

22
07

> Hochfrequente Strahlung und Gesundheit

*Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich.
Stand: September 2006*



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

22
07

> Hochfrequente Strahlung und Gesundheit

*Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich.
Stand: September 2006*

*2. aktualisierte Auflage der Umwelt-Materialien Nr. 162 des BUWAL von 2003
inkl. Nachtrag von 2004*

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

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Kapitel 1 und 2 (Humanstudien): Dr. med. Kerstin Hug, Dr. med. Regula Rapp, Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel.

Institutsleitung: Prof. Dr. med. Charlotte Braun-Fahrlander (ad interim)

Kapitel 3 (Tier- und Zelleexperimente): Dr. phil. nat. Nicole Taschner, Abteilung Luftreinhaltung und NIS, BAFU, Bern.

Supervision: Prof. Dr. phil. nat. Primo Schär, Zentrum für Biomedizin der Universität Basel.

Begleitung BAFU

Dr. phil. nat. Jürg Baumann, Abteilung Luftreinhaltung und NIS

Zitiervorschlag

Hug K., Rapp R., Schär P., Taschner N. 2006: Hochfrequente Strahlung und Gesundheit. Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich. Umwelt-Wissen Nr. 0722. Bundesamt für Umwelt, Bern. 163 S.

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfoto

Nicole Taschner, BAFU

Download PDF

www.umwelt-schweiz.ch/uw-0722-D

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

Code: UW-0722-D

© BAFU 2007

> Inhalt

Abstracts	5
Vorwort	7
Zusammenfassung	8
Résumé	17
Riassunto	26
Summary	35
Einleitung	44

1	Methodik	46
1.1	Kriterien für die Auswahl der Humanstudien	46
1.2	Kriterien für die Bewertung der Humanstudien	47

2	Auswirkungen auf den Menschen	49
2.1	Struktur des Ergebnisteils	49
2.2	Physiologische Wirkungen	51
2.2.1	Hormonsystem	51
2.2.2	Gehirnphysiologie: Hirnströme, ereignisbezogene Potenziale, zerebrale Durchblutung	55
2.2.3	Kognitive Funktionen	67
2.2.4	Gehör und Gleichgewichtsorgan	79
2.2.5	Herz-/Kreislauffunktionen, Thermoregulation, Hautdurchblutung	85
2.3	Wirkungen auf das Befinden	93
2.3.1	Elektrosensitivität (= Feldwahrnehmung)	93
2.3.2	Unspezifische Symptome, elektromagnetische Hypersensibilität	94
2.3.3	Schlaf (Phasen und Qualität)	106
2.4	Kanzerogene Wirkungen	110
2.4.1	Gentoxizität	110
2.4.2	Leukämien, maligne Lymphome	112
2.4.3	Tumore des Zentralnervensystems	118
2.4.4	Augentumore	128
2.4.5	Studien über weitere Tumorarten	129
2.4.6	Studien über Krebs allgemein und Zusammenfassung mehrerer Tumorarten	131
2.5	Nichtkanzerogene Wirkungen	134
2.5.1	Fertilität und Auswirkungen auf die Nachkommen	134

3	Forschungsprogramme «Perform B» und «REFLEX»	137
3.1	Einleitung	137
3.2	Perform B	138
3.2.1	Gentoxizität	139
3.2.2	Das ODC-Enzym und dessen Aktivität in Zellkulturen	140
3.2.3	Die Gedächtnisleistung von Nagern	141
3.2.4	Gesamtbewertung «Perform B»	142
3.3	REFLEX	143
3.3.1	Gentoxizität	143
3.3.2	Zellwachstum und Zelldifferenzierung	145
3.3.3	Apoptose	146
3.3.4	Genexpression	146
3.3.5	Gesamtbewertung REFLEX	148

Anhang	150
Überblick über Grössen, Einheiten und Umrechnungen im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern	150

Verzeichnisse	151
Abkürzungen/Glossar	151
Tabellen	155
Literatur zu Kapitel 2	155
Literatur zu Kapitel 3	162

> Abstracts

This document updates the assessment of the health effects of high frequency radiation based on research findings published in the period from the end of 2002 to September 2006. It primarily takes account of studies that were carried out directly on human beings. The scientific literature in the period concerned focused mainly on exposure to radiation from mobile phones. In addition, this report presents and evaluates the findings from the Perform B and REFLEX research programmes, which studied the behaviour of cells and animals. The new findings have considerably broadened the range of scientific data, but have not resulted in any greater clarity. No significant health effects were identified that can now be regarded as scientifically established, and this means that, from a scientific point of view, there is no immediate need for an adjustment of the exposure limit values. However, many questions remain unanswered regarding the non-thermal effects of high-frequency radiation in terms of reliability of evidence as well as potential harm to health.

Im vorliegenden Synthesebericht wird die Bewertung der gesundheitlichen Auswirkungen von hochfrequenter Strahlung aktualisiert, gestützt auf die von Ende 2002 bis September 2006 publizierten Forschungsergebnisse. Berücksichtigt sind in erster Linie Untersuchungen, die direkt am Menschen durchgeführt wurden, wobei in der wissenschaftlichen Literatur der Berichtsperiode die Exposition durch Mobiltelefone im Vordergrund stand. In Ergänzung dazu werden auch die Ergebnisse der beiden Forschungsprogramme Perform B und REFLEX, welche sich mit dem Verhalten von Zellen und Tieren befassten, vorgestellt und bewertet. Die wissenschaftliche Datenlage ist durch die neuen Forschungsergebnisse noch vielfältiger, jedoch nicht deutlicher geworden. Es wurden keine gesundheitlich bedeutsamen Effekte identifiziert, die neu als wissenschaftlich gesichert gelten können, eine Anpassung der Immissionsgrenzwerte drängt sich daher aus wissenschaftlicher Sicht nicht auf. Generell bleiben jedoch bezüglich nicht-thermischer Wirkungen hochfrequenter Strahlung viele Fragen offen, sowohl was die Sicherheit ihres Nachweises als auch ihre potenzielle Bedeutung für die Gesundheit betrifft.

Keywords:

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

Stichwörter:

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

Le présent rapport de synthèse constitue une évaluation actualisée des conséquences sanitaires du rayonnement à haute fréquence, effectuée sur la base des résultats de recherches publiés entre fin 2002 et septembre 2006. Il considère en priorité les études réalisées directement sur l'homme, s'attachant pour cela à la littérature scientifique, qui contient essentiellement pour cette période des études sur les téléphones mobiles. En complément, ce rapport présente et analyse les résultats des deux programmes de recherche Perform B et REFLEX, qui se sont intéressés au comportement des cellules et des animaux. Grâce à ces nouveaux résultats de recherches, les données scientifiques actuelles sont plus diversifiées, mais pas pour autant plus limpides. Aucun nouvel effet significatif sur la santé pouvant être considéré comme scientifiquement prouvé n'a été identifié. Par conséquent, aucune adaptation des valeurs limites d'immissions ne s'impose d'un point de vue scientifique. De manière générale, de nombreuses questions relatives aux effets athermiques du rayonnement à haute fréquence restent sans réponse, aussi bien en ce qui concerne la fiabilité de leur preuve que leur implication potentielle pour la santé.

Nel presente rapporto sintetico vengono aggiornate le valutazioni delle ripercussioni sulla salute delle radiazioni ad alta frequenza sulla base dei risultati delle ricerche pubblicate dalla fine del 2002 al settembre 2006. Sono state considerate in via prioritaria le ricerche condotte direttamente sull'uomo. Ciò è avvenuto prendendo in esame la letteratura scientifica del periodo indicato, la quale ha recensito soprattutto l'esposizione ai telefoni cellulari. Quale integrazione vengono presentati e analizzati anche i risultati dei due programmi di ricerca Perform B e REFLEX sul comportamento di cellule e animali. I nuovi risultati delle ricerche hanno consentito di ampliare la base dei dati scientifici, tuttavia non hanno permesso una maggiore chiarezza. Non sono stati identificati effetti importanti per la salute che possano essere dichiarati certi dal punto di vista scientifico, pertanto attualmente non vi è alcuna urgenza di dover adattare i valori limite d'immissione. In generale molte questioni sugli effetti non termici delle radiazioni ad alta frequenza rimangono senza risposta, sia per quanto riguarda la certezza delle prove sia per quanto riguarda la potenziale incidenza sulla salute.

Mots-clés :

rayonnement non ionisant,
rayonnement à haute fréquence,
faible intensité, athermique,
santé, évaluation des risques,
téléphonie mobile, installation
émettrice

Parole chiave:

radiazioni non ionizzanti,
radiazioni ad alta frequenza,
intervallo delle dosi deboli, non
termico, salute, valutazione dei
rischi, telefoni cellulari, impianti
di trasmissione

> Vorwort

Im Jahr 2000 hat der Bundesrat die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) in Kraft gesetzt. Bereits damals hat das UVEK in einer Pressemitteilung festgehalten, dass der Bundesrat neuen Erkenntnissen Rechnung tragen und die Verordnung bei Bedarf anpassen wird. Der Bundesrat und das Bundesgericht haben dem BAFU als Umweltbehörde des Bundes die Aufgabe übertragen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse über gesundheitliche Auswirkungen von nichtionisierender Strahlung zu verfolgen und dem Bundesrat bei Bedarf Antrag auf eine Anpassung der Immissionsgrenzwerte der NISV zu stellen. Diesem Auftrag ist das BAFU erstmals im Jahr 2003 mit dem Bericht «Hochfrequente Strahlung und Gesundheit» nachgekommen. Seither sind viele neue Ergebnisse der wissenschaftlichen Forschung dazugekommen. Im vorliegenden Bericht werden diese neuen Ergebnisse der Periode 2003 bis September 2006 zusammengefasst und bewertet. Die Bewertung erfolgt nach dem gleichen Schema wie bereits bei der ersten Ausgabe dieser Reihe: Es wird einerseits untersucht, wie sicher ein bestimmter biologischer Effekt nachgewiesen ist, andererseits, welche Bedeutung er für die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen hat oder haben könnte. In Ergänzung zu Untersuchungen am Menschen werden erstmals auch die Ergebnisse von zwei Forschungsprogrammen einbezogen, bei denen nicht Menschen, sondern einzelne Zellen und Tiere exponiert wurden. Es ist vorgesehen, in Zukunft vermehrt Zell- und Tierstudien in die Gesamtbewertung einfließen zu lassen.

Mit dem vorliegenden Bericht will das BAFU auf aktueller Basis darlegen, welche gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter Strahlung wissenschaftlich gesichert sind und wo wir es erst mit Hinweisen oder mit Effekten unklarer Bedeutung für die Gesundheit zu tun haben. Es ist zu wünschen, dass diese Unterscheidung auch Eingang in die öffentliche Wahrnehmung und Diskussion der Gesundheitsrisiken von Hochfrequenzstrahlung findet.

Gérard Poffet
Vizdirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Zusammenfassung

Basierend auf über 200 wissenschaftlichen Studien, in denen Auswirkungen auf den Menschen untersucht worden waren, publizierte das BUWAL im Frühling 2003 einen Bericht zur Beurteilung des Gesundheitsrisikos durch hochfrequente nichtionisierende Strahlung im Niedrigdosisbereich. Darin wurde der Stand der Wissenschaft bis Ende 2002 zusammengefasst und bewertet (Umweltmaterialien Nr. 162, BUWAL 2003, im folgenden abgekürzt als UM 162).

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, die bei höheren Intensitäten auftreten, sind hinreichend bekannt und werden im vorliegenden Bericht nicht behandelt.

Die seit Ende 2002 publizierten epidemiologischen und experimentellen Studien zur Hochfrequenzexposition von Menschen wurden laufend weiter gesammelt und aufgearbeitet. Eine erste Aktualisierung des wissenschaftlichen Kenntnisstands wurde im Frühling 2004 als «Nachtrag A» veröffentlicht. Der vorliegende Übersichtsbericht löst diesen Nachtrag ab. Er basiert auf fast 150 wissenschaftlichen Publikationen zur Hochfrequenzexposition von Menschen, die seit Ende 2002 bis September 2006 veröffentlicht wurden. Die Studien an Menschen wurden von der Dokumentationsstelle ELMAR am Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel zusammengefasst und bewertet. Details finden sich in der öffentlich zugänglichen Datenbank ELMAR (www.elmar.unibas.ch/index.html). In Ergänzung dazu werden auch die Ergebnisse der beiden international koordinierten Forschungsprogramme Perform B und REFLEX bewertet, bei denen nicht Menschen, sondern einzelne Zellen oder Tiere exponiert wurden. Dieser Teil des Berichts wurde vom Zentrum für Biomedizin der Universität Basel verfasst.

Wie bereits in Bericht UM 162 wird für jede bisher untersuchte biologische Wirkung im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung auf der Basis aller zum jeweiligen Effekt verfügbaren Studien die **Evidenz** für das Vorhandensein des Effektes auf einer differenzierten Skala bewertet. Die Einteilung erfolgt in Anlehnung an die Klassifikation der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zur Bewertung der Kanzerogenität einer Substanz oder eines Agens (<http://monographs.iarc.fr>). Diese Klassifikation wurde übernommen und auf nichtkanzerogene Auswirkungen ausgedehnt. Die Kriterien für jede Evidenzstufe sind.

> **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 möglicherweise auf methodische Schwächen in den Studien zurückzuführen. Die wissenschaftlichen Hinweise werden durch Einzelfallberichte gestützt. Die Beurteilung als «möglich» bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen Exposition und Auswirkung. Es handelt sich nicht um eine Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit des Effekts.
- > **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.

Zudem werden die bisher untersuchten Wirkungen der Hochfrequenzstrahlung bezüglich ihrer **Gesundheitsrelevanz** in drei Gruppen eingeteilt. Um die Einteilung der Kategorien zu verdeutlichen, wurden für diese drei Gruppen von UM 162 abweichende Bezeichnungen gewählt.

- > **Erkrankungen und Sterblichkeit:** Bei den untersuchten Auswirkungen handelt es sich um Beeinträchtigungen der Gesundheit, die eine drastische Einschränkung der Lebensqualität darstellen. Sie können lebensbedrohlich sein und die Lebenserwartung reduzieren. Diese Kategorie umfasst alle Krebserkrankungen, 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.
- > **Veränderung physiologischer Grössen:** 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, gentoxische Effekte, 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, stationären Sendeanlagen und Expositionen im Labor überhaupt verglichen werden können, mussten die unterschiedlichen Dosismasse vereinheitlicht werden. Als gemeinsames Dosismass wird die maximale SAR₁₀ verwendet. Diese Grösse gibt an, wie viel 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 wenn möglich näherungsweise abgeschätzt.

Ergebnisse und Bewertung der Humanstudien per Ende September 2006

In Tabelle 1 ist die Bewertung der Evidenz für gesundheitliche Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung im Niedrigdosisbereich unter Berücksichtigung aller bis Ende September 2006 vorliegenden Studien, die direkt mit oder am Menschen durchgeführt wurden, zusammengestellt.

Es gibt keine neuen Auswirkungen, die als gesichert gelten können. Unbestritten ist, dass Hochfrequenzstrahlung die Funktion technischer Geräte beeinträchtigen kann. Gesundheitliche Folgen kann dies insbesondere bei medizinischen Implantaten wie Herzschrittmachern haben. Allerdings sind heute viele Geräte weitgehend unempfindlich gegenüber der Strahlung von Mobiltelefonen. 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 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 mentalen Ablenkung.

gesichert

Es wird weiterhin als wahrscheinlich erachtet, dass die Exposition gegenüber einem Mobiltelefon die Hirnströme verändert. In Bezug auf das Spontan-EEG im Schlaf oder im Wachzustand wurde am konsistentesten eine Amplitudenerhöhung im Alpha-Band beobachtet. In einigen Studien traten die Effekte in den ersten fünfzehn Minuten nach Beendigung der Exposition auf. Ebenfalls als wahrscheinlich bewertet werden Veränderungen der Schlafphasen, die in mehreren Studien beobachtet wurden. Auch in den meisten Experimenten zur Untersuchung der evozierten Gehirnpotenziale zeigten sich Expositionseffekte. In zwei Replikationsstudien mit verbesserten Methoden liessen sich frühere Ergebnisse allerdings nicht bestätigen. Die beobachteten Effekte traten bei so niedrigen Strahlenintensitäten auf, dass sie nicht mit dem konventionellen thermischen Wirkungsmodell erklärbar sind.

wahrscheinlich

Zum Auftreten von unspezifischen Symptomen wie Kopfschmerzen, Unwohlsein, Müdigkeit, Schwindel und Brennen auf der Haut bei der Benutzung eines Mobiltelefons fanden nicht alle neuen Studien einen Zusammenhang, teilweise bestanden erhebliche methodische Mängel. Zusammen mit den Resultaten der früheren skandinavischen Studien (vgl. UM 162) wird dennoch weiterhin als wahrscheinlich bewertet, dass stärkerer Mobiltelefongebrauch mit der Häufigkeit von unspezifischen Symptomen assoziiert ist. Ob diese Zunahme durch die hochfrequente Strahlung oder durch andere Begleitfaktoren des Mobiltelefonierens wie z. B. ein erhöhtes Stressniveau verursacht wird, kann nicht beurteilt werden.

Tab. 1 > Zusammenfassung der Evidenz für gesundheitliche Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung im Niedrigdosisbereich (Exposition von Menschen).

Angaben zur Schwelle für Effekte 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	SCHWELLE FÜR EFFEKTE
	Erkrankungen und Sterblichkeit	Einschränkung des Wohlbefindens	Veränderung physiologischer Grössen		
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)		Unspezifische Symptome (Kopfschmerzen, Müdigkeit, Konzentrationsschwierigkeiten, Unbehagen, brennende Haut etc.)		Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
			Hirnströme Schlafphasen	Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
Möglich (einzelne Hinweise auf Effekte)	Leukämien/Lymphome			TV-/Radiosender	im Bereich des Anlagegrenzwertes
	Hirntumore			Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
		Schlafqualität		Radiosender	im Bereich des Anlagegrenzwertes
			Kognitive Funktionen, Reaktionszeiten	Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
			Wahrnehmung schwacher elektromagnetischer Felder	Mobiltelefon	20 mW/kg–2 W/kg
Unwahrscheinlich (mehrfache Hinweise auf Abwesenheit)	Mortalität			Mobiltelefon	
	Speicheldrüsentumoren			Mobiltelefon	
Nicht beurteilbar (wenig Daten)	Brustkrebs			Diverse	
	Augentumore			Mobiltelefon	
	Hodentumore			Radarpistolen	
	Abort			Diathermiegerät	
		Unspezifische Symptome (Schlafstörungen, Kopfschmerzen etc.)		Mobilfunkbasisstation	
		Psychisches Befinden		Diverse	
			Fertilität	Mobiltelefon	
			Hormonsystem	Diverse	
			Immunsystem	Diverse	
			Herz-/Kreislauffunktionen	Diverse	
		Gehör und Gleichgewicht	Mobiltelefon		
		Gentoxizität	Berufliche Exposition		

Es liegt weiterhin nur eine Studie vor, die gezielt Schlafstörungen in der Umgebung eines Radiosenders untersucht hat. Zu dieser Untersuchung wurden neue Auswertungen publiziert. Da auch in diesen Auswertungen ein Zusammenhang beobachtet wurde, wird wie schon in UM 162 als möglich bewertet, dass die Emissionen solcher stark emittierenden Kurzwellen-Radiosender die Schlafqualität beeinträchtigen können.

möglich

Die Datenlage zum Einfluss der Mobiltelefonexposition auf die kognitiven Funktionen ist weniger einheitlich als Ende 2002. Die früher beobachtete Verkürzung der Reaktionszeiten bestätigte sich in doppelt verblindeten Replikationsstudien nicht. Die Evidenz für Effekte der Mobiltelefonexposition auf die kognitiven Funktionen wird daher gegenüber der Einschätzung in UM 162 von wahrscheinlich auf möglich zurückgestuft.

Die neuen Provokationsstudien zur Wahrnehmung schwacher elektromagnetischer Felder zeigen, dass auch Personen, die ihre Befindlichkeitssymptome der Hochfrequenzexposition zuschreiben, diese Felder in einer Testsituation im Allgemeinen nicht wahrnehmen können. Es gibt keine neuen Studien mit mehrfacher Testung einzelner Personen. Frühere Untersuchungen mit dieser Testanlage liessen vermuten, dass es sehr selten einzelne Personen geben könnte, die diese Wahrnehmungsfähigkeit haben.

Auf Grund der bis Ende 2002 publizierten Studien wurde als möglich bewertet, dass das Risiko für Tumore des blutbildenden und lymphatischen Systems in der Umgebung von stark sendenden Rundfunksendern erhöht ist. Die beiden neuen Studien ändern an dieser Bewertung nichts.

Zum Hirntumorrisiko bei Mobiltelefonbenutzern wurden bis Ende September 2006 einzelne Auswertungen der multizentrischen Fall-Kontrollstudie «Interphone» veröffentlicht, aber nur eine mit gepoolten Daten. Zusätzlich liegen Resultate von zwei grossen Fall-Kontrollstudien einer schwedischen Forschergruppe vor. Aufgrund dieser und früherer Ergebnisse muss insgesamt immer noch als möglich eingestuft werden, dass intensive, langjährige Mobiltelefonbenutzung mit einem erhöhten Risiko für Hirntumoren einhergeht.

