Publikation von KOMPIS et al. 2000. Sie beschreiben Interferenzerscheinungen bei einem knochenverankerten Hörgerät, ausgelöst durch ein GSM-Telefon. Die 217 Hz Pulsung der GSM-Strahlung konnte hörbar gemacht und gemessen werden. Experimente zeigten, dass ein Analogtelefon ohne Pulsierung bei diesem Hörgerät keine Interferenzen verursachte.

Bewertung

Auch wenn bei der Konstruktion medizinischer Implantate heute auf eine höhere Immunität gegen externe Störstrahlung geachtet wird, können im Alltag Interferenzerscheinungen nie vollständig ausgeschlossen werden. Es wird insbesondere im Umgang mit Mobiltelefonen Vorsicht empfohlen. Die Distanz zu Herzschrittmachern sollte mindestens 30 cm betragen, das Telefon sollte nicht in der Brusttasche getragen werden, und es sollte vorzugsweise mit dem Ohr telefoniert werden, das sich auf der entgegengesetzten Körperseite des Herzschrittmachers befindet. Ebenfalls sollten Träger von Herzschrittmachern Diebstahlsicherungsanlagen zügig durchschreiten, da manche dieser Geräte das Potenzial haben, bestimmte Implantate zu beeinflussen.

Anhang

Tabelle 33: Überblick über Grössen, Einheiten und Umrechnungen im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern.

Physikalische Grösse	Symbol	Einheit	Wert; Formelbeziehung
Dichte	ρ	kg/m ³	
Elektrische Feldstärke	E	V/m	im Fernfeld: $E=Z_0 \cdot H$
Feldwellenwiderstand	Z_0	$\Omega=V/A$	im Vakuum: $Z_0=376.7 \Omega$
Magnetische Feldstärke	H	A/m	im Fernfeld: $H=E/Z_0$
Magnetischer Fluss	Φ	1 Vs = 1 Wb	
Magnetische Permeabilität	μ	Vs/Am $\mu_0=4 \pi/10^7$ Vs/Am $=1.256 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am	$\mu=\mu_0 \mu_r$ $\mu_r=1$ im Vakuum $\mu_r \approx 1$ für Luft, organische Substanzen
Magnetische Flussdichte	B	1 Vs/m ² = 1 T= 10 ⁴ G	$B = \mu H$
Leistungsflussdichte	S	W/m ²	im Fernfeld: $S=E \cdot H=Z_0 H^2=E^2/Z_0$
Lichtgeschwindigkeit	c	m/s	im Vakuum: $c=3 \cdot 10^8$ m/s
Frequenz	f	Hz	$f=c/\lambda$
Wellenlänge	λ	m	$\lambda=c/f$
Körperstromdichte	j	A/m ²	$j=\sigma E$
Elektrische Leitfähigkeit	σ	S/m	
Spezifische Absorptionsrate	SAR	W/kg	$\sigma E^2/(2 \cdot \rho)$
Dezibel	dB	-	Leistungsverhältnis: 10 ^{dB/10} Verhältnis von Feldstärken: 10 ^{dB/20}

Tabelle 34: Korrespondenz verschiedener Feldgrößen unter Fernfeldbedingungen.

Elektrische Feldstärke E	Magnetische Feldstärke H	Magnet. Flussdichte B		Leistungsflussdichte S	
		μT	mG	W/m^2	$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
100	0.265	0.333	3.334	26.55	2655
10	0.0265	0.0333	0.333	0.265	27
9	0.0239	0.0300	0.300	0.215	22
8	0.0212	0.0267	0.267	0.170	17
7	0.0186	0.0233	0.233	0.130	13
6	0.0159	0.0200	0.200	0.09557	10
5	0.0133	0.0167	0.167	0.06637	7
4	0.0106	0.0133	0.133	0.04247	4
3	0.00796	0.0100	0.100	0.02389	2
2	0.00531	0.00667	0.067	0.01062	1
1	0.00265	0.00333	0.033	0.002655	0.2655
0.9	0.00239	0.00300	0.030	0.002150	0.2150
0.8	0.00212	0.00267	0.027	0.001699	0.1699
0.7	0.00186	0.00233	0.023	0.001301	0.1301
0.6	0.00159	0.00200	0.020	0.000956	0.0956
0.5	0.00133	0.00167	0.017	0.000664	0.0664
0.4	0.00106	0.00133	0.013	0.000425	0.0425
0.3	0.000796	0.00100	0.0100	0.000239	0.0239
0.2	0.000531	0.000667	0.0067	0.000106	0.0106
0.1	0.000265	0.000333	0.0033	2.65E-05	0.0027
0.01	2.65E-05	3.33E-05	0.00033	2.65E-07	0.000027

Verzeichnisse

1 Abkürzungen und Glossar der wichtigsten Begriffe

ALARA

As low as reasonably achievable: So tief als vernünftig machbar. Eine Philosophie bei der Festlegung von Grenzwerten, die vor allem bei Wirkungen angewendet wird, für die es keinen Schwellenwert gibt (z.B. ionisierende Strahlung)

AM

Amplitudenmodulation: Modulationsverfahren zur Aufprägung der Information auf die hochfrequente Trägerwelle

Assoziation

Ein in epidemiologischen Studien statistisch festgestellter Zusammenhang zwischen einer Exposition und dem Auftreten biologischer Wirkungen. Eine Assoziation gilt als statistisch signifikant, wenn sie mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 5% durch Zufall erklärbar ist. Auch eine statistisch signifikante Assoziation bedeutet jedoch nicht notwendigerweise, dass der Zusammenhang zwischen der Exposition und der biologischen Wirkung kausal ist. Ob einer statistischen Assoziation ein kausaler Zusammenhang zugrundeliegt, wird anhand eines Satzes von zusätzlichen Kriterien beurteilt (siehe Kapitel 6.4).

BAG

Bundesamt für Gesundheit

BAKOM

Bundesamt für Kommunikation

BCCH

Broadcast Control Channel: Steuerkanal einer GSM-Mobilfunkbasisstation, der permanent mit voller Sendeleistung in Betrieb ist.

BP

Bereitschaftspotential

BUWAL

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

CDMA

Code Division Multiple Access: Verfahren für die gleichzeitige Kommunikation einer Basisstation mit mehreren Telefonen; wird in der UMTS-Technologie eingesetzt.

CI

Confidence Interval: Vertrauensintervall (wenn nicht anders angegeben, immer auf 95% bezogen)

CNV

Contingent negative variation

Confounder

Siehe Störgrösse

dB

Dezibel: zehnfacher dekadischer Logarithmus. Dieses Mass wird häufig bei Messungen von Hochfrequenzstrahlung verwendet. Dezibel lassen sich nach folgender Formel in ein Verhältnis von Leistungen, Leistungsflussdichten oder Feldstärken umformen:

Leistungsverhältnis: $10^{\text{dB}/10}$

Feldstärkeverhältnis: $10^{\text{dB}/20}$

Beispielsweise entsprechen 6 dB einem Faktor 4 in der Leistung und einem Faktor 2 in der Feldstärke.

DCS

Digital Communication System: In einigen Länder übliche Bezeichnung für das GSM 1800-System

DNS

Desoxyribonukleinsäure: Trägermolekül der Erbinformationen

Downlink

Kommunikation von der Basisstation zum Mobiltelefon

DTX

Discontinuous Transmission: Bei GSM-Mobiltelefonen: Reduktion der Emission von Hochfrequenzstrahlung während Gesprächspausen

EEG

Elektroenzephalogramm

EMF

Elektromagnetisches Feld

EP

Evoked Potential: Evoziertes Potential

ERD

Event related desynchronisation: Ereignisbezogene Desynchronisation

ERP

Equivalent radiated power: äquivalente Strahlungsleistung. Die einer Antenne zugeführte Sendeleistung, multipliziert mit dem Antennengewinn gegenüber einem Halbwellendipol.

ERP

Event related potential: Ereignisbezogenes Potential

ERS

Event related synchronisation: Ereignisbezogene Synchronisation

Dutyfaktor

Bei gepulster Strahlung: Verhältnis zwischen Pulsdauer und Pause zwischen zwei Pulsen

FDD

Frequency Division Duplex: Kommunikation zwischen Basisstation und Mobiltelefon für uplink und downlink auf separaten Frequenzen

FDMA

Frequency Division Multiple Access: Bei GSM angewendete Technik, die es mehreren Nutzern erlaubt, gleichzeitig mit einer Basisstation zu kommunizieren.

FDTD

Finite Differenzen Methode: Berechnungsverfahren für numerische Berechnungen der Feldverteilung und der SAR

FM

Frequenzmodulation: Modulationsverfahren zur Aufprägung der Information auf die hochfrequente Trägerwelle

GSM

Global System for Mobile Communication: 2. Mobilfunkgeneration

hochfrequent

Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 300 GHz

ICNIRP

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

Informationsbias

Die Qualität der erhobenen Information unterscheidet sich zwischen der Untersuchungs- und der Kontrollgruppe. Ein systematischer Fehler kann beispielsweise auftreten, wenn sich die Patienten aufgrund der Auseinandersetzung mit ihrer Krankheit deutlich besser an vergangene Expositionen erinnern als Gesunde (Recall Bias).

in vivo

Bezeichnung für die Exposition eines lebenden Tieres oder Menschen

in vitro

Bezeichnung für die Exposition von Zellkulturen im Labor

Inzidenz

Häufigkeit des Auftretens einer Krankheit in einem bestimmten Zeitraum

ipsilateral

auf der gleichen Seite (z.B. Auftreten eines Tumors auf der selben Kopfseite wie das Mobiltelefon benützt wird.)

IRPA

International Radiation Protection Association

kontralateral

auf der entgegengesetzten Seite (z.B. Auftreten eines Tumors auf der dem Mobiltelefon entgegengesetzten Kopfseite)

LOAEL

Lowest observed adverse effect level: Niedrigste Dosis, bei der in toxikologischen Studien noch ein schädlicher Effekt beobachtet wurde.

Mikrowellen

hochfrequente Strahlung mit einer Frequenz von 300 MHz bis 300 GHz

NATEL C

Zelluläres Mobilfunknetz der 1. Generation

niederfrequent

Frequenzbereich bis maximal 100 kHz

NISV

Schweizerische Verordnung über den Schutz von nichtionisierender Strahlung

NMT

Analoges mobiles Telefonsystem, das vor allem in Skandinavien populär war

NOAEL

No observed adverse effect level: Höchste Dosis, bei der in toxikologischen Studien gerade kein schädlicher Effekt mehr beobachtet wird.

OMEN

Orte mit empfindlicher Nutzung. Definition gemäss NISV (Art. 3 Abs. 3):

- a) Räume in Gebäuden, in denen sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten;
- b) öffentliche oder private, raumplanungsrechtlich festgesetzte Kinderspielplätze;
- c) diejenigen Flächen von unüberbauten Grundstücken, auf denen Nutzungen nach den Buchstaben a und b zugelassen sind.

OR

Odds ratio: Mass für den Schätzwert des relativen Risikos in Fall-Kontrollstudien

OS

Ordnungsschwelle: Zeitdauer, bei der zwei kurz aufeinanderfolgende Reize gerade noch separat wahrgenommen und verarbeitet werden können

Prävalenz

Häufigkeit einer Krankheit zu einem bestimmten Zeitpunkt

Publikationsbias

Es ist möglich, dass Studien, die einen Effekt nachweisen, wahrscheinlicher publiziert werden als solche, die keinen Effekt nachweisen.

PWC

Power Control: dynamische Leistungsregelung. Automatische Regelung der Sendeleistung eines Mobiltelefons und einer Basisstation auf den für die Verbindung minimal nötigen Wert.

Radiowellen

hochfrequente Strahlung mit einer Frequenz von 100 kHz bis 300 MHz

REM

Rapid eye movement: paradoxe Schlafphase mit starker Traumaktivität

RR

Rate Ratio oder Relative Risk: Verhältnis der Raten eines bestimmten Kollektivs mit einem Referenzkollektiv (als relatives Risiko interpretierbar)

SAR

Spezifische Absorptionsrate: Mass für die Absorption von Strahlungsleistung in biologischem Gewebe (W/kg)

SAR₁₀

Lokale SAR, gemittelt über 10 g Gewebe (W/kg)

SAR₁

Lokale SAR gemittelt über 1 g Gewebe (W/kg)

Selektionsbias

Selektionsbias ist insbesondere in Fall-Kontrollstudien relevant, wenn die Auswahl von Fällen und Kontrollen in Bezug auf die Exposition systematisch unterschiedlich erfolgt. Beispiel: Eine Studie untersucht den Zusammenhang zwischen dem Gebrauch von Mobiltelefonen und dem Auftreten von Hirntumoren. Fälle werden aus dem Spital rekrutiert und Kontrollen aus dem Telefonbuch. Personen ohne Festnetzanschluss (z.B. weil sie nur mit dem Mobiltelefon telefonieren) können nicht als Kontrollen selektioniert werden, jedoch durchaus als Fälle. In diesem Fall wäre zu erwarten, dass die Gruppe der Fälle tendenziell häufiger Mobiltelefone benutzt als die Kontrollgruppe, was eine Assoziation vortäuschen kann, welche real nicht vorhanden ist (Fehler der 2. Art).

SIR

Standardized incidence rate ratio: Verhältnis der Inzidenzrate eines bestimmten Kollektivs mit der Inzidenzrate eines Referenzkollektivs unter Berücksichtigung von Alter und Geschlecht

SMR

Standardized mortality rate ratio: Verhältnis der Mortalitätsrate eines bestimmten Kollektivs mit der Mortalitätsrate eines Referenzkollektivs unter Berücksichtigung von Alter und Geschlecht

SMS

Short Message Service: Kurze Mitteilungen, die per Mobilfunktelefon versendet werden.

SP

Slow brain potential

Störgrösse

Engl: confounder. Ein Faktor, der sowohl mit der Exposition des interessierenden Agens korreliert als auch einen kausalen Risikofaktor für den untersuchten Gesundheitseffekt darstellt. Zum Beispiel beobachtet man eine statistische Assoziation zwischen dem Alkoholkonsum und dem Auftreten von Lungenkrebs. Dieser Zusammenhang ist jedoch vorgetäuscht. Er ist darauf zurückzuführen, dass häufiges Rauchen – der kausale Faktor für Lungenkrebs – mit hohem Alkoholkonsum einhergeht. Wird in der Analyse für die Störgrösse Rauchen kontrolliert, verschwindet die Assoziation zwischen Alkoholkonsum und Lungenkrebs.

TCH

Traffic channel: Verkehrskanal einer GSM-Basisstation, der bei Bedarf zugeschaltet wird.

TDMA

Time Division Multiple Access: Bei GSM angewendete Technik, die es mehreren Nutzern erlaubt, gleichzeitig mit einer Basisstation zu kommunizieren

TETRA

Bündelfunksystem für geschlossene Benutzergruppen

TETRAPOL

Bündelfunksystem für geschlossene Benutzergruppen

TDD

Time Division Duplex: Kommunikation zwischen Basisstation und Mobiltelefon wird für uplink und downlink zeitlich separiert durchgeführt.