Zur Gesamtmortalität liegen keine neuen Resultate vor. Aufgrund der früheren Studienergebnisse wurde ein Zusammenhang mit der Exposition gegenüber niedrigdosierter Hochfrequenzstrahlung in UM 162 als unwahrscheinlich beurteilt. Auch ein kausaler Zusammenhang zwischen Hochfrequenzexposition und dem Risiko, an einem Speicheldrüsentumor zu erkranken, erscheint aufgrund der vorliegenden Fall-Kontrolldaten unwahrscheinlich.

unwahrscheinlich

In Bezug auf Tumorerkrankungen anderer Organe reicht die Datenlage weiterhin noch nicht aus, um mögliche Assoziationen zu beurteilen. Dazu gehört auch das Risiko von Augen- und Hodentumoren sowie von Brustkrebs. Ebenfalls nicht beurteilbar ist, ob die hochfrequente Strahlung bei beruflich Exponierten zu gentoxischen Zellschäden führen kann. Auch die Bewertung der Effekte in Bezug auf Blutdruck, Puls und Herzfrequenzvariabilität muss offen bleiben. Zu Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf das Hormon- und das Immunsystem, das Gehör, die Fertilität und die Fehlgeburt-

nicht beurteilbar

tenrate sowie auf das psychische Befinden liegen ebenfalls weiterhin zu wenig Resultate vor, um eine Beurteilung zu ermöglichen.

Ergebnisse und Bewertung der Forschungsprogramme Perform B und REFLEX (Exposition von Zellen und Tieren)

Zwei international koordinierte Forschungsprogramme befassten sich in den letzten Jahren mit den Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf biologische Systeme. Bei den unter «Perform B» durchgeführten Projekten ging es in erster Linie um die Replikation früherer Studien mit dem Ziel, deren Befunde zu überprüfen, während im «REFLEX»-Programm (Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Energy Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive *«in vitro»* Methods) die Erforschung zellbiologischer Effekte elektromagnetischer Felder unter kontrollierten Laborbedingungen im Zentrum stand.

Ausgehend von Ergebnissen vorgängiger Studien wurden im Programm «Perform B» Einflüsse hochfrequenter Strahlung auf die Erbsubstanz DNS, auf die Aktivität eines Stoffwechsellzyms und auf das Verhalten von Tieren untersucht. Zum Teil handelte es sich um Replikationsexperimente mit dem Ziel, die bereits vorliegenden Befunde unabhängig zu überprüfen, zum Teil wurden die Untersuchungen ausgeweitet oder methodisch verbessert. Die Studien ergaben, dass weder die Hochfrequenz-Exposition alleine, noch in Kombination mit einem Mutagen (Röntgenstrahlung) in isolierten menschlichen Lymphozyten zu einer sichtbaren DNS-Schädigung führt. Ebenso wenig konnte unter unterschiedlichen Expositionsbedingungen eine Veränderung der Aktivität der Ornithindecaboxylase (ODC) nachgewiesen werden. Schliesslich zeigten Ratten und Mäuse unter Hochfrequenz-Exposition kein verändertes Lernverhalten in der Art, wie es vorgängig beschrieben worden war, und auch das Angstverhalten sowie die Durchlässigkeit der Blut-Hirnschranke schienen nicht beeinträchtigt zu werden. Soweit es sich um echte Replikationsexperimente handelte, konnten die Resultate der früheren Studien somit nicht bestätigt werden.

Im «REFLEX»-Programm ging es darum, zelluläre Effekte der Hochfrequenz-Exposition unter standardisierten, streng kontrollierten Laborbedingungen zu untersuchen. Gemessen wurden die Häufigkeit von Strangbrüchen der DNS, das Auftreten von Mikrokernen und Chromosomenaberrationen, Einflüsse auf den Zellzyklus, die Zelldifferenzierung und Apoptose sowie die Expression von Genen. Exponiert wurde sowohl mit hoch- als auch niederfrequenter Strahlung. Im vorliegenden Bericht werden nur die Ergebnisse der Exposition gegenüber hochfrequenter Strahlung behandelt.

Das Auftreten der in «REFLEX» gefundenen Effekte ist derzeit als möglich, nicht jedoch gesichert zu betrachten. Dies vor dem Hintergrund, dass es sich entweder um erstmalige Beobachtungen handelt, die noch nicht unabhängig repliziert worden sind, oder dass Replikationsversuche widersprüchliche Ergebnisse lieferten, ohne dass die Gründe dafür geklärt sind. Die niedrigste Schwelle für die (lokale) SAR, bei der ein Effekt beobachtet wurde, beträgt 0,3 W/kg und liegt damit im nicht-thermischen Bereich, ungefähr in der Mitte zwischen dem Anlage- und dem Immissionsgrenzwert der NIS-Verordnung.

In Bindegewebszellen wurden vorübergehend DNS-Strangbrüche sichtbar und es traten Mikrokerne und Chromosomenaberrationen auf. Dabei scheint neben der Intensität und der Dauer auch die Modulation des Signals entscheidend zu sein. DNS-Strangbrüche sind an sich nichts Aussergewöhnliches. Sie treten auch natürlich auf und werden durch zelleigene Reparatursysteme wieder behoben. Es ist derzeit unklar, ob die als Folge der Exposition vorübergehend festgestellten Strangbrüche korrekt repariert werden, oder ob sie zu bleibenden Veränderungen im Erbmateriale führen können. Für das erste spricht die Beobachtung (in analogen Experimenten mit niederfrequenten Feldern), dass die Häufigkeit von Strangbrüchen nach einigen Stunden Exposition wieder abnahm. Für das zweite hingegen, dass neben Strangbrüchen auch Mikrokerne und Chromosomenaberrationen festgestellt wurden, welche Ausdruck einer dauerhaften Veränderung des Erbmateriale sind. Sollten sich die letztgenannten Befunde erhärten, dann wären sie von Bedeutung, da dann Fehlfunktionen der Zellen zu erwarten wären. Ob die gefundenen molekularen Ereignisse tatsächlich zu solchen Fehlfunktionen führen, muss noch näher untersucht werden. Die untersuchten Endpunkte wie Zellzyklus, Zelldifferenzierung und Apoptose wurden durch die HF-Strahlung nicht oder höchstens schwach beeinflusst. Damit muss vorläufig offen bleiben, welche Bedeutung die gefundenen molekularen Effekte für die Zellfunktionen tatsächlich haben.

Andere Untersuchungen widmeten sich der Frage, ob Gene als Folge der Hochfrequenzexposition stärker oder schwächer exprimiert werden. Man erhofft sich von der Kenntnis der molekularen Abläufe in der Zelle ein Verständnis darüber, wie ein externer Stimulus Zellfunktionen beeinflussen kann. Bei der grossen Anzahl von Genen und Proteinen steht man hier allerdings erst im Stadium des empirischen Datensammelns. Am weitesten fortgeschritten ist die Hypothese, dass Hochfrequenzstrahlung als Stressor wirkt und die Zelle so genannte Stressproteine bildet. Die Untersuchungen ergaben, dass in gewissen Zelltypen die Expression einzelner Gene unter Hochfrequenzexposition mit unterschiedlichem Vorzeichen beeinflusst wird: Gewisse Proteine wurden verstärkt, andere dagegen reduziert gebildet. Auch hier wäre zu erwarten, dass eine deregulierte Genexpression schliesslich Endpunkte wie Zellzyklus, Zelldifferenzierung und Apoptose beeinflussen kann, was jedoch nicht beobachtet wurde.

Schlussfolgerungen

Die wissenschaftliche Datenlage für die Beurteilung der Gesundheitsgefährdung der Bevölkerung durch hochfrequente Strahlung im Niedrigdosisbereich ist immer noch sehr lückenhaft. Experimentelle Studien am Menschen und an Zellkulturen belegen unmittelbare Wirkungen der Hochfrequenzstrahlung, die nicht mit dem Erwärmungsansatz erklärt werden können. Langzeitstudien an Menschen in ihrer natürlichen Umgebung gibt es nur wenige. Zu Auswirkungen auf die Gesundheit bei Menschen in der Nähe von Mobilfunkbasisstationen gibt es bisher nur eine einzige Studie, die wissenschaftlichen Ansprüchen genügt.

Beim derzeitigen Stand der Kenntnisse lassen sich folgende 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 des Menschen 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 eingestuft Effekte unterhalb der schweizerischen Anlagegrenzwerte nicht zu erwarten sind.
- > Effekte beim Menschen, die als möglich eingestuft werden, gibt es sowohl im Zusammenhang mit Mobiltelefonen als auch mit Rundfunksendern. Für die Strahlung von Mobiltelefonen liegt die Schwelle für Effekte 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.
- > Eine vorübergehende oder dauerhafte Veränderung des Erbmaterials gewisser Zellen wird als möglich eingestuft, ebenso eine veränderte Expression von Genen. Die niedrigste Schwelle für die (lokale) SAR, bei der im Zellexperiment ein Effekt beobachtet wurde, beträgt 0.3 W/kg. Die Bedeutung dieser Befunde für die Zellfunktionen ist derzeit nicht klar.

Seit dem Bericht UM 162 ist das Bild vielfältiger, aber nicht deutlicher geworden. Es gibt neue Studien, vor allem im human-experimentellen Bereich, die mit neuen Techniken gearbeitet haben oder bisher kaum analysierte physiologische Parameter einbezogen haben. Die Anzahl der wissenschaftlich beobachteten Effekte, bei denen zur Zeit nicht beurteilbar ist, ob sie kausal auf die Strahlung zurückzuführen sind, hat sich vergrößert. Einige dieser Effekte beinhalten ein gravierendes gesundheitliches Potenzial, bei anderen ist diese Frage offen. Gleichzeitig hat auch die Anzahl der Gesundheitsparameter zugenommen, für die keine Beziehung zur Hochfrequenzstrahlung festgestellt wurde. Besonders bei den experimentellen Studien würde man sich wünschen, dass bisherige Ergebnisse an grösseren oder empfindlicheren Kollektiven und unter Einbezug der mancherorts diskutierten zeitlichen Verzögerung überprüft werden, bevor neue Zielgrößen anvisiert oder weitere Untersuchungsmethoden entwickelt werden. Bis dahin sind Aussagen zur Langzeitwirkung noch nicht möglich. Bei den Bevölkerungsstudien ist die Abschätzung der Exposition nach wie vor ein grosses Problem. Gerade im Hinblick auf die Untersuchung von Langzeiteffekten ist zu hoffen, dass die sich in Entwicklung befindenden Messgeräte zur Erfassung der individuellen Exposition zu einer Verbesserung beitragen.

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

> Résumé

Au printemps 2003, l'OFEV – qui s'appelait encore OFEFP – avait publié un rapport sur l'évaluation du risque sanitaire engendré par l'exposition au rayonnement non ionisant à haute fréquence de faible intensité. Ce document, qui s'appuyait sur quelque 200 études scientifiques relatives aux conséquences sur l'homme, évaluait l'état des connaissances scientifiques à la fin de l'année 2002 (Documents environnement n°162, OFEFP, 2003, abrégé ci-après UM-162).

Le rayonnement non ionisant à haute fréquence « de faible intensité » concerne les intensités inférieures aux valeurs limites d'immissions 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 (TAS) local, recommandée par la Commission internationale pour la protection contre le rayonnement non ionisant (ICNIRP). Les effets thermiques survenant à fortes intensités sont suffisamment connus et ne sont pas traités dans le présent rapport.

Les études expérimentales et épidémiologiques sur l'exposition de l'homme aux hautes fréquences ont été répertoriées et décortiquées depuis la fin 2002 au fur et à mesure de leurs publications. Une première actualisation de l'état des connaissances scientifiques a été publiée au printemps 2004 sous la forme d'un « Complément A ». Le présent rapport de synthèse fait suite à ce complément. Il repose sur près de 150 travaux scientifiques relatifs à l'exposition de l'homme aux hautes fréquences, dont les conclusions ont été rendues publiques entre fin 2002 et septembre 2006. Les études sur l'homme ont été rassemblées et évaluées par le service de documentation ELMAR de l'Institut de médecine sociale et préventive de l'université de Bâle. Les détails sont disponibles dans la banque de données ELMAR, publiquement accessible sur Internet (www.elmar.unibas.ch/index.html). En complément, les résultats des deux programmes de recherche internationaux Perform B et REFLEX, lesquels portent non pas sur des humains, mais sur des cellules et des animaux, ont également été évalués. Cette partie du rapport a été rédigée par le Centre de biomédecine de l'université de Bâle.

Comme dans le rapport UM-162, la **preuve de l'existence** d'un effet biologique résultant d'une exposition au rayonnement à haute fréquence a été évaluée au moyen d'une échelle différenciée, en tenant compte de toutes les études faites en relation avec l'effet concerné. La répartition s'effectue selon la classification de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) relative à l'évaluation de la cancérogénicité d'une substance ou d'un agent (<http://monographs.iarc.fr>). Cette classification a été reprise et étendue aux effets non cancérogènes. Pour chaque degré de preuve, les critères sont les suivants:

> **Prouvé:** 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:** un effet est considéré comme « possible » lorsqu'il a été observé 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. L'évaluation « possible » se rapporte au lien entre l'exposition et la conséquence. Il ne s'agit pas d'apprécier la probabilité de l'apparition de l'effet.
- > **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 du rayonnement à haute fréquence ont été classés en trois groupes en fonction de leur **impact sanitaire**. Dans un souci de clarté, les libellés adoptés ont été modifiés par rapport à l'UM-162:

- > **Affections et mortalité:** les répercussions étudiées sont des atteintes à la santé qui constituent une limitation radicale de la qualité de vie. Elles peuvent être délétères et réduire l'espérance de vie. Cette catégorie comprend les affections cancéreuses, les avortements et les malformations des nouveau-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.
- > **Modification des grandeurs physiologiques:** 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 soi 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 effets génotoxiques, les variations de l'EEG ainsi que les changements dans la perception des stimulations externes et dans les réactions qu'elles suscitent.

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, aux installations émettrices stationnaires et aux expositions en laboratoire, il a fallu unifier les différentes indications dosimétriques. Ce faisant, on a choisi d'exprimer les doses par le TAS_{10} maximal (en anglais SAR_{10}). Cette grandeur indique la quantité de rayon-

nement 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 dans la mesure du possible.

Résultats et évaluation des études portant sur l'homme fin septembre 2006:

Le tableau 2 résume l'évaluation des degrés de preuve des effets sanitaires engendrés par le rayonnement à haute fréquence de faible intensité. Il tient compte de toutes les études directement réalisées avec ou sur l'homme, disponibles à la fin septembre 2006.

Aucun nouvel effet pouvant être considéré comme prouvé n'a été identifié. 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 des implants médicaux, tels que les stimulateurs cardiaques. Toutefois, de nombreux appareils sont aujourd'hui insensibles au rayonnement de téléphones mobiles. Il a également été prouvé que des sensations auditives anormales, liées à des micro-ondes pulsées, apparaissent lorsque les impulsions du rayonnement dépassent un certain seuil énergétique. Dans le cas des installations radar, ce phénomène peut se produire même lorsque les valeurs limites d'immissions sont respectées. Pour ce qui est du rayonnement de la téléphonie mobile, aucun indice tangible n'a été mis en avant. Par ailleurs, on considère comme prouvé que le risque d'accidents augmente lorsqu'on téléphone en conduisant, indépendamment du fait qu'on utilise un kit « mains libres » ou non. Ce risque n'est cependant pas dû au rayonnement, mais à la distraction.

prouvé

Il est considéré comme probable que l'exposition au téléphone mobile modifie l'activité électrique du cerveau. S'agissant de l'EEG spontané pendant le sommeil ou à l'état d'éveil, l'élément le plus constant qui a pu être observé consiste en une élévation de l'amplitude dans la bande alpha. Dans certaines études, les effets sont apparus dans les quinze premières minutes suivant l'exposition. On peut également considérer comme probables certaines modifications des phases de sommeil, car celles-ci ont été observées dans de nombreuses études. De même, dans la majorité des expériences étudiant les potentiels cérébraux évoqués, des effets d'exposition se sont produits. Au cours de deux études de réplication employant des méthodes améliorées, les résultats antérieurs n'ont toutefois pas été confirmés. Les effets observés sont apparus à des intensités de rayonnement si faibles qu'ils ne peuvent pas être expliqués par le modèle d'action thermique conventionnel.

probable

Les études récentes n'ont pas toutes trouvé un lien entre l'apparition de symptômes non spécifiques (maux de tête, malaises, sensation de fatigue, vertiges, échauffements de la peau) et l'utilisation du téléphone mobile. Certaines présentaient même des insuffisances méthodologiques notables. Mais, dans la droite ligne des résultats d'études scandinaves antérieures (voir UM-162), il apparaît toujours probable qu'une utilisation intensive du téléphone mobile est associée à une fréquence accrue de symptômes non spécifiques. On ne peut toutefois pas établir si cet accroissement est provoqué par le rayonnement à haute fréquence ou par d'autres facteurs liés à l'utilisation du téléphone mobile, par exemple un niveau de stress élevé.

Une seule étude s'est intéressée de manière ciblée aux troubles du sommeil à proximité d'un émetteur radio. De nouvelles analyses à propos de cette étude ont été publiées. Celles-ci ayant révélé également l'existence d'un lien entre les deux facteurs, il est considéré, à l'instar de l'UM-162, comme possible que les puissants émetteurs radio à ondes courtes peuvent gêner la qualité du sommeil.

possible

Les données concernant l'influence de l'exposition au téléphone mobile sur les fonctions cognitives sont moins homogènes que fin 2002. La réduction des temps de réaction alors observée ne s'est pas confirmée dans des études de réplication en double aveugle. L'existence des effets de l'exposition au téléphone mobile sur les fonctions cognitives a donc été déclassée de « probable » à « possible » par rapport à l'estimation de l'UM-162.

Les nouvelles études de provocation relatives à l'acuité aux champs électromagnétiques faibles montrent que même des personnes attribuant leurs symptômes d'état à l'exposition aux hautes fréquences ne peuvent généralement pas percevoir ces champs en situation de test. Il n'existe aucune nouvelle étude comportant des tests répétitifs sur les mêmes personnes. D'anciens examens avec cette situation de test laissaient supposer que rares étaient les personnes ayant cette capacité de perception.

Sur la base des études publiées jusqu'à fin 2002, il a été considéré comme possible que le risque de tumeurs du système hématopoïétique et lymphatique augmente à proximité d'émetteurs radio à ondes fortes. Les deux études récentes ne changent en rien l'évaluation.

Concernant le risque de tumeurs du cerveau chez les utilisateurs de téléphone mobile, diverses analyses de la série d'études cas-témoins multicentriques « Interphone » ont été publiées jusqu'en septembre 2006, mais une seule disposait de données regroupées. Par ailleurs, les résultats de deux grandes études cas-témoins réalisées par un groupe de chercheurs suédois sont disponibles. Compte tenu de ces résultats et des acquis précédents, il faut toujours considérer comme possible que l'utilisation intensive du téléphone mobile pendant plusieurs années s'accompagne d'un risque accru de tumeurs du cerveau.

Aucun nouveau résultat concernant la mortalité globale n'est à signaler. Compte tenu des résultats des études antérieures, un lien avec une exposition à faible dose à un rayonnement à haute fréquence avait été jugé improbable dans l'UM-162. Même un lien causal entre l'exposition aux hautes fréquences et le risque d'être atteint d'une tumeur de la glande salivaire paraît improbable du fait des présentes données d'études cas-témoins.

improbable

Tab. 2 > Résumé du degré de preuve des effets sanitaires engendrés par le rayonnement à haute fréquence de faible intensité (exposition d'humains).

Les données relatives au seuil d'effet, exprimées en mW/kg ou W/kg, sont à considérer comme approximatives. Elles se réfèrent au taux d'absorption spécifique local maximal TAS₁₀.

DEGRÉ DE PREUVE	EFFET			SOURCE D'EXPOSITION	SEUIL D'EFFET
	Affections et mortalité	Limitation du bien-être	Modification de grandeurs physiologiques		
Prouvé (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)		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
			Activité électrique du cerveau , Phases de sommeil	Téléphone mobile	20 mW/kg-2 W/kg
Possible (effets mentionnés sporadiquement)	Leucémies/lymphomes			Émetteur TV/radio	Voisin de la valeur limite de l'installation
	Tumeurs du cerveau			Téléphone mobile	20 mW/kg-2 W/kg
		Qualité du sommeil		Émetteur radio	Voisin de la valeur limite de l'installation
			Fonctions cognitives, temps de réaction	Téléphone mobile	20 mW/kg-2 W/kg
			Acuité aux champs faibles	Téléphone mobile	20 mW/kg-2 W/kg
Improbable (absence mentionnée à diverses reprises)	Mortalité			Téléphone mobile	
	Tumeurs de la glande salivaire			Téléphone mobile	
Non évaluable (données peu nombreuses)	Cancer du sein			Diverses	
	Tumeurs oculaires			Téléphone mobile	
	Tumeurs des testicules			Pistolets radar	
	Avortement			Appareils diathermiques	
		Symptômes non spécifiques (troubles du sommeil, maux de tête, etc.)		Station de base de téléphonie mobile	
		État psychique		Diverses	
			Fertilité	Téléphone mobile	
			Système hormonal	Diverses	
			Système immunitaire	Diverses	
			Fonctions du système circulatoire	Diverses	
			Ouïe et équilibre	Téléphone mobile	
		Génotoxicité	Exposition au travail		

Concernant les tumeurs affectant d'autres organes, l'état actuel des données ne permet pas encore d'évaluer des associations potentielles. Cela inclut également le risque de tumeurs des testicules et des tumeurs oculaires ainsi que le cancer du sein. Le fait de savoir si le rayonnement à haute fréquence pour les personnes exposées dans le cadre de leur profession peut entraîner des dommages cellulaires génotoxiques n'est pas évaluable non plus. L'évaluation des effets sur la pression artérielle, le pouls et les variations de la fréquence cardiaque reste également sans réponse. En ce qui concerne les effets de l'exposition aux hautes fréquences sur le système hormonal et immunitaire, l'ouïe, la fertilité et le taux d'avortement ainsi que sur l'état psychique, il n'existe encore que trop peu de résultats pour apprécier la situation.

non évaluable

Résultats et évaluation des programmes de recherche Perform B et REFLEX (exposition de cellules et d'animaux)

Deux programmes de recherche coordonnés au niveau international se sont intéressés ces dernières années aux conséquences des champs électromagnétiques sur les systèmes biologiques. Les projets menés dans le cadre de « Perform B » se sont essentiellement attachés à répliquer d'anciennes études en vue de vérifier leurs conclusions, tandis que le programme « REFLEX » (Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Energy Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive "*in vitro*" Methods) a notamment recherché les effets des champs électromagnétiques sur les cellules biologiques en conditions contrôlées de laboratoire.

Partant des résultats des études précédentes, le programme « Perform B » a étudié les influences du rayonnement à haute fréquence sur le matériel génétique, sur l'activité d'une enzyme de métabolisme et sur le comportement des animaux. Il s'agissait dans un premier temps de réaliser des expériences de répllication dont l'objectif était de vérifier de manière indépendante les découvertes déjà existantes et, ensuite, d'étendre les recherches et d'améliorer les méthodes. Les études ont montré que, prise isolément ou combinée avec un mutagène (rayons X), l'exposition aux hautes fréquences n'aboutissait pas à une altération visible de l'ADN au niveau des lymphocytes humains. De même, sous diverses conditions d'exposition, aucun changement dans l'activité de l'ornithine décarboxylase (ODC) n'a pu être prouvé. Enfin, soumis à une exposition aux hautes fréquences, les rats et souris étudiés n'ont présenté aucune modification de leur comportement d'apprentissage, comme cela avait été auparavant décrit, et même le comportement de stress ainsi que la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique n'ont pas semblé être affectés. Dans la mesure où il s'agissait d'authentiques expériences de répllication, les résultats des précédentes études n'ont pas été confirmés.

Le programme « REFLEX » consistait à étudier les effets de l'exposition aux hautes fréquences sur les cellules dans des conditions de laboratoire standardisées et strictement contrôlées. Il a permis de mesurer la fréquence des ruptures de brins d'ADN, l'apparition de micronoyaux et d'aberrations chromosomiques, les influences sur le cycle des cellules, la différenciation des cellules et l'apoptose ainsi que l'expression de gènes. L'exposition a eu lieu avec un rayonnement de hautes et basses

fréquences. Le présent rapport expose uniquement les résultats de l'exposition aux hautes fréquences.

L'apparition des effets mis en évidence par le programme « REFLEX » doit actuellement être considérée comme possible mais pas encore prouvée. Et ce, d'autant plus qu'il s'agit soit de premières observations, qui n'ont pas encore été répliquées de manière indépendante, soit de tentatives de répliquions, qui ont livré des résultats contradictoires sans que les raisons en soient établies. Le seuil le plus bas pour le TAS (local), pour lequel un effet a été observé, s'élève à 0,3 W/kg et se situe ainsi dans le domaine athermique approximativement à mi-chemin entre la valeur limite de l'installation et la valeur limite d'immissions de l'ORNI.

Des ruptures momentanées de brins d'ADN ont été observées dans les cellules du tissu conjonctif, et des micronoyaux ainsi que des aberrations chromosomiques sont apparus. À cet égard, l'intensité et la durée mais aussi la modulation du signal semblent décisives. Les ruptures de brins d'ADN n'ont, en soi, rien d'extraordinaire. De telles ruptures surviennent aussi naturellement et sont traitées par des systèmes de réparation propres aux cellules. Actuellement, on ne sait pas encore très bien si les ruptures momentanées à la suite d'une exposition sont correctement réparées ou si elles peuvent se traduire par des modifications persistantes du matériel génétique. Le fait que l'on observe (dans des expériences analogues avec des champs à basses fréquences) que l'occurrence des ruptures de brins décroît après quelques heures d'exposition plaide en faveur de la première hypothèse. La seconde est quant à elle légitimée par le fait que, outre les ruptures de brins, des micronoyaux et des aberrations chromosomiques ont également été observées, traduisant une modification durable du matériel génétique. Si ces dernières découvertes étaient corroborées, elles seraient essentielles car elles pourraient laisser présager des dysfonctionnements des cellules. Les recherches doivent être approfondies pour savoir si les événements moléculaires découverts aboutissent effectivement à de tels dysfonctionnements. Les points finaux étudiés tels que le cycle des cellules, la différenciation des cellules et l'apoptose n'ont pas été influencés par le rayonnement à haute fréquence ou ne l'ont été tout au plus que faiblement. Ainsi, il est provisoirement difficile de trancher la question de l'importance qu'ont effectivement les effets moléculaires décelés sur les fonctions des cellules.

D'autres études se sont penchées sur la question de savoir si les gènes pouvaient s'exprimer plus fortement ou plus faiblement à la suite d'une exposition aux hautes fréquences. On espère qu'une meilleure connaissance des processus moléculaires à l'œuvre dans la cellule permettra de comprendre la manière dont un stimulus externe peut influencer les fonctions des cellules. Mais devant le nombre élevé de gènes et de protéines, on n'en est ici qu'au stade de la collecte des données empiriques. L'hypothèse la plus avancée est que le rayonnement à haute fréquence agit comme un agent stressant et que la cellule développe des « protéines de stress ». Les recherches menées ont fait apparaître que dans certains types de cellules l'expression de gènes était influencée à la suite de l'exposition aux hautes fréquences avec divers signes avant-coureurs: certaines protéines ont été renforcées, tandis que d'autres ont été générées de manière réduite. Là encore, il faudrait s'attendre à ce qu'un dérèglement de l'expression des gènes puisse finalement influencer des points finaux tels que le cycle

des cellules, la différenciation des cellules, et l'apoptose, ce qui n'a toutefois pas été observé.

Conclusions:

Les données scientifiques permettant d'évaluer le risque sanitaire engendré par le rayonnement non ionisant à haute fréquence de faible intensité sont insuffisantes. Des études expérimentales réalisées sur des humains et des cultures de cellules montrent que le rayonnement à haute fréquence exerce des effets directs, ne pouvant pas être expliqués par le modèle thermique. Les études de longue durée portant sur l'homme dans son environnement naturel sont peu nombreuses. Quant aux conséquences de la proximité des stations de base de téléphonie mobile sur la santé humaine, seule une étude remplit actuellement les exigences scientifiques.

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

- > Aucun nouvel effet sanitaire dont les intensités sont inférieures aux valeurs limites recommandées par l'ICNIRP, et donc inférieures aux valeurs limites d'immissions de l'ORNI, n'a été prouvé.
- > Certains effets associés à l'exposition de l'homme 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 éclairci. Ils apparaissent pour des valeurs du TAS_{10} situées entre 20 mW/kg et 2 W/kg, et donc 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'immissions pour produire un TAS_{10} 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 sur l'homme qui sont considérés comme possibles existent tant avec les téléphones mobiles qu'avec les émetteurs radio. Dans le cas du rayonnement des téléphones mobiles, le seuil d'effet se situe dans le même domaine que celui cité plus haut (TAS_{10} 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.
- > Une modification passagère ou durable du matériel génétique de certaines cellules est considérée comme possible, tout comme une altération de l'expression des gènes. Le plus bas seuil pour lequel le TAS (local) a été observé lors d'une expérience sur les cellules s'élève à 0,3 W/kg. Les implications de cette découverte pour les fonctions cellulaires ne sont actuellement pas claires.

Le tableau dressé depuis le rapport UM-162 est plus diversifié, mais n'est pas pour autant plus limpide. Dans le domaine expérimental humain en particulier, on dispose de nouvelles études ayant fait appel à des techniques modernes ou incluant des paramètres physiologiques jusque-là peu analysés. Le nombre des effets observés scientifiquement mais pour lesquels aucun rapport causal n'a pu être établi avec le

rayonnement a augmenté. Certains de ces effets comportent un potentiel grave pour la santé, tandis que pour d'autres la question reste entière. Simultanément, le nombre des paramètres de santé pour lesquels aucune relation avec le rayonnement à haute fréquence n'était établie s'est accru. Il serait souhaitable notamment pour les études expérimentales que les résultats déjà obtenus soient vérifiés à l'appui d'échantillons plus grands et plus sensibles, en y associant le décalage temporel évoqué parfois, avant de viser de nouvelles cibles et de développer d'autres méthodes de recherche. Pour l'heure, il n'est guère possible de se prononcer sur des effets à long terme. L'évaluation de l'exposition demeure un grand problème pour les études de population. Précisément dans la perspective de la recherche des effets à long terme, il reste à espérer que les appareils de mesure de l'exposition individuelle en cours de développement apporteront une amélioration.

Du point de vue scientifique, aucun élément ne justifie une adaptation des valeurs limites de l'ICNIRP qui sous-tendent elles-mêmes les valeurs limites d'immissions de l'ORNI. Toutefois, il reste impossible de conclure que ces valeurs limites 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.

> Riassunto

Nella primavera del 2003 l'UFAFP ha pubblicato, sulla base di oltre 200 studi scientifici in cui venivano analizzate le ripercussioni sulla salute dell'uomo, un rapporto sulla valutazione dei pericoli per la salute causati dalle radiazioni non ionizzanti ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli. In questa pubblicazione sono state sintetizzate e valutate le conoscenze scientifiche disponibili fino a fine 2002 (Umwelt-Materialien n. 162, UFAFP 2003, nel seguito abbreviato "UM 162").

Per intervallo delle dosi deboli si intende l'intervallo di intensità inferiore ai valori limite d'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 che si verificano ad elevate intensità, poiché già noti.

Gli studi epidemiologici e sperimentali pubblicati a partire dal 2002 relativi all'esposizione dell'uomo alle radiazioni ad alta frequenza sono stati costantemente raccolti e aggiornati. Un primo aggiornamento delle conoscenze scientifiche è stato pubblicato nella primavera 2004 come "Appendice A". Il presente rapporto sintetico sostituisce tale appendice. Si basa su quasi 150 pubblicazioni scientifiche relative all'esposizione dell'uomo, pubblicate fra la fine del 2002 al settembre del 2006. Gli studi sull'uomo sono stati raccolti e analizzati dal Centro di documentazione ELMAR presso l'Istituto di medicina sociale e preventiva dell'Università di Basilea. Maggiori dettagli possono essere consultati nella banca dati di pubblico accesso ELMAR (www.elmar.unibas.ch/index.html). Ad integrazione di tali studi sono stati contemplati anche i risultati dei due programmi di ricerca internazionali Perform B e REFLEX, nei quali l'esposizione non ha riguardato l'uomo bensì singole cellule o animali. Questa parte del rapporto è stata curata dal Centro di biomedicina dell'Università di Basilea.

Come illustrato nel rapporto UM 162, per ogni effetto biologico esaminato finora in relazione con l'esposizione alle radiazioni non ionizzanti, l'**evidenza** della sua esistenza è stata valutata sulla base di tutti gli studi disponibili su un effetto, utilizzando una scala differenziata di diversi livelli. La suddivisione avviene secondo la classificazione dell'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) per la valutazione del rischio di cancerogenità di una sostanza o di un agente (<http://monographs.iarc.fr>). Questa classificazione è stata ripresa ed estesa alle conseguenze non cancerogene. I criteri impiegati per ogni livello di evidenza sono:

> **sicuro**: un effetto viene considerato sicuro se regge ad un'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 eventualmente da far risalire alle carenze metodologiche degli studi in questione. Le indicazioni scientifiche sono sostenute da rapporti concernenti casi singoli. La valutazione “possibile” si basa sulla relazione fra esposizione e conseguenza. Non si tratta di una previsione relativa alla probabilità che l’effetto si verifichi;
- > **improbabile:** non vi è nessuna indicazione che consenta un’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 trarne delle conclusioni.

Gli effetti esaminati finora vengono inoltre classificati in tre gruppi a seconda della loro **rilevanza per la salute**. Per chiarire la suddivisione delle categorie, sono state scelte delle definizioni diverse rispetto a quelle della pubblicazione UM 162.

- > **malattie e mortalità:** le conseguenze analizzate comportano un pericolo per la salute e rappresentano una drastica riduzione della qualità della vita. Inoltre possono costituire una minaccia per la vita e ridurre la durata della vita. Questa categoria comprende tutte le malattie cancerose, gli aborti spontanei e le malformazioni dei neonati nonché la mortalità elevata;
- > **limitazione del benessere:** 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 psichiche, l’ipersensibilità alle radiazioni elettromagnetiche nonché l’effetto uditivo delle microonde;
- > **variazione di dimensioni fisiologiche:** gli effetti sono misurabili fisiologicamente. Le variazioni osservate si situano nella banda delle fluttuazioni normali per una persona sana. Di per sé non costituiscono un rischio per la salute e non costituiscono una riduzione della qualità della vita, poiché normalmente non possono essere percepite. Inoltre, non è stato accertato se a lungo termine possono rappresentare un rischio per la salute. 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 sulla base dei risultati disponibili è stata valutata una soglia d’effetto inferiore. Per potere almeno paragonare tra loro gli studi concernenti i telefoni cellulari e quelli relativi agli impianti di trasmissione stazionari, si sono dovute uniformare le differenti misure della dose. Quale misura comune della dose è stato impiegato il SAR₁₀ massimo. Questo parametro 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 nella misura del possibile.

Risultati e valutazione degli studi sull'uomo a fine settembre 2006:

La tabella 3 riassume la valutazione dell'evidenza delle ripercussioni sulla salute associate alle radiazioni ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli, tenendo conto di tutti gli studi disponibili fino a fine settembre 2006 eseguiti direttamente con o su persone.

Non vi sono nuovi effetti che possono essere 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, come i pace-maker. Tuttavia, oggi molti apparecchi sono per lo più insensibili alle radiazioni emesse dai telefoni cellulari. Inoltre, è stata dimostrata in modo coerente 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 quando vengono rispettati i valori limite d'immissione, mentre per le radiazioni prodotte dalla telefonia cellulare non vi sono indicazioni in tal senso. È assodato che telefonare al volante comporta un elevato rischio di incidenti, indipendentemente dall'utilizzo di un dispositivo che lasci le mani libere. Tuttavia ciò non è una conseguenza delle radiazioni bensì del fatto che si è distratti al volante.

sicuro

Si continua a ritenere probabile che l'esposizione alle radiazioni emesse da un telefono cellulare modifichi le correnti cerebrali. In riferimento all'EEG spontaneo nel sonno o in condizioni di veglia è stato osservato in modo del tutto coerente l'aumento dell'ampiezza nella banda alfa. In alcuni studi gli effetti sono stati rilevati nei primi quindici minuti successivi all'esposizione. Altrettanto probabili vengono ritenute le alterazioni delle fasi del sonno osservate in diversi studi. Anche nella maggior parte degli esperimenti per accertare i potenziali cerebrali evocati sono stati rilevati degli effetti conseguenti all'esposizione. In due studi riprodotti con metodi migliori non è tuttavia stato possibile confermare i risultati ottenuti precedentemente. 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.

probabile

La comparsa di sintomi non specifici in seguito all'utilizzazione del telefono cellulare come le cefalee, il malessere, la stanchezza, le vertigini e il bruciore della pelle non trova un riscontro in tutti i nove studi. Tuttavia, in parte sono stati riscontrati notevoli difetti metodologici. Assieme ai risultati dei precedenti studi condotti in Scandinavia (cfr. UM 162) si continua a ritenere probabile che l'uso intensivo del telefono cellulare sia associato alla frequenza di sintomi non specifici. Non è possibile valutare se questo fenomeno sia dovuto alle radiazioni ad alta frequenza o ad altri fattori che accompagnano l'uso del telefono cellulare, come per esempio un aumento del livello di stress.

Tab. 3 > Riepilogazione dell'evidenza delle ripercussioni sulla salute associate alle radiazioni ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli (esposizione di persone).

Le indicazioni relative alla soglia d'effetto 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 D'EFFETTO
	Malattie e mortalità	Limitazione del benessere	Variazione di dimensioni fisiologiche		
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)		Sintomi non specifici (cefalee, stanchezza, difficoltà di concentrazione, malessere, bruciore alla pelle ecc.)		Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
			Correnti cerebrali, Fasi di sonno	Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
Possibile (indicazioni isolate di effetti)	Leucemie/linfomi			Trasmettitori radio/TV	in prossimità del valore limite dell'impianto
	Tumori al cervello			Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
		Qualità del sonno		Trasmettitori radiofonici	in prossimità del valore limite dell'impianto
			Funzioni cognitive, tempi di reazione	Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
			Percezione dei campi deboli	Telefoni cellulari	20 mW/kg-2 W/kg
Improbabile (molteplici indicazioni di assenza)	Mortalità			Telefoni cellulari	
	Tumori alle ghiandole salivari			Telefoni cellulari	
Non valutabile (pochi dati)	Carcinoma mammario			Diverse fonti	
	Tumori agli occhi			Telefoni cellulari	
	Tumori ai testicoli			Pistole radar	
	Aborti spontanei			Apparecchi per la diatermia	
		Sintomi non specifici (disturbi del sonno, cefalee ecc.)		Stazioni di base per la telefonia cellulare	
		Condizioni psichiche		Diverse fonti	
			Fertilità	Telefoni cellulari	
			Sistema ormonale	Diverse fonti	
			Sistema immunitario	Diverse fonti	
			Funzioni cardio-circolatorie	Diverse fonti	
			Udito e equilibrio	Telefoni cellulari	
		Genotossicità	Esposizione professionale		

I disturbi del sonno in prossimità di un trasmettitore radiofonico sono stati trattati soltanto nell'ambito di un unico studio, su cui sono state pubblicate delle nuove analisi. Poiché in queste analisi è stato osservato un riscontro, si ritiene possibile, come nella pubblicazione UM 162, che le forti emissioni di questi trasmettitori a onde corte possano compromettere la qualità del sonno.

possibile

I dati scientifici relativi all'influenza dell'esposizione alla telefonia mobile sulle funzioni cognitive sono meno uniformi rispetto alla fine del 2002. La riduzione dei tempi di reazione osservata in precedenza non è stata confermata dagli studi riprodotti in modalità "doppio cieco". L'evidenza degli effetti dell'esposizione alla telefonia mobile sulle funzioni cognitive viene perciò riclassificata rispetto alla pubblicazione UM 162, passando da "probabile" a "possibile".

Nuovi studi provocatori sulla percezione dei campi elettromagnetici deboli dimostrano che persone, le quali attribuiscono i loro sintomi all'esposizione alle radiazioni ad alta frequenza, in una situazione di test in generale non sono in grado di percepire questi campi. Non esistono nuovi studi con test multipli condotti su singole persone. Le indagini precedenti con questa struttura di test lasciavano presupporre che persone dotate di tale capacità di percezione siano molto rare.

Sulla base degli studi pubblicati fino a fine 2002 è stato dichiarato possibile che il rischio di tumori al sistema sanguigno e linfatico aumenti in un ambiente dove sono presenti potenti trasmettitori radiofonici. I due nuovi studi non modificano questa valutazione.

In merito ai rischi di tumore al cervello degli utenti di telefonia mobile, fino a fine settembre 2006 sono state pubblicate singole valutazioni dello studio caso-controllo multicentrico «Interphone», ma solo una presentava dati in pool. Sono inoltre disponibili i risultati di due corposi studi caso-controllo di un gruppo di ricerca svedese. Sulla base di quest'ultimo e dei risultati precedenti nel complesso si deve continuare a ritenere possibile che l'utilizzo intensivo, protratto per molti anni, della telefonia mobile possa essere associato ad un rischio elevato di tumore al cervello.

Relativamente alla mortalità complessiva non sono disponibili nuovi risultati. Sulla base dei risultati precedenti la relazione con l'esposizione alle radiazioni ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli è stata classificata improbabile nella pubblicazione UM 162. Anche il nesso causale fra esposizione alle radiazioni ad alta frequenza e il rischio di ammalarsi di tumore alle ghiandole salivari sembra improbabile sulla base dei dati caso-controllo disponibili.

improbabile

Relativamente ai tumori che colpiscono altri organi, i dati disponibili sono tuttora insufficienti per valutare possibili associazioni. Rientra in questi casi anche il rischio di tumori agli occhi o ai testicoli nonché di carcinoma mammario. Non valutabile è anche l'associazione fra radiazioni ad alta frequenza di persone professionalmente esposte e danni cellulari genotossici. Anche la valutazione degli effetti relativi a pressione sanguigna, battito cardiaco e variabilità della frequenza cardiaca rimane in sospeso. Sulle conseguenze dell'esposizione alle radiazioni ad alta frequenza sul sistema ormonale e

non valutabile

immunitario, sull'udito, sulla fertilità, sugli aborti spontanei e sulle condizioni psichiche i risultati disponibili sono troppo pochi per esprimere una valutazione.

Risultati e valutazione dei programmi di ricerca Perform B e REFLEX (esposizione di cellule e animali)

Due programmi di ricerca, coordinati a livello internazionale, si sono occupati negli ultimi anni delle conseguenze dei campi elettromagnetici sui sistemi biologici. I progetti svolti sotto il nome di "Perform B" hanno riguardato principalmente la duplicazione di studi precedenti con lo scopo di verificarne i risultati, mentre il programma "REFLEX" (Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Energy Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive "in vitro" Methods) aveva per oggetto l'indagine sugli effetti biocellulari dei campi elettromagnetici in condizioni di laboratorio controllate.

Partendo dai risultati degli studi precedenti, nel programma "Perform B" è stato analizzato l'impatto delle radiazioni ad alta frequenza sul patrimonio genetico DNA, sull'attività dell'enzima del metabolismo e sul comportamento degli animali. In parte sono stati ripetuti degli esperimenti con l'obiettivo di fornire una valutazione indipendente dei risultati disponibili, in parte le indagini sono state ampliate o migliorate dal punto di vista della metodologia. Gli studi effettuati su linfociti umani isolati hanno dimostrato che l'esposizione alle radiazioni ad alta frequenza non provoca, né da sola né in combinazione con un mutagene (raggi X), danni visibili al DNA. Anche un'alterazione dell'attività dell'ornitindecarbossilasi (ODC) ha avuto pochi riscontri in diverse condizioni di esposizione. Infine, i ratti e i topi esposti alle radiazioni ad alta frequenza non presentavano alterazioni delle capacità di apprendimento nella misura precedentemente descritta, anche il comportamento fobico e la permeabilità della barriera emato-encefalica non sembrano venire compromessi. Gli esperimenti veramente riprodotti non hanno consentito di confermare i risultati degli studi precedenti.