UMTS

Universal Mobile Telecommunications System: 3. Mobilfunkgeneration

Uplink

Kommunikation vom Mobiltelefon zur Basisstation

USG

Schweizerisches Umweltschutzgesetz

WHO

World Health Organization: Weltgesundheitsorganisation

WLL

Wireless Local Loop: Drahtloser Teilnehmeranschluss

2 Literatur

- ALTPETER, E. S., KREBS, T., PFLUGER, D. H., VON KÄNEL, J., BLATTMANN, R., EMMENEGGER, D., CLOETTA, B., ROGGER, U., GERBER, H., MANZ, B., CORAY, R., BAUMANN, R., STAERK, K., GRIOT, C. and ABELIN, T. (1995): *Study on health effects of the shortwave transmitter station of Schwarzenburg, Berne, Switzerland (Major Report)*. Federal Office of Energy, Bern.
- ANDERSEN, J. B. and PEDERSEN, G. F. (1997): *The technology of mobile telephone systems relevant for risk assessment*. Radiation Protection Dosimetry, 72, 249–257.
- ANGLESIO, L., BENEDETTO, A., BONINO, A., COLLA, D., MARTIRE, F., SAUDINO FUSSETTE, S. and D'AMORE, G. (2001): *Population exposure to electromagnetic fields generated by radio base stations: evaluation of the urban background by using provisional model and instrumental measurements*. Radiat Prot Dosimetry, 97, 355-8.
- ANSI/IEEE-C95.1 (1992): *Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*. IEEE, Piscataway, NJ.
- AUVINEN, A., HIETANEN, M., LUUKKONEN, R. and KOSKELA, R. S. (2002): *Brain tumors and salivary gland cancers among cellular telephone users*. Epidemiology, 13, 356-9.
- BAG and BUWAL (Eds.) (1999): *Strahlung und Gesundheit - Mobile Telekommunikation*, EDMZ, 311.323d, Bern.
- BAKOM (2001a): *Faktenblatt GSM*. BAKOM: <http://www.bakom.ch>.
- BAKOM (2001b): *Faktenblatt UMTS*. BAKOM: <http://www.bakom.ch>.
- BALZANO, Q. (1999): *Exposure metrics for RF epidemiology: Cellular phone handsets*. Radiation Protection Dosimetry, 83, 165–169.
- BFS (2002): *Stellungnahme des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) zu DECT-Telefonen*. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Umweltmed Forsch Prax, 7, 327.
- BLETTNER, M. and SCHLEHOFER, B. (1999): *Is there an increased risk of leukemia, brain tumors or breast cancer after exposure to high-frequency radiation?* Medizinische Klinik, 94, 150–158.
- BORBELY, A. A., HUBER, R., GRAF, T., FUCHS, B., GALLMANN, E. and ACHERMANN, P. (1999): *Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram*. Neuroscience Letters, 275, 207–210.
- BORTKIEWICZ, A., GADZICKA, E. and ZMYSLONY, M. (1996): *Heart rate variability in workers exposed to medium-frequency electromagnetic fields*. Journal of the Autonomic Nervous System, 59, 91–97.
- BORTKIEWICZ, A., ZMYSLONY, M., GADZICKA, E., PALCZYNSKI, C. and SZMIGIELSKI, S. (1997): *Ambulatory ECG monitoring in workers exposed to electromagnetic fields*. Journal of Medical Engineering & Technology, 21, 41–46.
- BORTKIEWICZ, A., ZMYSLONY, M., PALCZYNSKI, C., GADZICKA, E. and SZMIGIELSKI, S. (1995): *Dysregulation of autonomic control of cardiac function in workers at AM broadcasting stations (0.738–1.503 MHz)*. Electro- and Magnetobiology, 14, 177–191.
- BOSCOLO, P., DI SCIASCIO, M. B., D'OSTILIO, S., DEL SIGNORE, A., REALE, M., CONTI, P., BAVAZZANO, P., PAGANELLI, R. and DI GIOACCHINO, M. (2001):

- Effects of electromagnetic fields produced by radiotelevision broadcasting stations on the immune system of women.* Science of the Total Environment, 273, 1–10.
- BRAUNE, S., RIEDEL, A., SCHULTE-MONTING, J. and RACZEK, J. (2002): *Influence of a radiofrequency electromagnetic field on cardiovascular and hormonal parameters of the autonomic nervous system in healthy individuals.* Radiat Res, 158, 352–6.
- BRAUNE, S., WROCKLAGE, C., RACZEK, J., GAILUS, T. and LUCKING, C. H. (1998): *Resting blood pressure increase during exposure to a radio-frequency electromagnetic field.* Lancet, 351, 1857–1858.
- BUCHBERGER, J. (1983): *Zur Gesundheitsgefährdung durch elektrische und magnetische Felder.* Illustrierte Zeitschrift für Arbeitsschutz, 8, 1–8.
- BURCH, J. B., REIF, J. S., NOONAN, C. W., ICHINOSE, T., BACHAND, A. M., KOLEBER, T. L. and YOST, M. G. (2002): *Melatonin metabolite excretion among cellular telephone users.* Int J Radiat Biol, 78, 1029–36.
- BURTON, P. R., GURRIN, L. C. and CABELL, M. J. (1998): *Clinical significance not statistical significance: a simple Bayesian alternative to p values.* Journal of Epidemiology & Community Health, 52, 318–323.
- CANO, M. I. and POLLAN, M. (2001): *Non-Hodgkin's lymphomas and occupation in Sweden.* International Archives of Occupational and Environmental Health, 74, 443–449.
- CHAGNAUD, J. L. and VEYRET, B. (1999): *In vivo exposure of rats to GSM-modulated microwaves: flow cytometry analysis of lymphocyte subpopulations and of mitogen stimulation.* International Journal of Radiation Biology, 75, 111–113.
- CHERRY, N. (2000): *A new paradigm, the physical, biological and health effects of radiofrequency/microwave radiation.* Lincoln University, Canterbury, New Zealand.
- CHIA, S. E., CHIA, H. P. and TAN, J. S. (2000a): *Health hazards of mobile phones - Prevalence of headache is increased among users in Singapore.* British Medical Journal, 321, 1155–1156.
- CHIA, S. E., CHIA, H. P. and TAN, J. S. (2000b): *Prevalence of headache among handheld cellular telephone users in Singapore: A community study.* Environmental Health Perspectives, 108, 1059–1062.
- COOPER, D., HEMMINGS, K. and SAUNDERS, P. (2001): *Re: «Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. I. Sutton Coldfield transmitter; II. All high power transmitters».* American Journal of Epidemiology, 153, 202–204.
- COX, R. A. F. and LUXON, L. M. (2000): *Cerebral symptoms from mobile telephones.* Occupational and Environmental Medicine, 57, 431–431.
- CROFT, R. J., CHANDLER, J. S., BURGESS, A. P., BARRY, R. J., WILLIAMS, J. D. and CLARKE, A. R. (2002): *Acute mobile phone operation affects neural function in humans.* Clin Neurophysiol, 113, 1623–32.
- DAENTZER, D. and BOKER, D. K. (1999): *Radiation-induced meningioma 20 years after operation and high-dose irradiation of an ependymoma.* Zentralbl Neurochir, 60, 27–32.
- DAHME, M. (1999): *Residential RF exposures.* Radiation Protection Dosimetry, 83, 113–117.
- DASDAG, S., BALCI, K., KAYA, H. and CELIK, M. S. (1999): *Hormone levels of people occupationally exposed to radiofrequencies.* Biochemical Archives, 15, 255–260.