Il programma "REFLEX" aveva lo scopo di analizzare gli effetti cellulari dell'esposizione alle radiazioni ad alta frequenza in condizioni di laboratorio controllate e standardizzate. Sono stati misurati la frequenza delle rotture dei filamenti di DNA, la presenza di micronuclei e aberrazioni cromosomiche, l'impatto sul ciclo cellulare, la differenziazione cellulare e apoptosi nonché l'espressione di geni. L'esposizione utilizzata ha compreso radiazioni sia ad alta che a bassa frequenza. Nel presente rapporto vengono considerati soltanto i risultati dell'esposizione a radiazioni ad alta frequenza.

La comparsa degli effetti riscontrati in "REFLEX" deve essere considerata attualmente possibile ma non sicura. Questo per il fatto che si tratta di prime osservazioni che non sono state replicate in modo indipendente o che gli esperimenti riprodotti hanno dato risultati contraddittori senza che ne fossero chiari i motivi. La soglia più bassa del SAR (locale) osservata per un effetto corrisponde a 0,3 W/kg e si colloca pertanto nel campo non termico, circa a metà fra il valore limite dell'impianto e il valore limite d'immissione dell'ORNI.

Nelle cellule connettivali sono state osservate rotture dei filamenti di DNA, micronuclei e aberrazioni cromosomiche. In questo contesto sembra essere determinante, oltre all'intensità, anche la modulazione del segnale. Le rotture dei filamenti di DNA di per sé non rappresentano un fatto eccezionale. Si verificano naturalmente e vengono riparate da sistemi propri delle cellule. Attualmente non è chiaro se le rotture dei filamenti accertate come conseguenza dell'esposizione si riparano correttamente o se possono provocare alterazioni permanenti del patrimonio genetico. Il primo caso è supportato dall'osservazione (in esperimenti analoghi con campi a bassa frequenza) che la frequenza delle rotture di filamenti si riduceva dopo alcune ore di esposizione. Il secondo caso invece è sostenuto dalla presenza, oltre a quella delle rotture dei filamenti, di micronuclei e di aberrazioni cromosomiche che sono invece l'espressione di una mutazione permanente. Se questi ultimi risultati verranno confermati con maggior vigore, saranno rilevanti perché potrebbero comportare disfunzioni cellulari. Occorre ancora approfondire le indagini per accertare se gli eventi molecolari riscontrati provocano effettivamente tali disfunzioni. I punti finali oggetto dell'indagine come il ciclo cellulare, la differenziazione cellulare e l'apoptosi non sono stati influenzati in maniera rilevante dalle radiazioni ad alta frequenza. Attualmente rimane da verificare l'importanza degli effetti molecolari accertati per le funzioni cellulari.

Altre indagini avevano l'obiettivo di verificare se l'espressione dei geni è maggiore o minore in seguito all'esposizione alle radiazioni ad alta frequenza. Dalle conoscenze relative ai processi molecolari nella cellula si spera di ottenere maggiori informazioni sulla possibilità, da parte di uno stimolo esterno, di influenzare le funzioni delle cellule. Essendo i geni e le proteine molto numerosi, in questo contesto si è ancora allo stadio della raccolta di dati empirici. L'ipotesi più avanzata è che le radiazioni ad alta frequenza causino stress e la cellula produca, a sua volta, le cosiddette proteine da stress. Le indagini hanno dimostrato che in determinati tipi di cellule l'espressione di singoli geni durante l'esposizione alle radiazioni ad alta frequenza viene influenzata da diversi segni premonitori: la formazione di determinate proteine risulta maggiore, quella di altre invece inferiore. Anche qui sarebbe prevedibile che un'espressione dei geni degenerata possa influenzare punti finali come il ciclo cellulare, la differenziazione cellulare e l'apoptosi, fatto che tuttavia non è stato osservato.

Conclusioni

La quantità di dati scientifici a disposizione è ancora troppo insufficiente per poter permettere una valutazione del rischio per la salute in seguito all'esposizione della popolazione a radiazioni non ionizzanti ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli. Gli studi sperimentali sull'uomo e sulle colture cellulari dimostrano che esistono effetti diretti delle radiazioni ad alta frequenza che non possono essere spiegati solo imputandoli al riscaldamento. Esistono solo pochi studi di lungo periodo sull'uomo nel suo ambiente naturale. Sulle conseguenze per la salute dell'uomo in prossimità di stazioni di telefonia mobile esiste ad oggi un solo studio che soddisfa criteri scientifici.

Allo stato attuale delle conoscenze si possono trarre le conclusioni seguenti:

- > nell'intervallo di dosi inferiori ai valori limite raccomandati dall'ICNIRP e quindi anche al di sotto dei valori limite d'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. In primo luogo si tratta 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 si situa 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 d'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 i trasmettitori radiofonici esistono effetti classificati come possibili. Per le radiazioni prodotte dai telefoni cellulari la soglia d'effetto è situata nello stesso intervallo summenzionato (SAR₁₀ compreso tra i 20 mW/kg e i 2 W/kg), mentre per le radiazioni provenienti dai trasmettitori radiofonici corrisponde a un'intensità di campo prossima al valore limite svizzero dell'impianto;
- > una variazione provvisoria o permanente del patrimonio genetico di determinate cellule viene ritenuta possibile, lo stesso dicasi per l'espressione modificata di geni. La soglia inferiore per il SAR (locale) alla quale nell'esperimento è stato osservato un effetto, è pari a 0,3 W/kg. Il significato di questi risultati per le funzioni cellulari rimane non chiaro.

Dalla pubblicazione UM 162 il quadro complessivo è diventato più variegato, ma i contorni continuano a rimanere incerti. Esistono nuovi studi, soprattutto nel campo sperimentale umano, che hanno utilizzato nuove tecniche o che hanno considerato per la prima volta dei parametri fisiologici finora non analizzati. È aumentato il numero degli effetti osservati scientificamente, per i quali attualmente non può essere valutato se siano attribuibili direttamente alle radiazioni. Alcuni di questi effetti sono potenzialmente molto pericolosi per la salute, per altri invece vi sono dubbi sulla loro pericolosità. Contemporaneamente è aumentato anche il numero degli indicatori di salute per i quali non è stata accertata alcuna relazione con le radiazioni ad alta frequenza. In particolare negli studi sperimentali sarebbe auspicabile che, prima di definire nuovi parametri o sviluppare ulteriori metodi di ricerca, i risultati finora ottenuti venissero verificati su collettività più grandi o più sensibili e includendo il ritardo temporale discusso in alcune sedi. Ad oggi non è possibile fare affermazioni sugli effetti di lungo periodo. Negli studi sulla popolazione la stima dell'esposizione rimane un problema notevole. Proprio in riferimento all'indagine sugli effetti di lungo periodo rimane da sperare che possano contribuire a migliorare la situazione gli apparecchi volti a misurare l'esposizione individuale, attualmente in fase di sviluppo.

Dal punto di vista scientifico non esistono le basi per adattare i valori limite dell'ICNIRP e quindi anche i valori limite d'immissione previsti dall'ORNI. Non si

può tuttavia valutare in modo conclusivo se questi valori limite offrono una protezione sufficiente dai danni di lungo periodo. Questo vale anche per l'esposizione nell'ambito dei valori limite dell'impianto previsti dall'ORNI, poiché anche in questo intervallo di dosi esistono indicazioni di possibili conseguenze 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.

> Summary

In spring 2003, the predecessor of the FOEN – the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) – published a report based on more than 200 scientific studies carried out on human beings for the purpose of assessing the health risks associated with exposure to high frequency non-ionising radiation in the low dose range. The report (“Umweltmaterialien Nr. 162, BUWAL 2003 – hereinafter referred to as “UM 162”) summarised and evaluated the status of knowledge as of the end of 2002.

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, lying below the limit value for the local specific absorption rate recommended by the International Commission for Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP). Thermal effects that occur at higher intensities are sufficiently known and are not dealt with in the present report.

The epidemiological and experimental studies on the exposure of human beings to high frequency radiation were pursued further and updated. The first update of the status of scientific knowledge was published as “Supplement A” in spring 2004, and is now superseded by the present report. It is based on almost 150 scientific publications on the exposure of human beings to high frequency radiation that have been published in the period from the end of 2002 to September 2006. The studies conducted on human beings were collected and assessed by the ELMAR documentation centre at the Institute for Social and Preventive Medicine at the University of Basel. Please refer to the ELMAR database (which is available for public access) for further details (www.elmar.unibas.ch/index.html). In addition, this report evaluates the findings from the internationally co-ordinated research programmes, “Perform B” and “REFLEX”, which focused on exposure of cells and animals (and not humans) to high frequency radiation. This section of the report was prepared by the Centre for Biomedicine at the University of Basel.

As was the case in UM 162, for each biological effect studied to date relating to exposure to high frequency radiation, on the basis of all existing studies on the respective effects the **evidence** for the existence of the effect was assessed using a differentiated scale. Classification was carried out in accordance with the system defined by the World Health Organisation (WHO) for assessing the carcinogenic properties of a given substance or agent (<http://monographs.iarc.fr>). This classification was adopted and extended to include non-carcinogenic effects. The criteria for each evidence level are:

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

- > **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 attributable to methodological weaknesses. The scientific evidence is corroborated by case reports. Classification as “possible” refers to the correlation between exposure and effect. It does not indicate an assessment of the probability of the occurrence of the effect.
- > **Improbable:** There are no indications of an association, but multiple indications of its absence. No theoretically plausible biological model exists.
- > **Not assessable:** The scientific basis is too limited 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. In order to make a clearer distinction between these categories, different designations have been used here versus those that were applied in UM 162:

- > **Diseases and mortality:** The effect causes serious health problems that lead 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, stillbirths and deformities 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 non-specific health symptoms such as headaches, insomnia, mental symptoms, electromagnetic hypersensitivity and microwave hearing.
- > **Physiological changes:** 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, genotoxic effects, variability in EEG readings and changes in the perception and processing of stimuli.

For effects classified as established, probable or possible, a lower exposure threshold for their appearance was estimated on the basis of the results of available studies. To enable the results of studies on mobile telephones, stationary transmission installations and exposure in experimental settings to be compared, the different dose metrics had to be standardised. Maximum SAR₁₀ was chosen as the common dose metric. This specifies the amount of radiation that is absorbed locally 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.

Results and evaluation of studies on humans as of the end of September 2006

Table 4 contains a summary of the evaluation of the evidence pointing to health effects caused by high frequency radiation in the low dose range, taking account of the results of all available studies carried out directly with or on human beings, up to the end of September 2006.

There are no new effects that may be regarded as established. It is generally accepted that high frequency radiation may impair the function of technical appliances, and in the case of implanted medical devices (e.g. cardiac pacemakers), this may have consequences on health. However, many devices in use today are largely insensitive to radiation from mobile telephones. Acoustic perception (microwave hearing) was consistently identified for pulsed radiation exceeding a given energy per pulse. In the case of radar installations, this phenomenon may occur even when the exposure limit values are observed, while there are no indications that this is also the case with mobile communication equipment. It is known that the risk of accidents is higher when telephone calls are made during driving, whether a hands-free set is used or not. However, this does not result from the radiation as such, but rather from the associated distraction.

established

It is still regarded as probable that exposure to mobile telephones leads to a change in the electric activity of the brain. In spontaneous EEG tests on subjects who were either asleep or awake, the most consistent effect observed was an increase in amplitude of the electroencephalogram alpha band. In several studies, effects were identified during the first fifteen minutes after termination of exposure. Changes in sleep phases, which were observed in a number of studies, are also regarded as probable. Exposure effects were also observed in most experiments aimed at studying the evoked brain potentials. However, earlier findings were not confirmed by two replication studies using improved methods. The effects occurred at very low radiation intensities, and may therefore not be explained by the conventional thermal model.

probable

With respect to the occurrence of non-specific symptoms (e.g. headaches, discomfort, fatigue, dizziness and burning skin) from the use of mobile telephones, not all the new studies were able to identify a correlation, and some suffered from methodological weaknesses. In view of these findings, together with the results of earlier Scandinavian studies (cf. UM 162), it is still regarded as probable that frequent use of mobile telephones is associated with an increase in non-specific symptoms. It could not be determined, however, whether this increase is due to high frequency radiation or other factors relating to the use of mobile telephones, e.g. higher stress levels.

Tab. 4 > Summary of the evidence for high frequency radiation effects on health at low dose levels (exposure of human beings).

The figures for the effect threshold (given in mW/kg or W/kg) are only intended as a rough guide. They refer to the maximum local specific absorption rate (SAR_{10}) occurring in the body.

EVIDENCE	EFFECT			EXPOSURE SOURCE	EFFECT THRESHOLD
	Diseases and mortality	Reduced well-being	Physiological changes		
Established (consistent findings)		Interference effects on implanted medical devices		Electronic appliances (e.g. mobile tele-phones)	
		Microwave hearing		Radar installations	Energy < flux density per pulse > 20 mJ/m ²
Probable (multiple indications)		Non-specific symptoms (headaches, fatigue, problems of concentration, disquiet, burning skin, etc.)		Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
			Brain activity Sleep phases	Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
Possible (isolated indications)	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
		Sleep quality		Radio transmitters	In the region of the installation limit value
			Cognitive functions, reaction times	Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
			Ability to perceive weak electromagnetic fields	Mobile telephones	20 mW/kg–2 W/kg
Improbable (multiple indications of absence of the effect)	Mortality			Mobile telephones	
	Salivary gland tumours			Mobile telephones	
Not assessable (insufficient data)	Breast cancer			Various	
	Eye tumours			Mobile telephones	
	Tumours of the testicles			Radar guns	
	Stillbirth			Diathermal appliances	
		Non-specific symptoms (insomnia, headaches, etc.)		Mobile telephone base stations	
		Mental symptoms		Various	
			Fertility	Mobile telephones	
			Hormone system	Various	
			Immune system	Various	
			Cardiovascular functions	Various	
			Hearing and balance	Mobile telephones	
		Genotoxicity	Exposure at the workplace		

As before, only one study has been carried out to date that focuses on sleep-related problems suffered by persons living in the vicinity of a radio transmitter, and new evaluations have been published concerning this study. Since a correlation was observed here, it is regarded as possible – as was the case in UM 162 – that emissions from powerful short-wave radio transmitters can have an effect on the quality of sleep.

possible

The findings relating to the influence of mobile phone exposure on cognitive functions are less uniform than they were at the end of 2002. In double-blind replication studies, the previously observed shortening of reaction times was not confirmed. The evidence for the effects of mobile phone exposure on cognitive functions has therefore been downgraded from probable to possible.

The new provocation studies on the ability to perceive weak electromagnetic fields show that even people who attribute their symptoms of reduced well-being to exposure to high frequency radiation are generally unable to perceive these fields in a test situation. No new studies have been carried out in which multiple tests were performed on the same person. Earlier studies have led to the assumption that there might be very few people who have the ability to perceive weak electromagnetic fields.

On the basis of studies published up to the end of 2002 it was regarded as possible that the risk for tumours of the haematopoietic and lymphatic systems is higher in the vicinity of powerful broadcasting stations. The two new studies do not alter this evaluation.

With respect to the risk of brain tumours in users of mobile telephones, some evaluations of the so called “Interphone” multicentric case-control study were published up to the end of 2006, but only one of these contained pooled data. In addition, findings are available from two large-scale case-control studies conducted by a Swedish research group. In view of these and earlier results it has to be generally regarded as possible that intensive long-term use of mobile telephones could lead to an increased risk of brain tumours.

There are no new findings relating to total mortality. On the basis of the results of earlier studies, a correlation with exposure to high frequency radiation in the low dose range was assessed as improbable in UM 162. Similarly, in view of the existing case-control data, a causal relationship between exposure to high frequency radiation and the risk of contracting a salivary gland tumour also appears to be improbable.

improbable

With respect to tumours of other organs, the scientific basis is still too limited to permit the assessment of possible associations. This includes the risk of tumours of the eyes and testicles, as well as breast cancer. It is also not assessable whether exposure to high frequency radiation at the workplace can lead to genotoxic cell damage. Similarly, an assessment of the effects on blood pressure, pulse rate and heart rate variability cannot be made at this time. And as before, the scientific basis is still too limited to permit an

not assessable

assessment of the evidence for effects of exposure to high frequency radiation on the hormone and immune systems, hearing, fertility, the stillbirth rate and mental health.

Findings and evaluation of Perform B and REFLEX (exposure of cells and animals) research programmes

In the past few years, two internationally co-ordinated research programmes have studied the effects of electromagnetic fields on biological systems. The projects initiated by the “Perform B” programme primarily concerned the replication of earlier studies with the aim of re-examining the various findings, while the REFLEX programme (full name: “Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards from Low Energy Electromagnetic Field Exposure using Sensitive “in vitro” Methods”) focused on studying the effects of electromagnetic fields on cells under controlled laboratory conditions.

On the basis of findings from earlier studies, the “Perform B” programme set out to study the influence of high frequency radiation on the genetic material DNA, the activity of a metabolic system enzyme and the behaviour of animals. To some extent these took the form of replication experiments that were carried out in order to independently re-examine already existing findings, while other studies were extended or improved in terms of methodology. The various studies showed that exposure to high frequency radiation did not lead to any detectable DNA damage in isolated human lymphocytes, either on their own or in combination with a mutagen (X-ray). Similarly, no evidence was found of any change in the activity of ornithine decarboxylase under varying exposure conditions. Finally, no altered learning patterns of the type that had been described earlier was detected in rats and mice exposed to high frequency radiation, nor did their anxiety behaviour and the permeability of the blood brain barrier appear to be affected in any way. Insofar as these were genuine replication experiments, the results obtained from earlier studies were thus not confirmed.

In the “REFLEX” programme the aim was to study the effects of high frequency exposure on cells under standardised, strictly controlled laboratory conditions. Here the frequency of DNA strand breaks, the occurrence of micronuclei and chromosome aberrations, influences on the cell cycle, cell differentiation and cell death, as well as the expression of genes, were measured. Tests were carried out with exposure to both high frequency and low frequency radiation, but for the purposes of this report, only the results obtained from exposure to high frequency radiation have been considered.

The occurrence of effects identified in “REFLEX” can currently be regarded as possible, but not established. This is because the findings were obtained from initial observations that have not yet been independently replicated, or because replication experiments yielded contradictory results that have not yet been satisfactorily explained. The lowest threshold for the (local) SAR at which an effect was observed is 0.3 W/kg, which is in the non-thermal range, roughly half-way between the installation limit value and the exposure limit value stipulated in the Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation Protection.

In connective tissue cells, temporary DNA strand breaks were observed and there were occurrences of micronuclei and chromosome aberrations. Here, the modulation of the signal appears to be decisive, along with the intensity and duration. DNA strand breaks are in themselves nothing out of the ordinary. They occur naturally and are corrected by repair mechanisms within the cell. At present it is not clear whether the temporary strand breaks identified as the consequence of exposure are repaired correctly, or whether they may lead to permanent changes in the genetic substance. The observation made during similar experiments with low frequency fields, namely that the frequency of strand breaks decreases again after several hours of exposure, points in favour of the former. However, the fact that micronuclei and chromosome aberrations were observed in addition to strand breaks, would appear to favour the latter, since they constitute permanent alterations of the genetic material. Should the latter case be confirmed, this would be significant, since it would mean that cellular dysfunctions would have to be expected. The question of whether the identified molecular occurrences truly lead to such dysfunctions needs to be studied more thoroughly. The end points investigated, such as cell cycle, cell differentiation and cell death were either not influenced at all by exposure to high frequency radiation, or at most only to a minor extent. The degree to which the molecular effects identified are of importance for cell functions therefore still needs to be clarified.

Other studies focused on the question whether genes are expressed more strongly or more weakly as a consequence of exposure to high frequency radiation. It is hoped that, by learning more about molecular processes in cells, we will be able to understand more clearly how an external stimulus can affect cell function. However, given the large number of genes and proteins, we are currently only in the initial stage of collecting empirical data. The most advanced hypothesis is that high frequency radiation acts as a stressor and the cell thus forms stress proteins. The studies showed that, in certain cell types, the expression of individual genes when exposed to high frequency radiation is influenced in various ways: some proteins appear to be increased, while others are reduced. Here, too, we would expect that a deregulated gene expression can influence end points such as cell cycle, cell differentiation and cell death, but this was not observed.

Conclusions:

There are still many gaps to be filled in the scientific basis for assessing the risk to human health associated with high frequency radiation in the low dose range. Experiments conducted on humans and on cell cultures indicate direct effects of high frequency radiation that cannot be explained by the thermal concept. Very few long-term studies have been carried out on human beings in their natural environment and only one study focussing on the effects on the health of people living in the vicinity of mobile telephone base stations meets the minimum scientific standards.

The following conclusions may be drawn from the present-day status of knowledge:

- > No new established effects on health have been identified in the dose range below the limit level recommended by the ICNIRP, and thus below the exposure limit level specified in the ONIR.
- > A number of effects associated with the exposure of human beings to radiation from mobile telephones may be regarded as probable. These are primarily effects for which the relevance to health is uncertain. They occur at a local SAR₁₀ in the range from 20 mW/kg to 2 W/kg, i.e. below the level of 2 W/kg recommended by the ICNIRP. A rough estimate indicates that the radiation from stationary transmitters would have to reach an intensity that lies between Switzerland's specified installation limit value and the exposure limit value in order to produce a comparable SAR₁₀. This permits the general conclusion that effects due to exposure to mobile telephones that are classified as probable are not to be expected below Switzerland's specified installation limit values.
- > Effects on human health that are classified as possible occur in association with both mobile telephones and broadcasting stations. For radiation from mobile telephones, the effect threshold is within the same range as cited above (SAR₁₀ between 20 mW/kg and 2 W/kg), while for radiation from broadcasting stations it is at a field strength around Switzerland's installation limit value.
- > A temporary or permanent alteration of the genetic material of certain cells is regarded as possible, as is an altered expression of genes. The lowest threshold for (local) SAR at which an effect was observed in the experiment on cells was 0.3 W/kg. The significance of these findings as far as cell functions are concerned is uncertain at this time.

Although the picture has become broader since the publication of UM 162, it has not grown clearer. Especially in the area of experimentation involving human beings, new studies have been carried out using new technologies or incorporating physiological parameters that had barely been analysed before. The number of scientifically observed effects for which it is currently not possible to assess whether they are causally related to radiation, has increased. While some of these effects are known to have the potential to cause serious harm to health, for others this is uncertain. At the same time, there has been an increase in the number of health parameters for which no association with high frequency radiation has been ascertained. Especially where experimental studies are concerned, it would be beneficial if the findings could be re-tested on larger or more sensitive populations, taking into account the often cited time delay, before new targets are envisaged or other research methods are developed. Until then, it is not possible to draw conclusions regarding long-term effects. In population studies, estimating the degree of exposure remains a major problem. It is to be hoped that the new devices which are currently being developed to measure individual exposure will help the study of long-term effects to progress.

From the scientific point of view there are no grounds for adjusting the limit values of the ICNIRP or the exposure limit values specified in the ONIR (which are based on the ICNIRP levels). However, it is still not possible to determine whether these limit values also offer sufficient protection against long-term harm. This also applies to

exposure at levels around the installation limit values specified in the ONIR, since at this level of dosage, too, there are still some indications of potential health-relevant effects. From a scientific standpoint the precautionary approach to non-ionising radiation should be maintained and research intensified.

> Einleitung

Seit der Einführung und flächendeckenden Verbreitung des Mobilfunks in den letzten zwei Jahrzehnten hat die Frage nach allfälligen Risiken für die Gesundheit der Bevölkerung an Bedeutung gewonnen. Eine erste Beurteilung dieses Gesundheitsrisikos erfolgte im Bericht «Hochfrequente Strahlung und Gesundheit», der den wissenschaftlichen Kenntnisstand bis Ende 2002 enthielt (Umweltmaterialien Nr. 162). In der vorliegenden Arbeit werden nun die Resultate derjenigen Studien zusammengefasst und bewertet, die seither bis Ende September 2006 erschienen sind. Das Ergebnis dieses Syntheseberichts ist eine aktualisierte Beurteilung gesundheitlicher Risiken auf der Basis der früheren und der neueren Studien.

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 von der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) empfohlenen Grenzwerte und die auf dieser Empfehlung basierenden Immissionsgrenzwerte (IGW) der schweizerischen Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) im Lichte der neuesten Forschungsergebnisse einen genügenden Schutz für die Bevölkerung gewährleisten. Als «niedrige Dosis» wird im folgenden der Dosisbereich unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte verstanden.

Für die Bewertung gesundheitlicher Risiken 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 häufig Expositionen, denen die Bevölkerung auch real ausgesetzt ist. Humanstudien bilden den Schwerpunkt des vorliegenden Syntheseberichts.

Die meisten humanexperimentellen Studien befassen sich mit unmittelbaren Wirkungen beim Gebrauch von Mobiltelefonen. Mobiltelefone und andere mobile Geräte unterliegen zwar nicht der NISV, 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.). Zur Exposition durch Mobilfunkbasisstationen gibt es einzelne experimentelle Untersuchungen und Bevölkerungsstudien.

Zusätzlich zu Humanstudien wurde im vorliegenden Bericht auch eine Auswahl von experimentellen Studien an Zellen und Tieren aufgenommen. Es handelt sich um die beiden international koordinierten Forschungsprogramme Perform B und REFLEX, die eine Vielzahl von Einzeluntersuchungen an verschiedenen biologischen System um-

fassten. Experimentelle Untersuchungen an Tieren und Zellen dienen in erster Linie der Erforschung der zugrunde liegenden Wirkungsmechanismen.

Neue technische Entwicklungen gibt es im Bereich der drahtlosen Netzwerke, die Computer oder andere elektronische Geräte über eine Funkverbindung im Frequenzbereich von 2400 bis 5800 MHz mit anderen Computern, Peripheriegeräten oder mit dem Internet verbinden. Zu diesen neuen Technologien gehören Systeme wie Bluetooth, «Wireless Local Area Network» (WLAN) und «Wireless Metropolitan Area Network» (WMAN). Es ist davon auszugehen, dass sich diese Netzwerke in den nächsten Jahren schnell weiter entwickeln und verbreiten werden. Ein Überblick über die bereits vorhandenen Technologien und die damit einhergehende Hochfrequenzexposition ist in einem Bericht einer interdepartementalen Arbeitsgruppe enthalten, der im Januar 2007 vom Bundesrat verabschiedet wurde (BAG 2007). Zu biologischen Auswirkungen der Hochfrequenzexposition durch drahtlose Netzwerke gibt es noch keine Studienergebnisse.

Eine Darstellung der physikalischen Grundlagen und der technischen Anwendungen der Hochfrequenzstrahlung sowie der verschiedenen Techniken der Mobilkommunikation ist in Bericht UM 162 zu finden. Ebenfalls in diesem Bericht enthalten sind grundlegende Informationen zur Exposition der Bevölkerung gegenüber Hochfrequenzstrahlung sowie ein Überblick über die ICNIRP-Richtwerte und die in der Schweiz geltenden Grenzwerte. Dort ist auch erläutert, wie verschiedene Expositionsmasse (elektrische und magnetische Feldstärke, spezifische Absorptionsrate SAR, Sendeleistung von Mobiltelefonen) miteinander verglichen werden können.

In Kapitel 1 wird die Methodik beschrieben, die bei der Auswahl der Studien am Menschen und bei der Bewertung der Resultate verwendet wurde. In Kapitel 2 werden die Forschungsergebnisse der Humanstudien detailliert dargestellt und bezüglich ihrer gesundheitlichen Bedeutung bewertet. Diese beiden Kapitel wurden von der Dokumentationsstelle ELMAR am Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel erarbeitet. In Kapitel 3 findet sich die detaillierte Beschreibung und Bewertung der beiden Forschungsprogramme Perform B und REFLEX. Für diesen Teil ist das Zentrum für Biomedizin der Universität Basel verantwortlich.

1 > Methodik

1.1 Kriterien für die Auswahl der Humanstudien

Für das Kapitel 2 des Berichts wurden ausschliesslich Untersuchungen berücksichtigt, die biologische Auswirkungen der hochfrequenten nichtionisierenden Strahlung im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz am Menschen untersuchten. Dabei handelt es sich um Experimente und um epidemiologische Studien an verschiedenen Bevölkerungsgruppen.

Die systematische Literaturrecherche erfolgte in den Datenbanken «Medline/PubMed» (www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=PubMed), «ISI Web of Knowledge» (<http://portal.isiknowledge.com>), «EMBASE» (www.embase.com), «SCOPUS» (<http://info.scopus.com>), «Dokumentationsstelle ELMAR» der Universität Basel (www.elmar.unibas.ch) und «EMF-Portal» der Universität Aachen (www.emf-portal.de). Es wurde nach folgenden Stichworten und Kombinationen davon gesucht (in Englisch): elektromagnetische Felder, nichtionisierende Strahlung, Mobilfunk, Mobiltelefon, Basisstation, Gesundheit, Hochfrequenz, Radiofrequenz, Mikrowellen. Die Vollständigkeit der Suche wurde mit den Suchfunktionen «related articles» und «citation finder» überprüft.

Berücksichtigt wurden wissenschaftliche Publikationen, in denen Originaldaten am Menschen erhoben und ausgewertet wurden. Dazu gehören auch gepoolte Auswertungen der Ergebnisse mehrerer Einzelstudien und Meta-Analysen. Bei den Publikationen handelt es sich fast ausschliesslich um Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften nach einem Peer-Review-Prozess. Die Literaturrecherchen wurden am 30. September 2006 abgeschlossen.

Zur Überprüfung der Vollständigkeit der Recherche dienten Übersichtsarbeiten und Expertenberichte. Die Ergebnisse von Studien zu technischen und methodischen Aspekten der EMF-Forschung, unter anderem zu Expositionsabschätzung, Messverfahren, Studiendesign und Auswertungsmethodik wurden als Hintergrundinformation zur Kenntnis genommen. Arbeitsmedizinische Untersuchungen wurden nur berücksichtigt, wenn sie auf Personen mit beruflicher Hochfrequenzexposition fokussiert waren und Messungen der Exposition durchgeführt wurden.

Keinen Eingang in die folgende Übersicht fanden Erfahrungsberichte, Fallbeschreibungen, hypothetische Abhandlungen sowie Arbeiten, die nur als Leserbriefe oder Kongressbeiträge in Form von Referaten, Postern oder Abstracts veröffentlicht wurden. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden Untersuchungen, die nur in osteuropäischen oder asiatischen Sprachen publiziert wurden. Studienresultate zu therapeutischen oder telemedizinischen Anwendungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern, zu Interferenzerscheinungen mit elektrischen Geräten oder zur Risikowahrnehmung im

Zusammenhang mit der Belastung durch elektromagnetische Strahlen waren nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts.

1.2 Kriterien für die Bewertung der Humanstudien

Wie bereits in Bericht UM 162 wurde für jede bisher untersuchte biologische Wirkung im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber hochfrequenter, nichtionisierender Strahlung auf der Basis aller zum jeweiligen Effekt verfügbaren Studien die **Evidenz** für das Vorhandensein des Effektes auf einer differenzierten Skala bewertet. Die Einteilung erfolgte in Anlehnung an die Klassifikation der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zur Bewertung der Kanzerogenität einer Substanz oder eines Agens (<http://monographs.iarc.fr>). Diese Klassifikation wurde im Wortlaut übernommen und auf nichtkanzerogene Auswirkungen ausgedehnt. Die Kriterien für jede Evidenzstufe sind.

- > **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 möglicherweise auf methodische Schwächen in den Studien zurückzuführen. Die wissenschaftlichen Hinweise werden durch Einzelfallberichte gestützt. Die Beurteilung als «möglich» bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen Exposition und Auswirkung. Es handelt sich nicht um eine Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit des Effekts.
- > **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. Zudem wurden die bisher untersuchten Wirkungen der Hochfrequenzstrahlung bezüglich ihrer **Gesundheitsrelevanz** in drei Gruppen eingeteilt. Um die Einteilung der Kategorien zu verdeutlichen, wurden für diese drei Gruppen von UM 162 abweichende Bezeichnungen gewählt.
- > **Erkrankungen und Sterblichkeit:** Bei den untersuchten Auswirkungen handelt es sich um Beeinträchtigungen der Gesundheit, die eine drastische Einschränkung der Lebensqualität darstellen. Sie können lebensbedrohlich sein und die Lebenserwartung reduzieren. Diese Kategorie umfasst alle Krebserkrankungen, 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.
- > **Veränderung physiologischer Grössen:** 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, gentoxische Effekte, Veränderungen im EEG sowie veränderte Reizwahrnehmung und Reizverarbeitung.

Experimentelle Studien am Menschen können aus ethischen Gründen keine gravierenden gesundheitlichen Effekte untersuchen. Die Höhe und Zeitdauer der Exposition ist darauf ausgelegt, unmittelbare biologische Reaktionen zu untersuchen, aus denen häufig nicht auf ein Krankheitsrisiko geschlossen werden kann.

Für Effekte, deren Vorhandensein als gesichert, wahrscheinlich oder möglich eingestuft wird, wurde zusätzlich aus den vorliegenden Studienergebnissen eine untere **Expositionsschwelle** für das Auftreten des jeweiligen Effekts abgeschätzt. Dabei wird grob zwischen vier Stufen unterschieden.

- > unterhalb der schweizerischen Anlagegrenzwerte ($< 3 \text{ V/m}$, lokale $\text{SAR}_{10} < 2 \text{ mW/kg}$)
- > im Bereich der schweizerischen Anlagegrenzwerte ($3\text{--}10 \text{ V/m}$, lokale $\text{SAR}_{10} \approx 2\text{--}20 \text{ mW/kg}$)
- > zwischen den schweizerischen Anlagegrenzwerten und den ICNIRP-Grenzwerten (ca. $10\text{--}100 \text{ V/m}$, lokale $\text{SAR}_{10} \approx 0.02\text{--}2 \text{ W/kg}$)
- > oberhalb der ICNIRP-Grenzwerte ($> 100 \text{ V/m}$, lokale $\text{SAR}_{10} > 2 \text{ W/kg}$)

2 > Auswirkungen auf den Menschen

2.1 Struktur des Ergebnisteils

In diesem Kapitel werden die seit Ende 2002 bis Ende September 2006 publizierten Forschungsergebnisse zu den einzelnen Gesundheitseffekten 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 untersuchten mehrere gesundheitliche Auswirkungen und finden sich deshalb in mehreren Unterkapiteln. Die methodischen Hauptaspekte werden dann nur bei der ersten Erwähnung einer solchen Studie erläutert. Ein gegenüber UM 162 neues Thema sind die Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf das Gehör und das Gleichgewichtsorgan.

Die neuen Studienresultate wurden in die Übersichtstabellen des Berichts UM 162 integriert und grau hinterlegt. Neu werden die Ergebnisse den Kategorien «signifikante Assoziation» und «keine oder nicht signifikante Assoziation» zugeordnet. Um die Einheitlichkeit zu gewährleisten, wurden auch die älteren Einträge entsprechend angepasst. Die Tabellen enthalten folgende Informationen, falls diese aus den Publikationen zu entnehmen waren.

> Expositionsquelle

Es wird angegeben, durch welche Anlage oder welches Gerät die Exposition erfolgt. Wenn es sich nicht um ein Mobiltelefon in normaler Gesprächsposition handelt, wird der Abstand der Anlage/des Geräts zur Versuchsperson angegeben.

> Dauer der Exposition

U: unmittelbar (max. 1 Stunde); K: kurz (bis maximal 3 Tage); M: Mittel (3 bis 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.

> Signal resp. Modulationstyp, Frequenz in MHz

> Intensität der Strahlung

Das Originalmass, das in der Studie publiziert wurde, ist in normalem Druck angegeben. Damit die Intensitäten grob vergleichbar sind, wurde soweit möglich gemäss den in UM 162 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 Expositionsmaß 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.

- > In 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. In den Tabellen wird zwischen statistisch signifikanten Befunden ($\alpha = 5\%$) und Assoziationen ohne statistische Signifikanz unterschieden. In der Spalte «keine oder nicht signifikante Assoziation» sind Resultate aufgeführt, für die in den Analysen kein oder höchstens ein statistisch nicht signifikanter Zusammenhang beobachtet wurde. Letzteres sind beispielsweise nicht signifikante Trends bei Modellen mit mehreren Expositionsklassen, Unterschiede im Bereich von einer Standardabweichung etc. Auch bei statistisch nicht signifikanten Resultaten wird die Richtung des Effekts mit (+) oder (–) gekennzeichnet.
- > Bei epidemiologischen Studien zur Untersuchung von Krebs oder anderen Erkrankungen wurde das Risiko mit seinem Vertrauensintervall quantifiziert. Diese Angaben sind in der Tabelle enthalten. In diesem Fall ist in der Spalte «Mass» 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 in der Spalte «Bemerkungen» notiert.
- > Am Schluss jedes Unterkapitels wird für den jeweiligen Effekt eine Gesamtbeurteilung der vorliegenden Evidenz vorgenommen, die auch die Erkenntnisse der früheren Studien einschliesst.

2.2 Physiologische Wirkungen

2.2.1 Hormonsystem

Zur Auswirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf den Hormonstoffwechsel des Menschen gibt es bisher nur wenige Studien. Die Exposition gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern wurde dagegen in zahlreichen Studien evaluiert, in denen es vor allem um Auswirkungen auf den Melatoninhaushalt ging. Wie in Bericht UM 162 erwähnt, betrafen die wenigen Studien zur hochfrequenten Exposition ebenfalls den Melatoninstoffwechsel, aber auch die Schilddrüsenhormone (Trijodthyronin und Thyroxin) sowie die Stresshormone Kortison, Adrenalin und Noradrenalin. Die Ergebnisse waren nicht einheitlich, und ihre Vergleichbarkeit durch Unterschiede im Studiendesign und in der Exposition eingeschränkt.

Seit dem Bericht UM 162 sind fünf Publikationen zu Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf den Hormonhaushalt erschienen.

In der einfach verblindeten Studie von Jarupat et al. 2003 benutzten acht Frauen an zwei Tagen zwischen 19 Uhr und 1 Uhr jeweils 30 Minuten pro Stunde ein Mobiltelefon am linken Ohr. Einmal handelte es sich um reale Exposition, einmal um Scheinexposition. Analysiert wurde die Melatoninkonzentration im Speichel um 19 Uhr und um 2 Uhr nachts. Die Durchschnittswerte am Abend unterschieden sich nicht zwischen Exposition und Scheinexposition. Die nächtliche Messung ergab eine statistisch signifikant niedrigere Melatoninkonzentration bei Mobiltelefonexposition ($p < 0.05$). In der Publikation fehlen Angaben zur Exposition, unter anderem der SAR-Wert.

Resultate

Die Publikation von Santini et al. 2003 enthält einen Kurzbericht über einen einfach verblindeten Vergleich der Melatoninwerte im Urin von sechs Frauen mit beruflicher Exposition durch Computerbildschirme und sieben Frauen ohne solche Tätigkeit. Die Messungen über zehn Stunden ergaben für die exponierte Gruppe einen statistisch signifikant niedrigeren Mittelwert (-54%). Da es sich bei der Bildschirmexposition überwiegend um niederfrequente Felder handelt und sowohl die tatsächliche Exposition als auch die Vergleichbarkeit der beiden Gruppen unklar ist, werden die Ergebnisse nicht in die Tabelle aufgenommen.

In der arbeitsmedizinischen Studie von Bergamaschi et al. 2004 wurde die Schilddrüsenfunktion von 2598 Angestellten mit unterschiedlicher Mobiltelefonbenutzung untersucht. Neben den Blutwerten des Schilddrüsenhormons Thyroxin analysierten die Autoren auch das Thyreotropin (TSH), das in der Hirnanhangdrüse gebildet wird und die Funktion der Schilddrüse steuert. Die Studienteilnehmer füllten einen Fragebogen zur Mobiltelefonbenutzung aus, die Informationen zur Dauer der privaten und beruflichen Gespräche stammten von Mobilfunkbetreibern. Gemäss diesen Angaben wurden die Teilnehmer in drei Gruppen eingeteilt (< 19, 19 bis 33, > 33 Stunden Mobiltelefonbenutzung pro Monat). In der obersten Kategorie hatten 9.9% der Personen einen zu niedrigen TSH-Blutspiegel (< 0.4 UI/l), in der Gruppe mit der niedrigsten Mobiltele-

fonbenutzung traf das auf 6 % zu. Dieser Unterschied war statistisch signifikant. Es bestanden keine signifikanten Unterschiede für freies Thyroxin und andere Blutwerte. Wie die Autoren selbst anmerken, ist mit diesen Daten nicht beurteilbar, ob die beobachtete Differenz auf die Mobiltelefonexposition zurückzuführen ist oder auf andere Faktoren wie z. B. Stress.

Wood et al. 2006 berichten in ihrer Veröffentlichung über die Ergebnisse zum Melatonin im Rahmen einer doppelt verblindeten Crossover-Studie zu Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf den Schlaf (Loughran et al. 2005, siehe Kap. 2.3.3). Im Abstand von einer Woche verbrachten 55 Probanden zweimal zwei Nächte im Schlaflabor. Nach einer Adaptationsnacht folgte jeweils eine Nacht mit Mobiltelefonexposition bzw. Scheinexposition. Das Mobiltelefon befand sich an der rechten Kopfseite der Probanden, die Exposition dauerte 30 Minuten und endete ungefähr 20 Minuten vor dem Zubettgehen. Die Konzentration des Melatoninmetaboliten 6-Sulfatoxymelatonin (6-OHMS) im Urin wurde direkt nach der Exposition und am nächsten Morgen um 6 Uhr bestimmt. Die 6-OHMS-Menge unterschied sich weder zwischen Mobiltelefonexposition und Scheinexposition, noch vor und nach dem Schlaf signifikant. Wenn die Melatoninmenge auf die Kreatininkonzentration bezogen wurde (Normalisierung), zeigte sich abends nach Mobiltelefonexposition ein signifikant niedrigerer Wert als nach Scheinexposition (5.6 ± 0.6 ng/mg Kreatinin vs 7.7 ± 1.3 ng/mg Kreatinin, $p=0.037$). Die morgendlichen Vergleichswerte unterschieden sich nicht. Als Erklärungsansätze diskutieren die Autoren einen verzögerten Beginn der Melatoninsekretion nach Mobiltelefonexposition.

Die Publikation von Altpeter et al. 2006 betrifft den Kurzwellen-Radiosender Schwarzenburg und enthält die Ergebnisse der «Shut-down-Studie» zur Veränderung des Melatoninstoffwechsels nach der endgültigen Einstellung des Sendebetriebs am 29.3.1998. Neben dem Melatoninhaushalt wurde auch die Schlafqualität der Anwohner vor und nach der Abschaltung des Senders untersucht (siehe Kapitel 2.3.3). Die Studie begann eine Woche vor diesem Termin und endete eine Woche danach. Die 54 Teilnehmer, die im Umkreis von ungefähr 3 km um den Sender herum wohnten, gaben täglich fünf Speichelproben zur Untersuchung der Melatoninkonzentration ab. Während des Sendebetriebs lag die durchschnittliche Magnetfeldexposition (24-Stunden-Mittelwert) in der Gruppe der gering Exponierten ($n=27$) bei 0.4 mA/m, in der stärker exponierten Gruppe bei 2.6 mA/m. Unterschiede in der Melatoninkonzentration sowie die Veränderungen nach Expositionsende wurden unter Berücksichtigung der Faktoren Alter und Geschlecht analysiert. Es zeigte sich ein tendenzieller Anstieg der Melatonausschüttung nach Ende der Hochfrequenzemission im Sinne einer Dosis-Wirkungsbeziehung. In der stratifizierten Analyse bestätigte sich der Unterschied nur bei Personen mit schlechtem Schlaf (Zunahme um 26 %, 95 %-CI: 8–47 %). Für Personen ohne Schlafstörungen war kein Expositionseffekt zu beobachten. Die Ergebnisse sprechen für eine Melatoninsuppression unter Magnetfeldexposition und einen Erholungseffekt nach Expositionsende. In einer früheren Querschnittsstudie der gleichen Forschergruppe hatte sich während des Sendebetriebs und bei vorübergehenden Unterbrechung kein Zusammenhang zwischen Magnetfeldexposition und Melatoninproduktion gezeigt (Altpeter et al. 1995).