- DAVIS, R. L. and MOSTOFI, F. K. (1993): *Cluster of testicular cancer in police officers exposed to hand-held radar*. *Am J Ind Med*, 24, 231-3.
- DE ROOS, A. J., TESCHKE, K., SAVITZ, D. A., POOLE, C., GRUFFERMAN, S., POLLOCK, B. H. and OLSHAN, A. F. (2001): *Parental occupational exposures to electromagnetic fields and radiation and the incidence of neuroblastoma in offspring*. *Epidemiology*, 12, 508–517.
- DE SEZE, R. (1998): *Epidemiology, human experiments and overexposures to assess health risk*. *Measurement & Control*, 31, 176–179.
- DE SEZE, R., AYOUB, J., PERAY, P., MIRO, L. and TOUITOU, Y. (1999): *Evaluation in humans of the effects of radiocellular telephones on the circadian patterns of melatonin secretion, a chronobiological rhythm marker*. *Journal of Pineal Research*, 27, 237–242.
- DE SEZE, R., FABBRO-PERAY, P. and MIRO, L. (1998): *GSM radiocellular telephones do not disturb the secretion of antepituitary hormones in humans*. *Bioelectromagnetics*, 19, 271–278.
- DE WAARD, D., BROOKHUIS, K. A. and HERNANDEZ-GRESS, N. (2001): *The feasibility of detecting phone-use related driver distraction*. *International Journal of Vehicle Design*, 26, 85–95.
- DEHOS, A. and WEISS, W. (2002): *Im Interesse der Verbraucher/-innen: der Vorsorgegedanke beim Schutz vor elektromagnetischen Feldern*. *Gesundheitswesen*, 64, 651–656.
- DEL SIGNORE, A., BOSCOLO, P., KOURI, S., DI MARTINO, G. and GIULIANO, G. (2000): *Combined effects of traffic and electromagnetic fields on the immune system of fertile atopic women*. *Industrial Health*, 38, 294–300.
- DIMBYLOW, P. J. and MANN, S. M. (1999): *Characterisation of energy deposition in the head from cellular phones*. *Radiation Protection Dosimetry*, 83, 139–141.
- DOLK, H., ELLIOTT, P., SHADDICK, G., WALLS, P. and THAKRAR, B. (1997a): *Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain .2. All high power transmitters*. *American Journal of Epidemiology*, 145, 10–17.
- DOLK, H., SHADDICK, G., WALLS, P., GRUNDY, C., THAKRAR, B., KLEINSCHMIDT, I. and ELLIOTT, P. (1997b): *Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain .1. Sutton Coldfield transmitter*. *American Journal of Epidemiology*, 145, 1–9.
- DREYER, N. A., LOUGHLIN, J. E. and ROTHMAN, K. J. (1999a): *Cause-specific mortality in cellular telephone users*. *Journal of the American Medical Association*, 282, 1814–1816.
- DREYER, N. A., LOUGHLIN, J. E. and ROTHMAN, K. J. (1999b): *Epidemiological safety surveillance of cellular telephones in the US*. *Radiation Protection Dosimetry*, 83, 159–163.
- EDELSTYN, N. and OLDERSHAW, A. (2002): *The acute effects of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention*. *Neuroreport*, 13, 119–121.
- ELWOOD, J. M. (1999): *A critical review of epidemiologic studies of radiofrequency exposure and human cancers*. *Environmental Health Perspectives*, 107, 155–168.
- ERMAN, M., CELIK, I. and KARS, A. (2001): *Cellular telephones and brain tumors*. *New England Journal of Medicine*, 344, 1331–1331.
- EULITZ, C., ULLSPERGER, P., FREUDE, G. and ELBERT, T. (1998): *Mobile phones modulate response patterns of human brain activity*. *Neuroreport*, 9, 3229–3232.

- FABBRO-PERAY, P., DAURES, J. P. and ROSSI, J. F. (2001): *Environmental risk factors for non-Hodgkin's lymphoma: a population-based case-control study in Languedoc-Roussillon, France*. *Cancer Causes & Control*, 12, 201–212.
- FLODIN, U., SENEBY, A. and TEGENFELDT, C. (2000): *Provocation of electric hypersensitivity under everyday conditions*. *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, 26, 93–98.
- FRENCH, P. W., PENNY, R., LAURENCE, J. A. and MCKENZIE, D. R. (2001): *Mobile phones, heat shock proteins and cancer*. *Differentiation*, 67, 93–97.
- FREUDE, G., ULLSPERGER, P., EGGERT, S. and RUPPE, F. (1998): *Effects of microwaves emitted by cellular phones on human slow brain potentials*. *Bioelectromagnetics*, 19, 384–387.
- FREUDE, G., ULLSPERGER, P., EGGERT, S. and RUPPE, I. (2000): *Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials*. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 81, 18–27.
- FREY, A. H. (1961): *Auditory system response to radio frequency energy*. *Aerosp Med*, 32, 1140–1142.
- FREY, A. H. (1998): *Headaches from cellular telephones: Are they real and what are the implications?* *Environmental Health Perspectives*, 106, 101–103.
- FREY, A. H. (2001): *Cellular telephones and brain cancer: Current research*. *Environmental Health Perspectives*, 109, A200–A200.
- FRITZER, G., GÖDER, R., FRIEGE, L., PANNIER, G. and J., W. (2000): *Kurz- und Langzeitauswirkung elektromagnetischer Hochfrequenzfelder auf die Qualität des menschlichen Schlafes und der hieraus resultierenden Tagesbefindlichkeit*. Forschungsgemeinschaft Funk, Bonn, <http://www.fgf.de>.
- FRÖHLICH, J., CHAVANNES, N. and KUSTER, N. (2002a): *Ratio of spatial peak and whole body SAR dependent on frequency and polarization in animals and humans*. In *Proceedings of the 27th General Assembly of the International Union of Radio Science*, Maastricht, Netherlands., 1897.
- FRÖHLICH, J., CHAVANNES, N. and KUSTER, N. (2002b): *Rigorous analysis of EM absorption in high resolution anatomical models using FDTD*. In *Proceedings of AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Antonio, TX, USA, 50.
- FUCIC, A., GARAJ-VRHOVAC, V., SKARA, M. and DIMITROVIC, B. (1992): *X-Rays, microwaves and vinyl chloride monomer: their clastogenic and aneugenic activity, using the micronucleus assay on human lymphocytes*. *Mutation Research*, 282, 265–271.
- FUSE, T., MATSUNAGA, K., SHIDOJI, K., MATSUKI, Y. and UMEZAKI, K. (2001): *The cause of traffic accidents when drivers use car phones and the functional requirements of car phones for safe driving*. *International Journal of Vehicle Design*, 26, 48–56.
- GANDHI, O. P., LAZZI, G., TINNISWOOD, A. and YU, Q. S. (1999): *Comparison of numerical and experimental methods for determination of SAR and radiation patterns of handheld wireless telephones*. *Bioelectromagnetics*, 93–101.
- GANDHI, O. P., LI, Q. X. and KANG, G. (2001): *Temperature rise for the human head for cellular telephones and for peak SARs prescribed in safety guidelines*. *IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques*, 49, 1607–1613.