Auch die neueren Studien zum Hormonhaushalt haben unterschiedliche Expositionsarten und Bevölkerungsgruppen untersucht und sind daher schlecht mit einander vergleichbar. Am ehesten scheinen Hinweise auf eine supprimierende Wirkung der Hochfrequenzexposition auf die Melatoninausschüttung zu bestehen. Ähnliche Beobachtungen wurden in Studien mit niederfrequenten Magnetfeldern gemacht. Möglicherweise lässt sich dieser Effekt in erster Linie nachts und bei empfindlichen Bevölkerungsgruppen feststellen, zum Beispiel bei Personen mit schlechtem Schlaf (vgl. Altpeter et al. 2006). Wegen der ausgeprägten physiologischen Schwankungen des Melatoninspiegels sind die Zusammenhänge allerdings schwer eruierbar.

Bewertung

Die Datenlage zu Expositionseffekten auf die Schilddrüsenhormone oder andere Hormone ist noch spärlicher als zum Melatonin. Eine Beurteilung ist daher noch nicht möglich. Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf den Melatoninstoffwechsel sind nicht auszuschliessen und sollten in grösseren Studien mit verbesserter Methodik untersucht werden.

Tab. 5 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das Hormonsystem.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante 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, Abstand: 40 cm	U, K	GSM 900	0.2 W/m ²	0.3	+ Kortison	+ Melatonin + STH + LH
de Seze et al. 1998	Mobiltelefon	M	GSM 900	0.25 W	~0.58	– TSH + FSH	LH, ACTH, GH – Prolaktin
Dasdag et al. 1999	im Beruf (Radio-/TV-Techniker)	L	1.06–6000	?	?	+ Trijodthyronin (T3) + Thyroxin (T4) + TSH + Estradiol + Testosteron + Progesteron	Kortison – DHEA
de Seze et al. 1999	Mobiltelefon	M	GSM 900 DCS 1800	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	GSM 900	1 W 1 W/m ²	0.025		+/- Melatonin + Kortison
Braune et al. 2002	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25 W	0.5		Noradrenalin, Adrenalin, Endothelin, Kortison
Burch et al. 2002	Mobiltelefon	K/M	v.a. analoge Mobiltelefone	Normalgebrauch > 25 Min./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
Jarupat et al. 2003	Mobiltelefon	U/K	PHS 1900	25 W/m ²	<~2	– nächtl. Melatoninkonzentration	
Bergamaschi et al. 2004	Mobiltelefon	L	k. A.	Normalgebrauch > 33 Std./Monat	<~2	+ Anteil Personen mit TSH < 0.4 U/l	Thyroxin (T4)
Wood et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 895	0.25 W	0.674	– Melatonin/Kreatinin-Quotient	Melatoninsekretion
Altpeter et al. 2006	Kurzwellen-radiosender	L	6.1–21.8	niedrig: 0.4 mA/m ³ hoch: 2.6 mA/m ³ nach Abschaltung: keine Exposition in diesem Frequenzbereich		– Melatoninsekretion bei Personen mit schlechtem Schlaf	

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; 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.

³⁾ 24-Stunden-Mittelwert

2.2.2 Gehirnphysiologie: Hirnströme, ereignisbezogene Potenziale, zerebrale Durchblutung

Die Elektroenzephalographie (EEG) ist eine Methode zur Registrierung von Potentialschwankungen des Gehirns als Indikator für dessen Aktivität. Das EEG repräsentiert die Aktivität der Nervenzellen 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 bis 50 Hz. Man unterscheidet zwischen den Deltawellen (δ : 1 bis 3 Hz), den Thetawellen (θ : 4 bis 7 Hz), den Alphawellen (α : 8 bis 13 Hz), den Betawellen (β : 13 bis 27 Hz) und den Gammawellen (γ : 27 bis 50 Hz), wobei die Frequenzteilung je nach Konvention leicht variieren kann. Diesen Frequenzbändern können unterschiedliche Bewusstseinszustände zugeordnet werden: Deltawellen sind charakteristisch für den Tiefschlaf. Thetawellen sind typisch beim Einschlafen, während der Traumphase und unmittelbar vor dem Erwachen. Alphawellen dominieren bei wachen, entspannten Personen und in Übergangsstadien zwischen Schlaf und Wachzustand. Der Bereich um 12 Hz korrespondiert mit den Schlafspindeln. Typisch für den aktiven Wachzustand und für 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 der Hochfrequenzstrahlung auf die Gehirntätigkeit wurden die spontanen Hirnströme im EEG untersucht, 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. Amplituden verglichen.

Bei der Magnetoenzephalographie wird die magnetische Aktivität des Gehirns gemessen. Die Magnetfelder werden durch elektrische Ströme aktiver Nervenzellen verursacht und sind Ausdruck der momentanen Gesamtaktivität des Gehirns. Das Magnetoenzephalogramm hat eine gute räumliche und zeitliche Auflösung. In der Medizin wird es unter anderem zur Lokalisierung von Epilepsieherden eingesetzt.

Neben dem spontanen EEG wurden auch Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf die ereignisbezogenen oder evozierten Potenziale untersucht. Als ereignisbezogene Potenziale (engl.: event-related potentials, ERP) bezeichnet man Wellenformen im EEG, die durch Sinneswahrnehmungen ausgelöst werden oder bei kognitiven Verarbeitungsprozessen entstehen. Die Auslösung der Gehirnpotenziale erfolgt durch visuelle, akustische, motorische oder somatosensible (taktile) Reize. Die Amplitude der Potenziale beträgt nur einige μV und ist unter den Signalen des spontanen EEGs versteckt. Erst mehrfache Stimuli und selektive Analyseverfahren ermöglichen die Extraktion aus dem Hintergrunds-EEG. Die intraindividuelle Variabilität der ereignisbezogenen Potenziale ist aber geringer und ihre Reproduzierbarkeit dadurch besser. Eine häufig

untersuchte Modalität ist die positive Welle P300, die durch Applikation eines seltenen Zielreizes ausgelöst wird und ungefähr 300 ms nach dem Reiz auftritt.

Weitere Parameter der Gehirnphysiologie sind Durchblutung und Stoffwechsel des Gehirns. Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf den zerebralen Blutfluss und Stoffwechselprozesse wurden mittels Positronen-Emissionstomographie (PET) und anderer bildgebender Verfahren untersucht.

Die Ergebnisse der Studien zur Gehirnphysiologie, die seit dem Bericht UM 162 veröffentlicht wurden, sind in Tabelle 6 aufgeführt. Wenn die Experimente Tests zur Gehirnfunktion beinhalteten, wurde oft auch die kognitive Leistung der Probanden ausgewertet, beispielsweise die Anzahl korrekter Antworten oder die Reaktionszeit. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 2.2.3 erörtert. Von den Studien, die Auswirkungen auf das EEG im Schlaf untersuchten, sind in diesem Kapitel nur die Resultate bezüglich des EEGs aufgeführt. Die Ergebnisse in Bezug auf Schlafphasen, Schlafqualität etc. werden in Kapitel 2.3.3 diskutiert.

a) Spontanes EEG (im Schlaf oder im Wachzustand)

Resultate

Zu den Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf das EEG publizierten Huber et al. 2003 eine erweiterte Analyse der Daten ihrer früheren Doppelblindstudien (Borbély et al. 1999, Huber et al. 2000). In der erweiterten Auswertung wurde die Verteilung der spezifischen Absorptionsrate (SAR) in verschiedenen Hirnarealen berücksichtigt. Im ersten Experiment (Borbély et al. 1999) waren 24 Männer während der ganzen Nacht einem Feld ausgesetzt worden, das dem einer Mobilfunkbasisstation ähnlich war. Dabei war das Feld abwechselungsweise je 15 Minuten ein- und ausgeschaltet. Mit drei $\lambda/2$ -Dipolantennen wurde im Kopfbereich der Probanden ein homogenes Feld erzeugt, dessen Stärke einen maximalen lokalen SAR₁₀-Wert von 1 W/kg erreichte. Im zweiten Experiment (Huber et al. 2000) waren 16 Männer zweimal vor einem dreistündigen Schlaf während 30 Minuten einem gleich starken Feld wie im ersten Experiment ausgesetzt worden, wobei aber einseitig einmal die rechte und einmal die linke Hemisphäre belastet wurde, das dritte Mal erfolgte eine Scheinexposition. In beiden Experimenten war bei realer Exposition die Amplitude des Schlaf-EEGs im Bereich von 9 bis 14 Hz (Alpha-Band) in der ersten Nicht-REM-Phase signifikant erhöht. Da im zweiten Experiment die Exposition vor dem Schlaf erfolgte, hielten die EEG-Veränderungen noch mindestens 15 Minuten nach Ende der Exposition an. In Bezug auf das EEG im Wachzustand zeigten sich keine konsistenten Expositionseffekte. Die Auswertung der dosimetrischen Berechnungen ergab, dass trotz unterschiedlicher Expositionsanordnung und verschieden hohen spezifischen Absorptionsraten in den Hirnarealen keine topographischen Unterschiede in der EEG-Reaktion bestanden (alle Ableitungen gleichmässig betroffen).

An dem einfach verblindeten Experiment von D'Costa et al. 2003 nahmen zehn Probanden teil. Während der EEG-Aufzeichnung waren die Probanden wach und hielten die Augen geschlossen. Exponiert wurde mit einem Mobiltelefon, dessen Antenne sich in 2 cm Abstand hinter dem Hinterkopf befand. Das EEG wurde in zehn Phasen à fünf Minuten registriert, von denen fünf bei eingeschaltetem Mobiltelefon stattfanden und

fünf bei Scheinexposition. Die Reihenfolge der Expositionen war randomisiert, die Gesamtdauer der EEG-Aufzeichnung betrug 50 Minuten. Zwischen den Fünf-Minuten-Sequenzen folgten Pausen von 10 bis 15 Minuten Länge ohne EEG-Registrierung. An den zentralen EEG-Ableitungen zeigte sich eine statistisch signifikante Abnahme der Amplitudenhöhe im Alpha- und im Betaband (8 bis 13 Hz resp. 13 bis 32 Hz), an den Hinterkopfelektroden eine Verminderung im Bereich des Betabands. An den Stirnelektroden sowie bezüglich der Delta- und Theta-Frequenzbänder ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

In Kramarenko und Tan 2003 wird ein Experiment beschrieben, in dem die EEG-Aktivität von zehn erwachsenen Männern und zehn Kindern während eines Telefonats mit einem Mobiltelefon aufgezeichnet wurde. Nach 20 bis 40 Sekunden Exposition beobachteten die Autoren in beiden Gruppen intermittierend auftretende langsame Delta-Wellen in verschiedenen Gehirnarealen. Die EEG-Veränderungen verschwanden innerhalb von zehn Minuten nach der Exposition. Soweit der Publikation zu entnehmen ist, beinhaltete das Experiment keine Kontrollgruppe oder Scheinexposition, und es wurde keine statistische Auswertung vorgenommen. Aufgrund dieser schwerwiegenden methodischen Mängel sind die Ergebnisse nicht aussagekräftig und werden nicht in Tabelle 6 aufgeführt.

Das Experiment von Hinrikus et al. 2004 war einfach verblindet und beinhaltete neben der Hochfrequenzexposition eine Photostimulation (Flimmerlicht). Exponiert wurde mit einem amplitudenmodulierten Signal mit einer Frequenz von 450 MHz. Die Viertelwellen-Antenne (NMT 450 RA3206) befand sich 10 cm Entfernung von der linken Kopfseite der Probanden. Die 20 Studienteilnehmer wurden in zufälliger Reihenfolge real- und scheinexponiert. Der Versuchsablauf bestand aus einer 20 Sekunden dauernden Lichtexposition, nach 60 Sekunden Pause erfolgte die Hochfrequenzexposition (60 Sekunden), dann wieder 60 Sekunden Pause. Der Hochfrequenz-Zyklus wurde zehnmal wiederholt. Für die gesamte Probandengruppe ergaben sich keine statistisch signifikanten EEG-Unterschiede zwischen Scheinexposition und Licht- oder Hochfrequenzexposition. Bei drei Teilnehmern waren während der Hochfrequenzexposition signifikante Veränderungen an einzelnen EEG-Ableitungen zu beobachten.

Mit der gleichen Expositionsanordnung führte die Forschergruppe um Hinrikus ein weiteres Experiment durch, in dem statt der EEG-Spektralanalyse ein alternatives, nichtlineares Analyseverfahren zur Anwendung kam (Bachmann et al. 2005). Bei diesem Verfahren wird die Länge der EEG-Perioden mit geringer Variabilität registriert und ihre Verteilung im Zeitverlauf analysiert (LDLVP, length distribution of low-variability periods). In der doppelt verblindeten Crossover-Studie an 23 Probanden ergaben sich Hinweise darauf, dass die neue Methode diskrete EEG-Veränderungen im Zusammenhang mit der Hochfrequenzexposition besser widerspiegeln könnte als die Spektralanalyse. Da es sich bei dieser Untersuchung um einen Methodenvergleich handelt und kein statistischer Vergleich zwischen Exposition und Scheinexposition für die Gesamtgruppe vorgenommen wurde, werden die Ergebnisse nicht in Tabelle 6 aufgeführt.

Eine andere experimentelle Studie untersuchte an neun Männern und zehn Frauen die Auswirkungen der Exposition auf das EEG und evaluierte geschlechtsspezifische Unterschiede (Papageorgiou et al. 2004). Während der 45-minütigen Exposition absolvierten die Probanden einen auditorischen Test zum Kurzzeitgedächtnis (Wechsler-Gedächtnistest). Die Dipolantenne war 20 cm vom rechten Ohr entfernt. Bei Männern zeigte sich eine Abnahme der EEG-Aktivität unter Exposition, bei Frauen eine Aktivitätszunahme. Diese Veränderungen betrafen alle vier Frequenzbänder (α , β , δ , θ). Die Varianzanalyse ergab, dass die Aktivitätsabnahme bei Männern an acht von 15 Elektroden statistisch signifikant war, die Aktivitätszunahme bei Frauen an vier Elektroden. In der Publikation fehlen Angaben zur Exposition und zur Verblindung der Untersucher und Probanden. Eine Schätzung des SAR-Werts ist nicht möglich.

Hinrichs et al. 2005 untersuchten in einem Doppelblind-Experiment 13 Probanden, die fünf aufeinander folgende Nächte im Schlaflabor verbrachten. Nach einer Adaptationsnacht erfolgte in zwei zufällig ausgewählten Nächten die Exposition, in den beiden anderen Nächten die Scheinexposition. Exponiert wurde mit einem homogenen, vertikal polarisierten GSM-Feld mit Fernfeldcharakteristik. Die Antenne war 1,5 m vom Kopf der Probanden entfernt. Die elektrische Feldstärke lag bei 30 V/m (Leistungsflussdichte ca. 2.3 W/m²) und entsprach damit ungefähr der Hälfte des von der ICNIRP für die Allgemeinbevölkerung empfohlenen Immissionsgrenzwerts für die elektrische Feldstärke bei Ganzkörperexposition. Die EEG-Aufzeichnungen der jeweils zwei Nächte mit Exposition resp. Scheinexposition wurden gemittelt. In der Auswertung der EEG-Spektralanalysen zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Exposition und Scheinexposition.

In der doppelt verblindeten Crossover-Studie von Loughran et al. 2005 verbrachten 50 Probanden im Abstand von einer Woche zweimal zwei Nächte im Schlaflabor. Nach einer Adaptationsnacht folgte jeweils eine Nacht mit Mobiltelefonexposition bzw. Scheinexposition. Das Mobiltelefon befand sich an der rechten Kopfseite der Probanden, die Exposition dauerte 30 Minuten und endete ungefähr 20 Minuten, bevor die EEG-Aufzeichnung begann. Die statistische Auswertung mittels Varianzanalyse ergab eine signifikante Zunahme der EEG-Aktivität im Frequenzbereich 11.5 bis 12.25 Hz, die auf die mittleren zehn Minuten der ersten halben Stunde in der ersten Non-REM-Schlafphase beschränkt war. Damit bestätigten sich in dieser methodisch guten Studie mit der grössten Probandenzahl frühere Beobachtungen einer Verstärkung der EEG-Aktivität im Alpha-Band nach der Mobiltelefonexposition.

Curcio et al. 2005 exponierten in einem Doppelblindexperiment 20 Probanden gegenüber einem Mobiltelefon, das in einem Helm neben dem linken Ohr angebracht war. Die Probanden wurden in zwei Gruppen randomisiert und durchliefen in zufälliger Reihenfolge drei Versuchsphasen im Abstand von mindestens 48 Stunden: Basismessung, Scheinexposition, reale Exposition. Die Expositionen dauerten jeweils 45 Minuten. Bei Gruppe 1 erfolgte die EEG-Aufzeichnung sieben Minuten nach Ende der Exposition, bei Gruppe 2 während der letzten sieben Minuten der Exposition. Während der EEG-Aufzeichnung sassen die Probanden mit geschlossenen Augen in einem Sessel. Die statistische Auswertung erfolgte unter Korrektur für multiple Testung ($p < 0.003$). Sie ergab in beiden Gruppen bei Mobiltelefonexposition eine signifikante

Zunahme der EEG-Aktivität im Alpha-Band (9 bis 10 Hz) am zentralen Ableitungspunkt (Cz) und im 11-Hz-Frequenzband an einer Ableitung am Hinterkopf (Pz).

b) Ereignisbezogene Potenziale (ERP)

In einer einfach verblindeten Studie exponierten Hamblin et al. 2004 acht Frauen und vier Männer gegenüber einem Mobiltelefon an der rechten Kopfseite. Die Expositionsdauer betrug eine Stunde, davon 30 Min. mit auditorischem Aufmerksamkeitstest. Bei drei von acht Komponenten der ereignisbezogenen Potenziale ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen realer Exposition und Scheinexposition. Teils wiesen sie auf eine Beschleunigung, teils auf eine Beeinträchtigung der neuronalen Reizverarbeitung hin. In der rechten Hemisphäre, also in grösserer Nähe zum Mobiltelefon, waren die Unterschiede am deutlichsten, es fanden sich aber auch Effekte in anderen Hirnregionen (linksfrontal und linkszentral).

Hinrichs und Heinze 2004 untersuchten in einer doppelt verblindeten Crossover-Studie mittels Magnetoenzephalogramm Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf ereignisbezogene Magnetfelder des Gehirns. Zwölf Probanden wurden 30 Minuten lang exponiert, in den letzten zehn Minuten fand die Merkphase eines Gedächtnistests statt. Die Ableitung der evozierten Magnetfelder erfolgte nach einer fünfzehnminütigen Pause während der Abrufphase. Die Auswertung ergab nur für frühe Wellen der evozierten Potenziale (nach 350 bis 400 ms) im Bereich der linken Seiten- und Hinterkopfregion und nur bei Wiedererkennung der gelernten Wörter einen Unterschied in der Nähe der statistischen Signifikanz ($p=0.097$). Für Magnetfelder an anderen Ableitungsorten, bei Identifizierung neuer Wörter und für Wellen mit längeren Latenzzeiten zeigten sich keine expositionsabhängigen Unterschiede.

In einem Versuch, ihre eigenen Ergebnisse zu replizieren, führten Krause et al. 2004 eine Doppelblindstudie durch, in der zwölf Männer und zwölf Frauen gegenüber einem GSM-Mobiltelefon an der linken Seite des Kopfes exponiert wurden. Die einfach verblindete Vorgängerstudie (Krause et al. 2000) hatte eine signifikante Zunahme der EEG-Amplitude im Frequenzband von 8 bis 10 Hz ergeben und in vier verschiedenen Frequenzbändern Veränderungen im Verhältnis der frühen ereignisbezogenen Synchronisationen (= Zunahme der Amplitude) und Desynchronisationen (= Abnahme der Amplitude) festgestellt. In der Replikationsstudie führten die Probanden während der EEG-Aufzeichnung den selben Gedächtnistest durch wie in der früheren Studie. Die eine Hälfte des Tests erfolgte bei realer Exposition, die andere bei Scheinexposition. Die Reihenfolge der beiden Expositionen war zufällig und innerhalb der Gruppe ausgeglichen. In zwei Frequenzbändern zeigte sich eine Abnahme der frühen ereignisbezogenen Synchronisationen bei realer Exposition (4 bis 6 Hz und 6 bis 8 Hz), in zwei anderen waren keine signifikanten Effekte zu beobachten (8 bis 10 Hz und 10 bis 12 Hz). Damit liessen sich die Befunde der Vorgängerstudie nicht replizieren. Eine partielle Bestätigung der Ergebnisse fand sich lediglich im Frequenzband 4 bis 6 Hz, in Form einer Abnahme der ereignisbezogenen Synchronisationen.

In einer weiteren Doppelblindstudie evaluierte die finnische Forschergruppe die Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf die ereignisbezogene EEG-Aktivität von

Kindern (Krause et al. 2006). An der Studie nahmen neun Mädchen und sechs Knaben im Alter von 10 bis 14 Jahren teil. Das GSM-Mobiltelefon befand sich an der linken Kopfseite. Während der einstündigen EEG-Aufzeichnung wurde ein Gedächtnistest mit akustischen Signalen durchgeführt (Hören von Wortlisten und Wiedererkennen eines Wortes). Das Mobiltelefon war jeweils während dreissig Minuten eingeschaltet, die Expositionsreihenfolge war ausgeglichen. Sowohl in der Lern- als auch in der Abrufphase des Gedächtnistests zeigten sich an verschiedenen Ableitungen statistisch signifikante Unterschiede in Bezug auf das Verhältnis der ereignisbezogenen Synchronisationen und Desynchronisationen in der EEG-Antwort. Die Veränderungen betrafen die Frequenzbänder 4 bis 8 Hz (frontale, okzipitale und linksseitige Ableitungen) und 15 Hz (rechtsseitige Ableitungen). Die Autoren sehen in den Ergebnissen eine Übereinstimmung mit ihren Beobachtungen an Erwachsenen. Insgesamt sprechen die Resultate trotz gewisser Inkonsistenzen für eine Beeinflussung der Gehirnaktivität im Alpha-Frequenzbereich (um 8 Hz).

Ferreri et al. 2006 untersuchten in ihrer doppelt verblindeten Crossover-Studie an 15 gesunden männlichen Rechtshändern die Erregbarkeit der Grosshirnrinde vor und nach einer 45-minütigen Mobiltelefonexposition. Dazu stimulierten sie mittels transkranieller Magnetstimulation die Regionen beider Grosshirnhälften, die für Handbewegungen zuständig sind. Gemessen wurden die motorisch evozierten Potenziale in der Handmuskulatur. Auf der linken Seite zeigt sich nach der Mobiltelefonexposition im Vergleich zur Scheinexposition eine erhöhte Erregbarkeit der Grosshirnrinde. Der Unterschied war statistisch grenzwertig ($p=0.07$). Die Darstellung des Versuchsablaufs ist in der Publikation unklar, und die Auswertungen erfolgten ohne Korrektur für multiple Testung.

Auch die Replikationsstudie von Hamblin et al. 2006 war doppelt verblindet und folgte einem Crossover-Design. Die 120 Teilnehmer absolvierten kognitive Tests zur akustischen und visuellen Aufmerksamkeit (oddball tasks), die jeweils fünf Minuten dauerten. Die EEG-Aufzeichnung erfolgte während der Testung. Exponiert wurde mit einem GSM-Mobiltelefon, das an der rechten oder linken Kopfseite angebracht war. Alle Teilnehmer wurden im Abstand von einer Woche real- und scheinexponiert. Bei 60 Personen erfolgte die Exposition an der rechten Seite, bei den anderen 60 an der linken Seite. Die Exposition dauerte 21 Minuten, die Reihenfolge von Exposition resp. Scheinexposition sowie die Zuordnung der exponierten Seite war zufällig und innerhalb der Gruppe ausgeglichen. Die Auswertung der EEG-Aufzeichnungen erfolgte für rechts- und linksseitige Expositionen gemeinsam. Im Gegensatz zur Vorgängerstudie (Hamblin et al. 2004) zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede in Bezug auf die untersuchten Komponenten der evozierten Potenziale.

Die Publikation von Papageorgiou et al. 2006 betrifft das selbe Experiment wie in Papageorgiou et al. 2004 (EEG-Resultate siehe oben). Die Veröffentlichung enthält Auswertungen zum Einfluss der Exposition auf die ereignisbezogenen Potenziale, und zwar auf die P50-Komponente. Ausgelöst wurden die ereignisbezogenen Potenziale durch ein akustisches Signal während des Wechsler-Gedächtnistests. Je nach Höhe des Tons (500 oder 3000 Hz) sollten die Probanden Zahlen in unterschiedlicher Reihenfolge reproduzieren, der Test dauerte insgesamt 45 Minuten. Die Dipolantenne war 20 cm

vom rechten Ohr entfernt. Die Reihenfolge von Exposition und Scheinexposition wurde zufällig bestimmt. Die Varianzanalyse ergab statistisch signifikante Unterschiede zwischen den beiden Expositionsarten in der P50-Amplitude an zwei von 15 EEG-Ableitungen; an Elektrode Fp1 für beide Signaltöne, an Elektrode O1 nur nach dem tieferen Ton. In der Publikation fehlen Angaben zur Exposition und zur Verblindung während des Experiments. Eine Schätzung des SAR-Werts ist nicht möglich.

In der einfach verblindeten Studie von Yuasa et al. 2006 wurde ein Mobiltelefonsimulator verwendet, den die 12 Probanden während 30 Minuten ans rechte Ohr hielten. Kurz vor und nach der Exposition resp. Scheinexposition erfolgte die Reizung des Nervus medianus am linken Handgelenk mit einem kurzen elektrischen Stimulus. Die dadurch ausgelösten Gehirnpotenziale wurden von einer Elektrode über dem entsprechenden Areal der rechten Grosshirnhemisphäre aufgezeichnet. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in den Latenzzeiten und Amplituden dieser somatosensibel evozierten Potenziale. Auch für die Erholungsfunktion der Potenziale bei wiederholter Reizung ergab sich kein Zusammenhang mit der Exposition.

c) Durchblutung und Stoffwechsel des Gehirns

In der Doppelblindstudie von Haarala et al. 2003a wurden mittels Positronen-Emissionstomographie (PET) Effekte der Mobiltelefonexposition auf den regionalen Blutfluss im Gehirn untersucht. Die PET-Untersuchung erfolgte während der Exposition durch ein Mobiltelefon an der linken Kopfseite, gleichzeitig führten die 14 Probanden einen visuellen Test zum Arbeitsgedächtnis durch. Im Vergleich zur Scheinexposition zeigte sich bei realer Exposition eine Abnahme des regionalen Blutflusses im Bereich der Hörrinde des Temporallappens. Der Effekt war in beiden Hemisphären zu beobachten, auf der Seite des Mobiltelefons deutlicher als auf der Gegenseite. In den am stärksten exponierten Hirnarealen zeigte sich kein Expositionseffekt. Als eine Erklärung für diese Befunde diskutieren die Autoren, dass verschiedene Hirnareale unterschiedlich empfindlich auf die Mobiltelefonstrahlung reagieren könnten. Für wahrscheinlicher halten sie aber, dass die verminderte Durchblutung in der Hörrinde auf einen Kompensationsmechanismus zur Unterdrückung eines unbewusst wahrgenommenen akustischen Signals der Telefonbatterie zurückzuführen war.

Wie in Bericht UM 162 erwähnt, hatten Huber et al. 2002 in der ersten PET-Studie nach einer dreissigminütigen Mobiltelefonexposition an der exponierten Kopfseite eine signifikante Zunahme der Durchblutung im Stirnbereich der Grosshirnrinde (dorsolateraler Präfrontalkortex) beobachtet. Neben dem Mobiltelefonsignal wurde in diesem doppelt verblindeten Experiment auch ein Signal verwendet, das dem einer GSM-Basisstation ähnelte (Huber et al. 2005). Intensität und Expositionsdauer war bei beiden Signalen gleich. Die PET-Untersuchung begann zehn Minuten nach der Exposition und bestand aus drei Durchgängen im Abstand von zehn Minuten. Die Auswertung der Daten von 12 Teilnehmern ergab im Zusammenhang mit dem basisstationsähnlichen Signal keine statistisch signifikanten Unterschiede in der regionalen Gehirndurchblutung.

In der Doppelblindstudie von Aalto et al. 2006 untersuchte die finnische Forschergruppe um Haarala die Gehirndurchblutung während der Mobiltelefonexposition bei gleichzeitiger Durchführung eines Arbeitsgedächtnis-Tests. Das Mobiltelefon befand sich an der linken Kopfseite, die PET-Untersuchung fand während der fünfzigminütigen Exposition respektive Scheinexposition statt. Die statistische Analyse der Daten von 12 Probanden ergab bei Mobiltelefonexposition eine signifikante Abnahme der Durchblutung im Bereich des unteren linken Schläfenlappens (Gyrus fusiformis). In Regionen des Stirnlappens zeigte sich dagegen beidseits eine statistisch signifikante Steigerung des Blutflusses (Gyrus frontalis).

Wolf et al. 2006 verwendeten in ihrer doppelt verblindeten Crossover-Studie die Nah-Infrarot-Spektrophotometrie, um unmittelbare Effekte der Mobiltelefonexposition auf die Gehirndurchblutung mit einer besseren zeitlichen Auflösung als in der PET-Untersuchung zu evaluieren. Als Indikator für Blutfluss und Blutvolumen diente die Konzentration von Oxyhämoglobin und Desoxyhämoglobin im Bereich des Präfrontalkortex. Wie in den Studien von Huber et al. wurde mit einem pulsmodulierten Signal exponiert, das demjenigen eines GSM-Mobiltelefons ähnelte (Frequenz: 900 MHz). Die planare Antenne befand sich in 11 cm Entfernung von der linken Kopfseite. Alle 16 Teilnehmer wurden zwei verschiedenen Intensitäten (SAR_{10} : 1.2 und 12 W/kg) sowie Scheinexposition ausgesetzt. Appliziert wurde eine intermittierende Befeldung (2 Sek. an, 2 Sek. aus), die insgesamt fünf Minuten dauerte. Nach jeweils 20 Sekunden wurde die Spektrophotometrie 60 Sekunden lang ohne Exposition fortgesetzt (Messdauer insgesamt: 24 Minuten). Es zeigten sich einige signifikante Unterschiede während der Exposition, die auf eine Abnahme der Gehirndurchblutung hinwiesen. Das Ausmass der Veränderungen war geringer als physiologische Schwankungen bei normaler Gehirnaktivität. Es war weder eine Dosis-Wirkungsbeziehung zu beobachten, noch zeigten sich Veränderungen nach Expositionsende. Zusätzlich bestand auch auf der entgegengesetzten Kopfseite ein signifikanter Unterschied.

Für die epidemiologische Studie von Khat et al. 2006 wurden 21 Personen rekrutiert, die seit zwei bis zehn Jahren zwischen ein und vier Stunden pro Tag ein Mobiltelefon benutzten. Die Kontrollgruppe bestand aus 15 Personen, die kein Mobiltelefon benutzten. Die Studienteilnehmer wurden mittels ^1H -Protonen-Magnetresonanz-Spektroskopie untersucht. Dieses Verfahren ermöglicht die Beurteilung von Stoffwechselfvorgängen in einzelnen Gehirnarealen. Da alle Mobiltelefonbenutzer die rechte Kopfseite zum Telefonieren bevorzugten, galten Regionen im rechten Schläfenlappen des Grosshirns und zentrale Bereiche des Hirnstamms als exponiert. Verglichen wurden die Stoffwechselquotienten der rechten Seite mit denjenigen entsprechender Areale der linken Hemisphäre jedes Probanden sowie die Mittelwerte von Mobiltelefonbenutzern und -nichtbenutzern. Die Auswertung ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede im Stoffwechsel der beiden Gehirnhälften oder zwischen den Teilnehmergruppen.

Die Gesamtbewertung der Studien zur Gehirnphysiologie wird dadurch erschwert, dass die Experimente unterschiedliche Expositionsanordnungen und Zielgrössen enthielten. Es wurden Hochfrequenzsignale mit unterschiedlichen Frequenzen, Modulationen und Intensitäten verwendet. Auch Zeitpunkt und Dauer der Exposition variierten, und in

Bewertung

einigen Publikationen sind die Angaben unvollständig. Eine methodische Verbesserung ist insofern zu beobachten, als es sich bei den neueren Arbeiten überwiegend um doppelt verblindete Crossover-Studien handelt. In den meisten Studien wurden aber weiterhin kleine Probandengruppen getestet. Dadurch ist die statistische Power zum Nachweis diskreter Unterschiede gering. Andererseits wurden oft zahlreiche Tests durchgeführt und in der Analyse mehrere Auswahlsschritte vorgenommen, so dass zufällig positive Befunde und eine Tendenz zur Überschätzung der Expositionseffekte nicht ausgeschlossen werden können.

Wie in den in UM 162 referierten Studien zeigten sich auch in den neueren Publikationen wiederholt Hinweise auf eine Beeinflussung des spontanen EEGs im Bereich des Alpha-Bands (8 bis 13 Hz) durch Mobiltelefonexposition. Dabei handelte es sich überwiegend um einen Anstieg der Amplitude. Sowohl für das EEG im Schlaf als auch im Wachzustand ergaben ungefähr die Hälfte der vorliegenden Studien mindestens einen statistisch signifikanten Effekt. Neben Veränderungen des Alpha-Bands zeigte sich vereinzelt auch eine Beeinflussung im Bereich des Beta-Bands (13 bis 27 Hz). In einigen Experimenten traten die Veränderungen erst nach Beendigung der Exposition auf.

In den Arbeiten zur Untersuchung der ereignisbezogenen Potenziale (ERP) wurden mehrheitlich Veränderungen unter Hochfrequenzexposition beobachtet. Oft waren aber nur bestimmte Frequenzbereiche, Potenzialkomponenten oder einzelne Ableitungen betroffen. Zudem fanden die Experimente bei unterschiedlichen Bedingungen statt, beispielsweise mit oder ohne kognitive Tests, und es wurden verschiedene Reize zur Auslösung der Potenziale verwendet. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse begrenzt. In zwei Replikationsstudien mit verbesserter Methodik liessen sich die Ergebnisse der Vorgängerstudien nicht bestätigen (Krause 2004, Hamblin 2006).

Von den fünf Experimenten zur Gehirndurchblutung wiesen vier Studien auf Expositionseinflüsse hin, es zeigte sich aber kein einheitliches Wirkungsmuster (Lokalisation des Effekts, Zu-/Abnahme der Durchblutung). Die beiden Arbeiten von Huber und Kollegen deuten darauf hin, dass die Pulsierung des Signals für die Auswirkungen entscheidend sein könnte. In der epidemiologischen Erhebung von Khat et al. ergaben sich weder inter- noch intraindividuelle Unterschiede im Gehirnstoffwechsel im Zusammenhang mit der Mobiltelefonbenutzung.

Insgesamt wird die Evidenz für einen Effekt der Mobiltelefonexposition auf das Spontan-EEG in Ruhe oder Schlaf sowie auf die Reaktion des Gehirns auf Reize anhand der vorliegenden Resultate weiterhin als wahrscheinlich beurteilt. Die Art der Beeinflussung und die Bedeutung der Effekte für die Gesundheit lassen sich noch nicht abschätzen. Ob Mobilfunkstrahlung die Durchblutung oder den Stoffwechsel des Gehirns verändert, ist zur Zeit noch nicht beurteilbar.

Tab. 6 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf Parameter der Gehirnphysiologie.

Studie	Exposi- tionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	EEG-Typ	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
von Klitzing 1995	sphärische Antenne	U ¹⁾	150, gepulst mit 217 Hz	<~20 V/m	~0.12	spontan, wach	+ α	α -Band in der 1. Expositionsperiode
Reiser et al. 1995	Mobiltelefon, 40 cm hinter dem Kopf, Medizin. Thera- piegerät	U ¹⁾	GSM 902.4 0.150, gepulst mit 9.6 Hz	8 W 400 pT	~0.04	spontan, wach	Nach-Expositionsphase: + β 1 (12.75–18.5 Hz) + δ (1.25–4.5 Hz) während/nach Exposition. + 12.75–35 Hz	α 1, α 2, θ
Mann and Röschke 1996	Mobiltelefon, Abstand: 40 cm	K	GSM 900	8 W Spitzen- leistung 0.5 W/m ²	~0.04	spontan, Schlaf	während REM: + (1–20 Hz) Interaktion α -Band mit Schlafphase	
Röschke and Mann 1997	Mobiltelefon, Abstand: 40 cm	U	GSM 900	0.5 W/m ²	~0.04	spontan, wach		δ , θ , α , β keine sensible Subgruppe
Eulitz et al. 1998	Mobiltelefon	U	GSM 916.2	0.35 W	0.9	evoziert und spontan	+ (19–31 Hz)-Band	durchschnittliches spontanes EEG
Freude et al. 1998	Mobiltelefon	U	GSM 916.2	0.35 W	0.9	evoziert	– langsames Potenzial (SP)	kein Effekt bei anspruchs- losem Test
Urban et al. 1998, Hladky et al. 1999	Mobiltelefon	U ¹⁾	?	0.13 W	~0.3	evoziert		visuell evoziertes Potenzial (VEP)
Wagner et al. 1998	Mobiltelefon	K	GSM 900	0.2 W/m ²	0.6	spontan, Schlaf		EEG
Borbély et al. 1999	drei $\lambda/2$ - Antennen, Abstand: 30 cm	U/K	GSM-ähnlich 900, 15 Min. ein/aus		1	spontan, Schlaf	Erste 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	GSM 916.2	0.35 W	0.9	evoziert	anspruchsvoller Test: – langsames Potenzial (SP)	Bereitschaftspotenzial und SP bei anspruchslo- sem Test
Fritzer et al. 2000	Antenne (Art und Abstand nicht angegeben)	M	GSM 900		< 2	spontan, Schlaf		kein Einfluss bei Expo- nierten
Hietanen et al. 2000	Mobiltelefon	U	NMT 900 (analog) GSM 900 PCN 1800	0.13–1 W	~0.3–~2.3	spontan, wach	+ δ -Band	alle anderen Bänder alle Bänder
Huber et al. 2000	planare Anten- ne, Abstand: 11 cm	U ²⁾	GSM-ähnlich, 900		1	spontan, Schlaf	in der ersten Nicht-REM- Phase: + α	Ab 2. Nicht-REM-Phase kein Effekt mehr
Krause et al. 2000a	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	~0.6	assoziiert	+ 8–10 Hz-ERP während visuellem Arbeitsgedächtnis- test	4–6 Hz-ERP 10–12 Hz-ERP
Krause et al. 2000b	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25 W	~0.6	assoziiert	Rückkodierungsphase in auditorischem Gedächtnis- test: + 8–10 Hz-ERP	Rückkodierungsphase: (–) 4–6 Hz-ERP (+) 6–8 Hz-ERP (+) 10–12 Hz-ERP, keine Effekte während Merkphase

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	EEG-Typ	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Lebedeva et al. 2000	Mobiltelefon	U ¹⁾	? 902.4	0.6 W/m ²	~0.05	spontan, wach	+ Multikanalkorrelationsdimension	nach 6–7 Min. Exposition kein Effekt mehr
Wagner et al. 2000	Mobiltelefon, Abstand: 40 cm		GSM 900	50 W/m ²	1.8			EEG-Leistungsdichte in allen Bändern
Jech et al. 2001	Mobiltelefon	U ¹⁾	GSM 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	GSM (Frequenz?)	keine Angaben	<~2	spontan, Schlaf	+ α	β (+) δ , ϑ
Huber et al. 2002	Kopf zwischen zwei planaren Antennen, Abstand: 11 cm	U ²⁾	GSM-mobiltelefon-ähnlich 900 GSM-mobiltelefon-ähnlich 900 unmodulierter Träger, 900		1	spontan, Schlaf PET spontan, Schlaf	+ 10 Hz (vor dem Einschlafen) + 12.25–13.5 Hz (Phase II) + zerebraler Blutfluss (seitliche Grosshirnrinde ipsilateral) – 14 Hz (Phase II)	
Croft et al. 2002	Mobiltelefon	U	GSM 900	~3–4 mW	~0.009	evoziert und spontan	spontan: + α – δ evoziert: – β + γ	spontan: ϑ , β , γ evoziert: δ , α
D'Costa et al. 2003	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25 W	~0.6	spontan, wach	zentral: – α , – β okzipital: – β	δ , ϑ , frontale EEG-Ableitungen
Haarala et al. 2003a	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25 W	0.993	PET	– zerebraler Blutfluss (Höririnde ipsilateral > kontralateral)	
Huber et al. 2003	drei $\lambda/2$ -Antennen, Abstand: 30 cm planare Antenne, Abstand: 11 cm	U ²⁾ U ²⁾	GSM-basisstations-ähnlich 900 GSM-basisstations-ähnlich 900		1 1	spontan, wach spontan, Schlaf spontan, wach spontan, Schlaf	+ 11–11.25 Hz + α in 1. Non-REM-Phase – 10.5–11 Hz – 18.75–19.5 Hz + α in 1. Non-REM-Phase	Frequenz und Muster der Schlafspindeln, Lokalisation des Expositionseffekts
Hamblin et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM 894.6	0.25 W	0.87	evoziert	ERP-Komponenten: – N100-Amplitude und – Latenz + P300-Latenz	P200, N200 P300-Amplitude
Hinrichs et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM-mobiltelefon-ähnlich 1870	0.125 W	0.61	evozierte Magnetfelder	frühe Komponente, links okzipito-parietal	Wellen mit längerer Latenzzeit und in anderen Hirnarealen
Hinrikus et al. 2004	$\lambda/4$ -Antenne, 10 cm vom Kopf	U	450, gepulst mit 7 Hz	1.6 W/m ²	0.0095 ³⁾	spontan, wach		Veränderungen im α - und ϑ -Band bei Einzelpersonen
Krause et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	0.648	evoziert	– 4–6 Hz-ERP – 6–8 Hz-ERP	8–10 Hz-ERP 10–12 Hz-ERP
Papageorgiou et al. 2004	Dipolantenne, 20 cm vom Kopf	U	unmodulierter Träger, 900	3 V/m	?	spontan, wach	Frauen: + EEG-Aktivität Männer: – EEG-Aktivität	
Curcio et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 902.4	0.25 W	0.5	spontan, wach	+ α -Band (9–11 Hz) an Elektroden Cz und Pz	andere Ableitungen und Frequenzbänder