- GARSON, O. M., MCROBERT, T. L., CAMPBELL, L. J., HOCKING, B. A. and GORDON, I. (1991): *A chromosomal study of workers with long-term exposure to radio-frequency radiation*. *Med J Aust*, 155, 289–92.
- GLASER, R. (1998): *Elektromagnetismus und Leben*. *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 51, 50–57.
- GODWARD, S., SANDHU, M., SKINNER, J. and MCCANN, J. (2001): *Re: Cellular telephones and cancer - a nationwide cohort study in Denmark*. *Journal of the National Cancer Institute*, 93, 878–878.
- GOLDSMITH, J. R. (1997a): *Epidemiologic evidence relevant to radar (microwave) effects*. *Environmental Health Perspectives*, 105, 1579–1587.
- GOLDSMITH, J. R. (1997b): *TV broadcast towers and cancer: The end of innocence for radiofrequency exposures*. *American Journal of Industrial Medicine*, 32, 689–692.
- GRAHAM, R. and CARTER, C. (2001): *Voice dialling can reduce the interference between concurrent tasks of driving and phoning*. *International Journal of Vehicle Design*, 26, 30–47.
- GRAJEWSKI, B., COX, C., SCHRADER, S. M., MURRAY, W. E., EDWARDS, R. M., TURNER, T. W., SMITH, J. M., SHEKAR, S. S., EVENSON, D. P., SIMON, S. D. and CONOVER, D. L. (2000): *Semen quality and hormone levels among radiofrequency heater operators*. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 42, 993–1005.
- GRAYSON, J. K. (1996): *Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force: a nested case-control study*. *American Journal of Epidemiology*, 143, 480–486.
- GUBERAN, E., CAMPANA, A., FAVAL, P., GUBERAN, M., SWEETNAM, P. M., TUYN, J. W. and USEL, M. (1994): *Gender ratio of offspring and exposure to shortwave radiation among female physiotherapists*. *Scand J Work Environ Health*, 20, 345–8.
- HABERLAND, L. (1999): *Hypothesen zu zellulären, nichtthermischen Wirkungsmechanismen elektromagnetischer Felder*, Verlag für Wissenschaft und Forschung, Berlin.
- HALLBERG, O. and JOHANSSON, O. (2002): *Melanoma incidence and frequency modulation (FM) broadcasting*. *Arch Environ Health*, 57, 32–40.
- HAMBLIN, D. L. and WOOD, A. W. (2002): *Effects of mobile phone emissions on human brain activity and sleep variables*. *Int J Radiat Biol*, 78, 659–69.
- HARDELL, L., HALLQUIST, A., MILD, H. K., CARLBERG, M., PAHLSON, A. and LILJA, A. (2002a): *Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumors*. *European Journal of Cancer Prevention*, 11, 377–86.
- HARDELL, L., MILD, H. K. and CARLBERG, M. (2002b): *Case-control study on the use of cellular and cordless phones and the risk for malignant brain tumours*. *Int J Radiat Biol*, 78, 931–936.
- HARDELL, L. and MILD, K. H. (2001): *Handheld cellular telephones and brain cancer risk*. *JAMA-Journal of the American Medical Association*, 285, 1838.
- HARDELL, L., NASMAN, A., PAHLSON, A. and HALLQUIST, A. (2000): *Case-control study on radiology work, medical x-ray investigations, and use of cellular telephones as risk factors for brain tumors*. *Medscape*: <http://www.medscape.com/Medscape/GeneralMedicine/journal/2000/v02.n03/mgm0504.hard/pnt-mgm0504.hard.html>.

- HARDELL, L., NASMAN, A., PAHLSON, A., HALLQUIST, A. and MILD, K. H. (1999): *Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: A case-control study*. International Journal of Oncology, 15, 113–116.
- HAYES, R. B., BROWN, L. M., POTTERN, L. M., GOMEZ, M., KARDAUN, J. W., HOOVER, R. N., O'CONNELL, K. J., SUTZMAN, R. E. and JAVADPOUR, N. (1990): *Occupation and risk for testicular cancer: a case-control study*. Int J Epidemiol, 19, 825–31.
- HENNIES, K., NEITZKE, H.-P. and VOIGT, H. (2000): *Mobilfunk und Gesundheit*. ECOLOG-Institut, Hannover.
- HIETANEN, M., KOVALA, T. and HAMALAINEN, A. M. (2000): *Human brain activity during exposure to radiofrequency fields emitted by cellular phones*. Scandinavian Journal of Work Environment & Health, 26, 87–92.
- HILL, A. B. (1965): *The environment and disease: association or causation*. Proceedings of the Royal Society of Medicine, 58, 295–300.
- HLADKY, A., MUSIL, J., ROTH, Z., URBAN, P. and BLAZKOVA, V. (1999): *Acute effects of using a mobile phone on CNS functions*. Cent Eur J Public Health, 7, 165-7.
- HOCKING, B. (1998): *Symptoms associated with mobile phone use*. Occupational Medicine-London, 48, 357-360.
- HOCKING, B. (1999): *Comments on «A critical review of epidemiologic studies of radiofrequency exposure and human cancers»*. Environ Health Perspect, 107, A596-7.
- HOCKING, B. (2001): *Re: Cellular telephones and cancer – a nationwide cohort study in Denmark*. Journal of the National Cancer Institute, 93, 877–878.
- HOCKING, B., GORDON, I. R., GRAIN, H. L. and HATFIELD, G. E. (1996): *Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers*. Medical Journal of Australia, 165, 601–605.
- HOCKING, B. and WESTERMAN, R. (2000): *Neurological abnormalities associated with mobile phone use*. Occupational Medicine-Oxford, 50, 366–368.
- HOCKING, B. and WESTERMAN, R. (2001): *Neurological abnormalities associated with CDMA exposure*. Occupational Medicine-Oxford, 51, 410–413.
- HUBER, R., GRAF, T., COTE, K. A., WITTMANN, L., GALLMANN, E., MATTER, D., SCHUDERER, J., KUSTER, N., BORBELY, A. A. and ACHERMANN, P. (2000): *Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG*. Neuroreport, 11, 3321–3325.
- HUBER, R., TREYER, V., BORBELY, A. A., SCHUDERER, J., GOTTSSELIG, J. M., LANDOLT, H. P., WERTH, E., BERTHOLD, T., KUSTER, N., BUCK, A. and ACHERMANN, P. (2002): *Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG*. J Sleep Res, 11, 289–295.
- HUTTER, H., MOSHAMMER, H., WALLNER, P., KUNDI, M. (2000): *Diskussion von Richtwerten für den Mobilfunk am Beispiel der Resolution des Bürgerforums ‚Elektrosmog‘*. Umweltmed Forsch Prax, 5, 170–172.
- HUTTER, H.-P., MOSHAMMER, H. and KUNDI, M. (2002): *Mobile telephone base-stations: effects on health and wellbeing*. In Biological Effects of EMFs, Vol. 2 (Ed, P., K.) <http://www.telecomlab.gr/2002/oct/rhodes/pap3rs/rhodes02.html>, Rhodes, 344–652.
- HYLAND, G. J. (2000): *Physics and biology of mobile telephony*. Lancet, 356, 1833–1836.

- ICNIRP (1996): *Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters*. Health Physics, 70, 587–593.
- ICNIRP (1998): *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. Health Physics, 74, 494–522.
- INSKIP, P. D. (2001): *Frequent radiation exposures and frequency-dependent effects: the eyes have it*. Epidemiology, 12, 1–4.
- INSKIP, P. D., TARONE, R. E., HATCH, E. E., WILCOSKY, T. C., SHAPIRO, W. R., SELKER, R. G., FINE, H. A., BLACK, P. M., LOEFFLER, J. S. and LINET, M. S. (2001): *Cellular-telephone use and brain tumors*. New England Journal of Medicine, 344, 79–86.
- JECH, R., SONKA, K., RUZICKA, E., NEBUZELSKY, A., BOHM, J., JUKLICKOVA, M. and NEVSIMALOVA, S. (2001): *Electromagnetic field of mobile phones affects visual event related potential in patients with narcolepsy*. Bioelectromagnetics, 22, 519–528.
- JOHANSEN, C., BOICE, J. D., JR., MCLAUGHLIN, J. K., CHRISTENSEN, H. C. and OLSEN, J. H. (2002): *Mobile phones and malignant melanoma of the eye*. Br J Cancer, 86, 348–9.
- JOHANSEN, C., BOICE, J. D., MCLAUGHLIN, J. K. and OLSEN, J. H. (2001): *Cellular telephones and cancer – A nationwide cohort study in Denmark*. Journal of the National Cancer Institute, 93, 203–207.
- KAINZ, W., NEUBAUER, G., ALESCH, F., SCHMID, G. and JAHN, O. (2001): *Electromagnetic compatibility of electronic implants – review of the literature*. Wien Klin Wochenschr, 113, 903–14.
- KAISER, F. (1996): *External signals and internal oscillation dynamics: Biophysical aspects and modelling approaches for interactions of weak electromagnetic fields at the cellular level*. Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 41, 3–18.
- KALLEN, B., MALMQUIST, G. and MORITZ, U. (1982): *Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: is non-ionizing radiation a fetal hazard?* Arch Environ Health, 37, 81–5.
- KANE, R. C. (2001): *Handheld cellular telephones and brain cancer risk*. JAMA-Journal of the American Medical Association, 285, 1838–1838.
- KARUS, M., NIESSEN, P., BATHOW, M. (2002): *Elektrosmog durch schnurlose DECT-Telefone*. ElektrosmogReport, 8, 1–2.
- KHEIFETS, L. I., AFIFI, A. A., BUFFLER, P. A. and ZHANG, Z. W. (1995): *Occupational electric and magnetic field exposure and brain cancer: a meta-analysis*. J Occup Environ Med, 37, 1327–41.
- KING, R. W. P. (2000): *Electric currents and fields induced in cells in the human brain by radiation from hand-held cellular telephones*. Journal of Applied Physics, 87, 893–900.
- KLAUS, G. (2002): *Messkampagne NIS-Immissionen im HF-Bereich*. Lufthygieneamt beider Basel, Liestal.
- KLEINSTEIN, B. H., GOLDBERG, R. B., COLLIER, M. N. and MILANO, P. J. (Eds.) *Biological effects of nonionizing electromagnetic radiation*, Information Ventures Inc., Philadelphia.
- KOIVISTO, M., HAARALA, C., KRAUSE, C. M., REVONSUO, A., LAINE, M. and HAMALAINEN, H. (2001): *GSM phone signal does not produce subjective symptoms*. Bioelectromagnetics, 22, 212–215.

- KOIVISTO, M., KRAUSE, C. M., REVONSUO, A., LAINE, M. and HAMALAINEN, H. (2000a): *The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory*. Neuroreport, 11, 1641–1643.
- KOIVISTO, M., REVONSUO, A., KRAUSE, C., HAARALA, C., SILLANMAKI, L., LAINE, M. and HAMALAINEN, H. (2000b): *Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans*. Neuroreport, 11, 413–415.
- KOMPIS, M., NEGRI, S. and HAUSLER, R. (2000): *Electromagnetic interference of bone-anchored hearing aids by cellular phones*. Acta Oto-Laryngologica, 120, 855–859.
- KRAUSE, C. M., SILLANMAKI, L., KOIVISTO, M., HAGGQVIST, A., SAARELA, C., REVONSUO, A., LAINE, M. and HAMALAINEN, H. (2000): *Effects of electromagnetic fields emitted by cellular phones on the electroencephalogram during a visual working memory task*. International Journal of Radiation Biology, 76, 1659–1667.
- KUNDI, M. and HUTTER, H. P. (2001): *Grenzwertermittlung bei hochfrequenten Feldern*. Sichere Arbeit, 2, 35–40.
- KURT, T. L. (1988): Re: «*Increased mortality in amateur radio operators due to lymphatic and hematopoietic malignancies*». Am J Epidemiol, 128, 1384-5.
- LALIC, H., LEKIC, A. and RADOSEVIC-STASIC, B. (2001): *Comparison of chromosome aberrations in peripheral blood lymphocytes from people occupationally exposed to ionizing and radiofrequency radiation*. Acta Medica Okayama, 55, 117–127.
- LARSEN, A. I. (1991): *Congenital malformations and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among Danish physiotherapists*. Scand J Work Environ Health, 17, 318–23.
- LEBEDEVA, N. N., SULIMOV, A. V., SULIMOVA, O. P., KOROTKOVSKAYA, T. I. and GAILUS, T. (2001): *Investigation of brain potentials in sleeping humans exposed to the electromagnetic field of mobile phones*. Critical Reviews in Biomedical Engineering, 29, 125–133.
- LEBEDEVA, N. N., SULIMOV, A. V., SULIMOVA, O. P., KOTROVSKAYA, T. I. and GAILUS, T. (2000): *Cellular phone electromagnetic field effects on bioelectric activity of human brain*. Critical Reviews in Biomedical Engineering, 28, 323–337.
- LEE, T. M. C., HO, S. M. Y., TSANG, L. Y. H., YANG, S. Y. C., LI, L. S. W. and CHAN, C. C. H. (2001): *Effect on human attention of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones*. Neuroreport, 12, 729–731.
- LERCHL, A. (1997): *Die Melatonin-Hypothese. Eine Einführung*. Forschungsgemeinschaft Funk, Bonn.
- LERMAN, Y., JACUBOVICH, R. and GREEN, M. S. (2001): *Pregnancy outcome following exposure to shortwaves among female physiotherapists in Israel*. Am J Ind Med, 39, 499–504.
- LIN, J. C. (1999): *Cellular telephones and their effect on the human brain*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 41, 132–133.
- LIN, J. C. (2001): *Hearing microwaves: The microwave auditory phenomenon*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 43, 166–168.
- LINDE, T. and MILD, H. (1997): *Measurement of low frequency magnetic fields from digital cellular telephones*. Bioelectromagnetics, 18.
- MAES, A., COLLIER, M., SLAETS, D. and VERSCHAEVE, L. (1995): *Cytogenetic Effects of Microwaves From Mobile Communication Frequencies (954 MHz)*. Electro- and Magnetobiology, 14, 91–98.

- MAIER, R. (2001): *Do pulsed electromagnetic fields impair CNS activity?* Biomedizinische Technik, 46, 18–23.
- MANN, K. and RÖSCHKE, J. (1996): *Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on human sleep.* Neuropsychobiology, 33, 41–47.
- MANN, K., WAGNER, P., BRUNN, G., HASSAN, F., HIEMKE, C. and RÖSCHKE, J. (1998): *Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on the neuroendocrine system.* Neuroendocrinology, 67, 139–144.
- MANTIPLY, E. D., POHL, K. R., POPPELL, S. W. and MURPHY, J. A. (1997): *Summary of measured radiofrequency electric and magnetic fields (10 kHz to 30 GHz) in the general and work environment.* Bioelectromagnetics, 18, 563–577.
- MASKARINEC, G., COOPER, J. and SWYGERT, L. (1994): *Investigation of increased incidence in childhood leukemia near radio towers in Hawaii: preliminary observations.* J Environ Pathol Toxicol Oncol, 13, 33–7.
- MCKENZIE, D. R., YIN, Y. and MORRELL, S. (1998): *Childhood incidence of acute lymphoblastic leukaemia and exposure to broadcast radiation in Sydney – a second look.* Aust N Z J Public Health, 22, 360–7.
- MCCMAHAN, S., ERICSON, J. and MEYER, J. (1994): *Depressive symptomatology in women and residential proximity to high-voltage transmission lines.* Am J Epidemiol, 139, 58–63.
- MEISTER A., EGGERT S., RICHTER J. and I., R. (1989): *Die Wirkung eines höchstfrequenten elektromagnetischen Feldes (2.45 GHz) auf Wahrnehmungsprozesse, psychische Leistung und Befinden.* Zentralblatt gesamte Hygiene, 35, 203–205.
- MICHELOZZI, P., CAPON, A., KIRCHMAYER, U., FORASTIERE, F., BIGGERI, A., BARCA, A. and PERUCCI, C. A. (2002): *Adult and Childhood Leukemia near a High-Power Radio Station in Rome, Italy.* Am J Epidemiol, 155, 1096–103.
- MILHAM, S. (1988a): *Increased Mortality in Amateur Radio Operators Due to Lymphatic and Hematopoietic Malignancies – Reply.* Am J Epidemiol, 128, 1384–1385.
- MILHAM, S., JR. (1988b): *Increased mortality in amateur radio operators due to lymphatic and hematopoietic malignancies.* Am J Epidemiol, 127, 50–4.
- MILHAM, S., JR. (1988c): *Mortality by license class in amateur radio operators.* Am J Epidemiol, 128, 1175–6.
- MORGAN, R. W., KELSH, M. A., ZHAO, K., EXUZIDES, K. A., HERINGER, S. and NEGRETE, W. (2000): *Radiofrequency exposure and mortality from cancer of the brain and lymphatic/hematopoietic systems.* Epidemiology, 11, 118–127.
- MOSHAMMER, H. (1998): *Hochfrequente elektromagnetische Felder zum Zwecke der Mobilkommunikation.* Arzt und Umwelt, 11, 135–138.
- MOULDER, J. E., ERDREICH, L. S., MALYAPA, R. S., MERRITT, J., PICKARD, W. F. and VIJAYALAXMI (1999): *Cell phones and cancer: What is the evidence for a connection?* Radiation Research, 151, 513–531.
- MUELLER, C. H., KRUEGER, H. and SCHIERZ, C. (2002): *Project NEMESIS: Perception of a 50 Hz electric and magnetic field at low intensities (laboratory experiment).* Bioelectromagnetics, 23, 26–36.
- MUSCAT, J. E., MALKIN, M. C., THOMPSON, S., SHORE, R. E., STELLMAN, S. D., MCREE, D., NEUGUT, A. I. and WYNNDER, E. L. (2000): *Handheld cellular telephone use and risk of brain cancer.* JAMA-Journal of the American Medical Association, 284, 3001–3007.

- MUSCAT, J. E., MALKIN, M. G., SHORE, R. E., THOMPSON, S., NEUGUT, A. I., STELLMAN, S. D. and BRUCE, J. (2002): *Handheld cellular telephones and risk of acoustic neuroma*. *Neurology*, 58, 1304-6.
- NELSON, N. J. (2001): *Recent studies show cell phone use is not associated with increased cancer risk*. *Journal of the National Cancer Institute*, 93, 170–172.
- OBERFELD, G., KUNDI, M., GRIGORIEV, Y., HAMNERIUS, Y, CURRY, BP., SAGE, C., BLACKMAN, CF., MARINELLI, F., MOSGÖLLER, W., CHERRY, N., SANDSTRÖM, M., SZMGIELSKI, S., SOBICZEWSKA, E., ALTPETER, E., CHIANG, H., GIULIANI, L., MACFARLANE, R., MACGARVIN, M., IRVINE, H, RAMSAY, C, SLESIN, L (2000): *Internationale Konferenz - Situierung von Mobilfunksendern*. In Land Salzburg, Landessanitätsdirektion, Salzburg, (Ed, Oberfeld, G.) Salzburg.
- OFTEDAL, G., WILEN, J., SANDSTROM, M. and MILD, K. H. (2000): *Symptoms experienced in connection with mobile phone use*. *Occup Med Lond*, 50, 237–45.
- OUELLET-HELLSTROM, R. and STEWART, W. F. (1993): *Miscarriages among female physical therapists who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation*. *Am J Epidemiol*, 138, 775–86.
- PEDERSEN, G. F. and ANDERSEN, J. B. (1999): *RF and ELF exposure from cellular phone handsets: TDMA and CDMA systems*. *Radiation Protection Dosimetry*, 83, 131–138.
- PETRIDES, M. (2001): *Use of cellular telephones and performance on tests of attention*. *Neuroreport*, 12, A21–A21.
- PREECE, A. W., IWI, G., DAVIES-SMITH, A., WESNES, K., BUTLER, S., LIM, E. and VAREY, A. (1999): *Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man*. *International Journal of Radiation Biology*, 75, 447–456.
- RADON, K. and MASCHKE, C. (1998): *Gibt es Elektrosensibilität im D-Netzbereich?* *Umweltmed Forsch Prax*, 3, 125–129.
- RADON, K., PARERA, D., ROSE, D. M., JUNG, D. and VOLLRATH, L. (2001): *No effects of pulsed radio frequency electromagnetic fields on melatonin, cortisol, and selected markers of the immune system in man*. *Bioelectromagnetics*, 22, 280–287.
- RAMSDALE, P. A. and WIENER, A. (1999): *Cellular phone base stations: Technology and exposures*. *Radiation Protection Dosimetry*, 83, 125–130.
- REA, W. J., FENYVES, E. J., SUJISAWA, I., SUYAMA, H., SAMADI, N. and ROSS, G. (1991): *Electromagnetic Field Sensitivity*. *J Bioelectricity*, 10, 241–256.
- REDELMEIER, D. A. and TIBSHIRANI, R. J. (1997): *Association between cellular-telephone calls and motor vehicle collisions*. *The New England Journal of Medicine*, 336, 453–458.
- REDELMEIER, D. A. and TIBSHIRANI, R. J. (2001): *Car phones and car crashes: some popular misconceptions*. *Canadian Medical Association Journal*, 164, 1581–1582.
- REISER, H., DIMPFEL, W. and SCHÖBER, F. (1995): *The influence of electromagnetic fields on human brain activity*. *Eur J Med Res*, 1, 27–32.
- REPACHOLI, M. H. (1998): *Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: Health effects and research needs*. *Bioelectromagnetics*, 19, 1–19.
- REPACHOLI, M. H. (2001): *Health risks from the use of mobile phones*. *Toxicology Letters*, 120, 323–331.
- REPACHOLI, M. H. and CARDIS, E. (1997): *Criteria for EMF health risk assessment*. *Radiation Protection Dosimetry*, 72, 305–312.

- RKI (2002): *Einsatz immunologischer Untersuchungsverfahren in der Umweltmedizin - Eine Einführung*. Kommission ‚Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin‘ am Robert Koch-Institut (RKI). *Umweltmed Forsch Prax*, 7, 351–355.
- ROBINETTE, C. D., SILVERMAN, C. and JABLON, S. (1980): *Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar)*. *Am J Epidemiol*, 112, 39–53.
- RÖÖSLI, M., MOSER, M., MEIER, M. and BRAUN-FAHRLÄNDER, C. (2002a): Health symptoms associated with electromagnetic radiation - a questionnaire survey. In *Biological Effects of EMFs*, Vol. 2 (Ed, P., K.) <http://www.telecomlab.gr/2002/oct/rhodes/pap3rs/rhodes02.html>, Rhodes, 670–677.
- RÖÖSLI, M., WANNER, M. and BRAUN-FAHRLÄNDER, C. (2002b): *Comparison of measurements and calculations of electromagnetic radiation from GSM mobile phone base stations*. *Epidemiology*, 13 (4), S196.
- RÖSCHKE, J. and MANN, K. (1997): *No short-term effects of digital mobile radio telephone on the awake human electroencephalogram*. *Bioelectromagnetics*, 18, 172–176.
- ROTHMAN, K. J. (1986): *Modern Epidemiology*, Little, Brown and Company, Boston, MA.
- ROTHMAN, K. J. (2000): *Epidemiological evidence on health risks of cellular telephones*. *Lancet*, 356, 1837–1840.
- ROTHMAN, K. J. and GREENLAND, S. (1998): *Modern Epidemiology*, Little, Brown and Company, Boston, MA.
- ROTHMAN, K. J., LOUGHLIN, J. E., FUNCH, D. P. and DREYER, N. A. (1996): *Overall mortality of cellular telephone customers*. *Epidemiology*, 7, 303–305.
- SAGBERG, F. (2001): *Accident risk of car drivers during mobile telephone use*. *International Journal of Vehicle Design*, 26, 57–69.
- Salvatore, J. R. (1993): *RADAR GUNS*. *J NATL CANCER INST*, 85, 67-8.
- SANDSTROM, M., WILEN, J., OFTEDAL, G. and MILD, K. H. (2001): *Mobile phone use and subjective symptoms. Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones*. *Occupational Medicine-Oxford*, 51, 25–35.
- SANTINI, R., SANTINI, P., DANZE, J. M., LE RUZ, P. and SEIGNE, M. (2002): *Enquête sur la santé de riverains de stations relais de téléphonie mobile : I/Incidences de la distance et du sexe*. *Pathol Biol (Paris)*, 50, 369–73.
- SANTINI, R., SANTINI P., SEIGNE, M., DANZE J.M. (2001a): *Symptomes exprimés par des riverains de station relais de téléphonie mobile*. *La Presse Medicale*, 30, 1594.
- SANTINI, R., SEIGNE, M., BONHOMME-FAIVRE, L., BOUFFET, S., DEFASNE, E. and SAGE, M. (2001b): *Symptoms experienced by users of digital cellular phones*. *Pathologie Biologie*, 49, 222–226.
- SCHILLING, C. J. (1997): *Effects of acute exposure to ultrahigh radiofrequency radiation on three antenna engineers*. *Occupational and Environmental Medicine*, 54, 281–284.
- SCHÜZ, J. and MANN, S. (2000): *A discussion of potential exposure metrics for use in epidemiological studies on human exposure to radiowaves from mobile phone base stations*. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 10, 600–605.

- SELVIN, S., SCHULMAN, J. and MERRILL, D. W. (1992): *Distance and risk measures for the analysis of spatial data: a study of childhood cancers*. Soc Sci Med, 34, 769–77.
- SILNY, J. (1999): *Electrical hypersensitivity in humans – Fact or fiction?* Zentralblatt für Hygiene und Umweltmedizin, 202, 219–233.
- SILVI, A. M., ZARI, A. and LICITRA, G. (2001): *Assessment of the temporal trend of the exposure of people to electromagnetic fields produced by base stations for mobile telephones*. Radiation Protection Dosimetry, 97, 387–390.
- STANG, A., ANASTASSIOU, G., AHRENS, W., BROMEN, K., BORNFELD, N. and JOCKEL, K. H. (2001): *The possible role of radiofrequency radiation in the development of uveal melanoma*. Epidemiology, 12, 7–12.
- STEVENS, R. G. (1987): *Electric power use and breast cancer: a hypothesis*. Am J Epidemiol, 125, 556–61.
- SZMIGIELSKI, S. (1996): *Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation*. Science of the Total Environment, 180, 9–17.
- TASKINEN, H., KYRONEN, P. and HEMMINKI, K. (1990): *Effects of ultrasound, shortwaves, and physical exertion on pregnancy outcome in physiotherapists*. J Epidemiol Community Health, 44, 196–201.
- TUSCHL, H., NEUBAUER, G., GARN, H., K., D., WINKER, N. and BRUSL, H. (1999): *Occupational exposure to high frequency electromagnetic fields and its effect on human immune parameters*. Int J Occup Med Environ Health, 12, 239–251.
- TYNES, T., HANNEVIK, M., ANDERSEN, A., VISTNES, A. I. and HALDORSEN, T. (1996): *Incidence of breast cancer in Norwegian female radio and telegraph operators*. Cancer Causes & Control, 7, 197–204.
- UNEP, U. N. E. P., WHO, W. H. C. and IRPA, I. R. P. A. (1981): *Radiofrequency and microwaves*. World Health Organization, Genf.
- URBAN, P., LUKAS, E. and ROTH, Z. (1998): *Does acute exposure to the electromagnetic field emitted by a mobile phone influence visual evoked potentials? A pilot study*. Cent Eur J Public Health, 6, 288–290.
- VAN WIJNGAARDEN, E., SAVITZ, D. A., KLECKNER, R. C., CAI, J. and LOOMIS, D. (2000): *Exposure to electromagnetic fields and suicide among electric utility workers: a nested case-control study*. Western Journal of Medicine, 173, 94–100.
- VANGELOVA, K., ISRAEL, M. and MIHAYLOV, S. (2002): *The effect of low level radiofrequency electromagnetic radiation on the excretion rates of stress hormones in operators during 24-hour shifts*. Cent Eur J Public Health, 10, 24–8.
- VERKASALO, P. K., KAPRIO, J., VARJONEN, J., ROMANOV, K., HEIKKILA, K. and KOSKENVUO, M. (1997): *Magnetic fields of transmission lines and depression*. Am J Epidemiol, 146, 1037–45.
- VEYRET, B., BOUTHET, C., DESCHAUX, P., DESEZE, R., GEFFARD, M., JOUSSOTDUBIEN, J., LEDIRAISON, M., MOREAU, J. M. and CARISTAN, A. (1991): *Antibody-Responses of Mice Exposed to Low-Power Microwaves Under Combined, Pulse-and-Amplitude Modulation*. Bioelectromagnetics, 12, 47–56.
- VOGEL, T. (2001): *Neue Handys: Immer raffinierter, immer strahlender*. Ktipp, 6, 18–21.
- VOLKERS, N. (1992): *Speed kills – but what about radar guns?* J Natl Cancer Inst, 84, 1310-1.

- VON KLITZING, L. (1995): *Low-frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man*. *Physica Medica*, 11, 77–80.
- WAGNER, P., RÖSCHKE, J., MANN, K., FELL, J., HILLER, W., FRANK, C. and GROZINGER, M. (2000): *Human sleep EEG under the influence of pulsed radio frequency electromagnetic fields – Results from polysomnographies using submaximal high power flux densities*. *Neuropsychobiology*, 42, 207–212.
- WAGNER, P., RÖSCHKE, J., MANN, K., HILLER, W. and FRANK, C. (1998): *Human sleep under the influence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: A polysomnographic study using standardized conditions*. *Bioelectromagnetics*, 19, 199–202.
- WANNER, M. (2001): *Hochfrequenzstrahlung und Mobilfunkbasisstationen*. In Institute of Social and Preventive Medicine, Basel.
- WIART, J., DALE, C., BOSISIO, A. V. and LE CORNEC, A. (2000): *Analysis of the influence of the power control and discontinuous transmission on RF exposure with GSM mobile phones*. *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, 42, 376–385.
- WILSON, B. W. (1988): *Chronic exposure to ELF fields may induce depression*. *Bioelectromagnetics*, 9, 195–205.
- ZINK, C. (Ed.) (1990): *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch*, de Gruyter, Berlin.