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	EEG-Typ	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Hinrichs et al. 2005	Panelantenne, Abstand: 1.5 m	U	GSM 1800	2.3 W/m ²	0.072	spontan, Schlaf		α, β1, δ, θ
Huber et al. 2005	Kopf zwischen zwei planaren Antennen, Abstand: 11 cm	U	GSM-mobiltelefon-ähnlich 900 GSM-basisstationsähnlich, 900		1	PET	+ zerebraler Blutfluss	zerebraler Blutfluss
Loughran et al. 2005	Mobiltelefon	U ²⁾	GSM 894.6	0.25 W	0.29	spontan, Schlaf	+ 11.5–12.25 Hz in erster Non-REM-Phase (Dauer: 10 Min.)	übrige Frequenzbänder
Aalto et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	0.743	PET	– zerebraler Blutfluss im unteren Schläfenlappen links + zerebraler Blutfluss im Präfrontalkortex beidseits	Blutfluss in anderen Gehirnregionen
Ferreri et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25	0.5	evoziert	+ Erregbarkeit der motorischen Grosshirnrinde	
Hamblin et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 895	0.25 W	0.11	evoziert		N100-Amplitude N100-Latenz P300-Amplitude P300-Latenz
Khiat et al. 2006	Mobiltelefon	L	k.A.	bei Normalgebrauch	<~2	Protonen-Magnetresonanztomographie		Stoffwechselquotienten exponierte vs. nichtexponierte Hemisphäre und Benutzer vs. Nichtbenutzer
Krause et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	~0.7	assoziiert	Lernphase (frontal, okzipital, links temporal): + 4–8 Hz-ERP Abrufphase: + 4–8 Hz-ERP (frontal, okzipital) + 15 Hz-ERP (rechts temporal)	übrige Frequenzbänder und Ableitungen
Papageorgiou et al. 2006	Dipolantenne, 20 cm vom Kopf	U	unmodulierter Träger, 900	3 V/m	?	evoziert	tiefer akustischer Stimulus: + P50-Amplitude an zwei von 15 Ableitungen hoher akustischer Stimulus: – P50-Amplitude an einer von 15 Ableitungen	P50-Amplitude an 13 von 15 Ableitungen
Wolf et al. 2006	planare Antenne, Abstand: 11 cm	U	GSM-mobiltelefon-ähnlich, intermittierend, 900		1.2 12	Nah-Infrarot-Spektrophotometrie	– zerebraler Blutfluss in Regionen des Präfrontalkortex	
Yuasa et al. 2006	Mobiltelefon	U	PDC 800, gepulst	0.27 W	0.054	evoziert		Amplituden und Latenzzeiten der somatosensibel evozierten Potenziale

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; U = unmittelbar, K = Kurzzeit, M = mittel, PDC = personal digital cellular; ERP = ereignisbezogene Potenziale, PET = Positronen-emissionstomographie; ~ bezeichnet geschätzte Werte

1) EEG-Datenaufzeichnung länger als Expositionsdauer (Latenz)

2) Exposition erfolgte nur vor dem Schlaf

3) Bezugsvolumen nicht angegeben

2.2.3 Kognitive Funktionen

Zu Effekten der Hochfrequenzexposition auf die Reizwahrnehmung und Reizverarbeitung im Gehirn sind seit dem Bericht UM 162 insgesamt 25 Publikationen erschienen. Die meisten Experimente untersuchten die Auswirkungen der Mobiltelefonexposition. In zwei Studien wurden die Probanden einer basisstationsähnlichen Ganzkörperexposition ausgesetzt. Die Gehirnfunktionen wurden in neuropsychologischen Tests zu unterschiedlichen kognitiven Leistungen überprüft, z. B. in Reaktions- oder Gedächtnistests.

Lass et al. 2002 exponierten fünfzig Probanden während zehn bis zwanzig Minuten gegenüber einem gepulsten 450-MHz-Feld. Fünfzig weitere Personen dienten als Kontrollgruppe und wurden scheinexponiert. Die Zuteilung zur jeweiligen Gruppe erfolgte randomisiert, das Studiendesign war einfach verblindet. Als Strahlungsquelle diente eine $\lambda/4$ -Antenne in 10 cm Entfernung von der rechten Kopfseite, die mit einer Pulsleistung von 1 W angespiesen wurde. Die Pulsfrequenz betrug 7 Hz, das Puls-zu-Pause-Verhältnis war 1,0. Es wurden drei visuelle Tests zu Aufmerksamkeit und Kurzzeitgedächtnis durchgeführt. Im Gedächtnistest war die Anzahl an falschen Antworten bei realer Exposition signifikant niedriger als bei Scheinexposition. Bei den beiden Aufmerksamkeitstests traten dagegen tendenziell mehr Fehler in der exponierten Gruppe auf (statistisch nicht signifikant), und die Variabilität der Testergebnisse innerhalb der Gruppe war signifikant grösser als in der Kontrollgruppe.

Resultate

Das Ziel der Studie von Haarala et al. 2003b war die Replikation und Erweiterung einer Arbeit der selben Forschergruppe (Koivisto et al. 2000b). In zwei Labors in Finnland bzw. Schweden wurden jeweils 32 Probanden gegenüber einem GSM-Mobiltelefon an der linken Kopfseite exponiert. Die Teilnehmer absolvierten unter doppelt verblindeten Versuchsbedingungen verschiedene Reaktions- und Aufmerksamkeitstests, einmal bei realer Exposition und einmal bei Scheinexposition. Weder zwischen den beiden Expositionssituationen noch zwischen den beiden Labors ergaben sich signifikante Unterschiede bezüglich der Reaktionszeit oder der Korrektheit der Antworten. Auch in der Untersuchung zur zerebralen Durchblutung unter Mobiltelefonexposition (Haarala et al. 2003a, siehe Kapitel 2.2.2) änderte sich die kognitive Leistung der Teilnehmer nicht. In der einfach verblindeten Studie von Koivisto et al. 2000b hingegen hatten sich bei Mobiltelefonexposition in fast allen Tests kürzere Reaktionszeiten gezeigt. Über die Ergebnisse eines visuellen Kurzzeit-Gedächtnistests im Rahmen derselben Replikationsstudie berichten die Autoren in Haarala et al. 2004. Auch in diesem Test, der mit vier verschiedenen Schwierigkeitsstufen durchgeführt wurde, zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Reaktionszeit oder in der Fehlerrate im Zusammenhang mit der Mobiltelefonexposition.

In der Untersuchung von Smythe et al. 2003 absolvierten 62 Personen einen visuellen Gedächtnistest, nachdem sie randomisiert einer von drei Expositionsgruppen zugeteilt worden waren: ohne Mobiltelefon, mit aktivem bzw. inaktivem Mobiltelefon. Die Exposition/Scheinexposition erfolgte jeweils während der Lernphase an der linken Kopfseite, und die Gedächtnisleistung wurde nach einigen Minuten sowie im Abstand von einer Woche überprüft. Beim Vergleich der beiden Gruppen mit Mobiltelefon

zeigte sich für einen Teil des Kurzzeitgedächtnistests (räumliche Zuordnung) in der real exponierten Gruppe eine signifikant niedrigere Fehlerrate als bei Scheinexposition. Dieser Unterschied war allerdings nur bei den Männern zu beobachten. Die Testergebnisse der Frauen in den verschiedenen Expositionsgruppen unterschieden sich nicht signifikant, ebenso wenig die Gedächtnisleistung aller Teilnehmer bei der Testung nach einer Woche.

An der einfach verblindeten Studie von Lee et al. 2003 nahmen 78 Probanden teil. Exponiert wurde mit einem Mobiltelefon an der rechten Kopfseite, die Expositionsdauer betrug ca. 30 Minuten. Alle Teilnehmer führten zwei Aufmerksamkeitstests direkt nacheinander zweimal durch. Bei der experimentellen Gruppe (n=39) fand die erste Durchführung immer unter EMF-Exposition statt, die zweite bei Scheinexposition. Die Kontrollgruppe absolvierte beide Testdurchgänge bei Scheinexposition. Die Korrektheit der Antworten unterschied sich weder zwischen den Testdurchgängen noch zwischen den beiden Gruppen. Die mittleren Reaktionszeiten waren in beiden Gruppen im zweiten Durchgang signifikant kürzer als im ersten Durchgang. Für eine der beiden Aufgaben ergab sich im zweiten Durchgang ein signifikanter Unterschied zu Gunsten der exponierten Gruppe, den die Autoren als verzögerte Wirkung der EMF-Exposition interpretieren. Die Aussagekraft dieses Ergebnisses ist allerdings beschränkt, weil die Reihenfolge von realer Exposition und Scheinexposition nicht zufällig war. Zudem fehlen in der Publikation Einzelheiten zur Exposition und die Darstellung der Resultate ist nicht nachvollziehbar.

In der so genannten TNO-Studie von Zwamborn et al. 2003 wurden zwei Gruppen von Probanden untersucht: 36 Personen, die Beschwerden im Zusammenhang mit GSM-Strahlung angaben (Gruppe A), und 36 Personen ohne solche Beschwerden (Gruppe B). Es gab vier Expositionsarten: GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz, ein UMTS-ähnliches Signal mit 2100 MHz und die Scheinexposition. Die Exposition bestand aus einer Ganzkörperbelastung unter Fernfeldbedingungen (Abstand zur Antenne: 3 m). Die Feldstärke betrug 1 V/m (Pulsspitze) bei den GSM-Signalen und 1 V/m Effektivwert beim UMTS-Signal. Die Teilnehmer absolvierten zwei Sitzungen mit realer Exposition (zwei von drei Signalen) und eine bei Scheinexposition. Dadurch lagen für jede reale Exposition Daten von 24 Probanden vor, für die Scheinexposition von 36 Personen. Während allen Sitzungen wurden Tests zu Reaktionszeit, Erinnerungsvermögen, visueller Aufmerksamkeit und zum Arbeitsgedächtnis (Dual-Tasking) durchgeführt. In der ersten Auswertung zeigten sich für acht der insgesamt 30 Tests signifikante Unterschiede zwischen realer Exposition und Scheinexposition. Nach einer erneuten Analyse mit Korrektur für multiple Expositionen bestand nur noch ein statistisch signifikanter Unterschied: Ein Kurzzeitgedächtnistest (memory comparison test) wurde von beschwerdefreien Personen während der UMTS-Exposition schneller ausgeführt als bei Scheinexposition.

Curcio et al. 2004 untersuchten an zwanzig Probanden den zeitlichen Verlauf von Einflüssen der Mobiltelefonexposition auf die kognitiven Funktionen. Exponiert wurde doppelt verblindet mit einem Mobiltelefon an der linken Kopfseite. Alle Probanden absolvierten unter drei verschiedenen Expositionsbedingungen vier Tests zur kognitiven Leistungsfähigkeit: ohne Befeldung, mit realer Exposition und bei Scheinexpositi-

on. Eine Hälfte der Probanden wurde 45 Minuten vor der Testung exponiert, die andere Hälfte während der Durchführung der kognitiven Tests. In den akustischen Tests zeigten sich bei realer Exposition signifikant kürzere Reaktionszeiten als bei Scheinexposition. Zusätzlich waren die Reaktionszeiten von Personen, die vor der kognitiven Testung exponiert wurden, kürzer als diejenigen von Personen mit gleichzeitiger Exposition (Median der einfachen Reaktionszeiten: 249 vs. 335 ms). Hinsichtlich der visuellen Testparameter und der Irrtumsrate ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Die Autoren sehen in ihren Resultaten einen Hinweis auf einen spezifischen Zeitverlauf der Expositionseffekte und auf ein Intervall von mindestens 25 Minuten bis zum Auftreten wahrnehmbarer Veränderungen der Gehirnfunktionen.

In einer einfach verblindeten Studie exponierten Hamblin et al. 2004 acht Frauen und vier Männer entweder gegenüber einem Mobiltelefon an der rechten Kopfseite oder Scheinexposition. Die Expositionsdauer betrug eine Stunde, davon 30 Min. mit akustischem Aufmerksamkeitstest. Untersucht wurden die ereignisbezogenen Hirnpotenziale, die Reaktionszeiten und die Korrektheit der Antworten. Bei realer Exposition war die mittlere Reaktionszeit signifikant länger als bei Scheinexposition (556 vs. 503 ms, $p=0.024$). Der Anteil an korrekten Antworten unterschied sich nicht signifikant (99.11 vs. 98.13 %, $p=0.189$).

Hinrichs und Heinze 2004 untersuchten in einer doppelt verblindeten Crossover-Studie mittels Magnetenzephalogramm Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf das Gehirn (siehe Kapitel 2.2.2). Zwölf Probanden wurden 30 Minuten lang exponiert, in den letzten zehn Minuten fand die Merkphase eines Gedächtnistests statt. Die Ableitung der evozierten Magnetfelder erfolgte nach einer fünfzehnminütigen Pause während der Abrufphase. Es zeigten sich keine expositionsabhängigen Unterschiede in den Reaktionszeiten oder im Anteil korrekter Antworten.

In einem Versuch, frühere eigene Ergebnisse zu replizieren, untersuchten Krause et al. 2004 die Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf die Gedächtnisleistung und das EEG. In der Vorgängerstudie (Krause et al. 2000) hatte sich kein Einfluss der Exposition auf die Korrektheit der Antworten gezeigt. In der aktuellen Doppelblindstudie wurden zwölf Männer und zwölf Frauen gegenüber einem GSM-Mobiltelefon an der linken Seite des Kopfes exponiert. Die Probanden führten den selben akustischen Gedächtnistest durch wie in der früheren Studie. Eine Hälfte des Tests erfolgte unter realer Exposition, die andere unter Scheinexposition, die Reihenfolge der Expositionen war randomisiert. Bei realer Exposition war die Fehlerrate der Teilnehmer signifikant höher als bei Scheinexposition (Durchschnitt: 19.1 vs. 6.3 %, $p<0.001$).

Bei der Publikation von Maier et al. 2004 handelt es sich um dieselben Resultate, die bereits in Maier 2001 auf deutsch veröffentlicht wurden (vgl. UM 162). Darin hatten sich Hinweise auf eine Verschlechterung der Diskriminationsfähigkeit nach Mobiltelefonexposition ergeben. Beobachtet wurde eine Zunahme der Ordnungsschwelle, also des minimalen Zeitabstands, bei dem zwei sequentiell angebotene akustische Reize gerade noch als getrennt erkannt und der richtigen Seite des Gehörs zugeordnet werden konnten. Da diese Ergebnisse in Tabelle 7 bereits unter der früheren Publikation erfasst sind, wird die neue Veröffentlichung nicht aufgenommen.

Die experimentelle Studie von Papageorgiou et al. 2004, 2006 untersuchte an neun Männern und zehn Frauen die Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf das EEG und evaluierte geschlechtsspezifische Unterschiede (siehe Kapitel 2.2.2). Die Dipolantenne war 20 cm vom rechten Ohr entfernt. Während der 45-minütigen Exposition absolvierten die Probanden einen auditorischen Test zum Kurzzeitgedächtnis (Wechsler-Gedächtnistest). Es zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Gedächtnisleistung zwischen Exposition und Scheinexposition. In den Publikationen fehlen wesentliche Angaben zur Exposition und zur Verblindung der Untersucher und Probanden. Eine Schätzung des SAR-Werts ist nicht möglich.

Zum Einfluss der Mobiltelefonexposition auf die kognitiven Leistungen von Kindern liegen zur Zeit zwei Studien vor.

- > In der doppelt verblindeten Untersuchung von Haarala et al. 2005 führten 32 Kinder im Alter von zehn bis 14 Jahren acht Reaktions- und Kurzzeitgedächtnistests durch, einmal mit einem aktiven Mobiltelefon am linken Ohr und einmal bei Scheinexposition. Die Auswertungen ergaben keinen statistisch signifikanten Einfluss der Exposition auf die Reaktionszeiten oder die Korrektheit der Antworten.
- > In der Doppelblindstudie von Preece et al. 2005 wurden 18 Kinder im Alter von zehn bis zwölf Jahren mit 22 Tests zur Reaktionszeit und zu verschiedenen Gedächtnisfunktionen untersucht. Drei Expositionsbedingungen wurden verwendet: ein Mobiltelefon am linken Ohr mit durchschnittlicher Sendeleistung von 0.25 W resp. 0.025 W sowie Scheinexposition. Unter Mobiltelefonexposition zeigten sich Trends zu kürzeren Reaktionszeiten und niedrigeren Fehlerraten. Diese Unterschiede waren aber nach einer statistischen Korrektur für multiple Testung nicht mehr signifikant. Die Autoren halten fest, dass möglicherweise eine grössere Anzahl Kinder hätte untersucht werden müssen, weil die Testergebnisse stark variierten.

Besset et al. 2005 wählten einen anderen Ansatz für ihr Experiment: Sie exponierten 55 erwachsene Probanden (28 Frauen, 27 Männer) unter Doppelblindbedingungen über einen längeren Zeitraum jeweils von Montag bis Freitag von 18 bis 20 Uhr. Alle Studienteilnehmer benutzten ihr Mobiltelefon im Alltag, ausserhalb des Experiments, weniger als zehn Minuten täglich. Die Teilnehmer wurden in zwei Gruppen unterteilt und entweder exponiert oder scheinexponiert. Zwischen den beiden Gruppen wurden Paare gebildet, die bezüglich Alter, Geschlecht und Intelligenzquotienten übereinstimmten. Während der Exposition sassen die Probanden vor einem Fernseher, sahen einen «emotional neutralen» Film und hielten mit der bevorzugten Hand ein Mobiltelefon ans Ohr. Die Studie dauerte 45 Tage: drei Tage «Baseline», 28 Tage Expositions- resp. Scheinexpositionsphase und 14 Tage Erholungsphase. Während der Erholungsphase wurden alle Probanden scheinexponiert. Die neuropsychologischen Tests erfolgten an den Tagen 2 (Baseline), 15 und 29 (Expositionsphase) sowie 43 (Erholungsphase), jeweils 13 Stunden nach der Exposition resp. Scheinexposition, also am nächsten Morgen. Die neuropsychologische Testung bestand aus 22 Aufgaben zu Informationsverarbeitung, Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Reaktionsgeschwindigkeit. Die Ergebnisse der beiden Tests während der Expositionsphase wurden gepoolt und als ein Resultat behandelt. Die statistische Auswertung ergab keine signifikanten Unterschiede in den kognitiven Leistungen der beiden Gruppen. In der Publikation bleibt unklar, ob

die Bedingungen während der 13 Stunden (inkl. Nachtschlaf) zwischen Exposition und neuropsychologischer Testung für die Teilnehmer vergleichbar waren.

Die Doppelblindstudie von Schmid et al. 2005 beinhaltete ein UMTS-ähnliches Mobiltelefonsignal und vier Tests zur visuellen Wahrnehmung. Die Antenne befand sich am linken Ohr der Probanden. Es handelte sich um ein UMTS-Testsignal mit einer Frequenz von 1.97 GHz und FDD-Modus (frequency division duplex). Alle 58 Teilnehmer absolvierten die Tests unter drei Expositionsbedingungen in zufälliger Reihenfolge: hohe resp. niedrige Intensität und Scheinexposition. Nach Abschluss des eigentlichen Experiments wurden drei Tests noch einmal bei Kontrolleexposition mit Flimmerlicht (Positivkontrolle) wiederholt. In den Ergebnissen, die je nach Test aus Reaktionszeiten, Anzahl korrekter Antworten oder Wahrnehmungsschwelle bestanden, zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Hochfrequenzbelastung.

Im einfach verblindeten Experiment von Rodina et al. 2005 untersuchten die Autoren vier Männer und sechs Frauen mit einem Test zur visuellen Wahrnehmung und zur Informationsverarbeitung («visual masking»). Die Aufgabe bestand darin, zwei von sechs Fotos von Gesichtern wieder zu erkennen und die Reihenfolge anzugeben, in der sie kurz zuvor auf einem Computerbildschirm präsentiert worden waren. Exponiert wurde mit einer Viertelwellenantenne, die sich in 10 cm Entfernung von der rechten Kopfseite befand. Das Signal hatte eine Frequenz von 450 MHz und war amplitudenmoduliert. Die Anzahl der richtigen Antworten war bei Scheinexposition im Durchschnitt um 5% höher als bei realer Exposition ($p=0.04$). Die Anzahl der Antworten mit nur einer korrekten Zuordnung oder mit falscher Reihenfolge unterschied sich nicht signifikant. Schwachpunkte der Studie sind die einfache Verblindung, die geringe Anzahl an Probanden und die fehlende Korrektur für multiple Testung. Insgesamt sprechen die Ergebnisse eher gegen einen Einfluss der Hochfrequenzstrahlung. Die Aussagekraft der Studie ist aber gering.

In der Doppelblindstudie von Aalto et al. 2006 untersuchte die finnische Forschergruppe um Haarala mittels Positronen-Emissionstomographie die Gehirndurchblutung während der Mobiltelefonexposition bei gleichzeitiger Durchführung eines Arbeitsgedächtnis-Tests (siehe Kapitel 2.2.2). Das Mobiltelefon befand sich an der linken Kopfseite, die Exposition resp. Scheinexposition dauerte 50 Minuten und fand in ausgeglichener Reihenfolge statt. Die Auswertung der Testresultate ergab keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Reaktionszeiten oder die Korrektheit der Antworten.

Abdel-Rassoul et al. 2006 untersuchten in ihrer epidemiologischen Studie 85 Personen im ägyptischen Bezirk Menoufiya, von denen 37 in einem Gebäude mit einer Mobilfunkbasisstation wohnten (oder arbeiteten?) und 48 im gegenüber liegenden Gebäude der landwirtschaftlichen Verwaltung als Angestellte oder Landbauingenieure arbeiteten (oder wohnten?). Diese beiden Gruppen wurden als Exponierte definiert. Als Kontrollgruppe wurden 80 Personen ausgewählt, die in einem ungefähr 2 km entfernten Gebäude der Landwirtschaftsverwaltung arbeiteten und nicht in der Nähe einer Basisstation wohnten, mit etwa demselben Geschlechtsverhältnis, Alter, Bildungsniveau, Rauchgewohnheiten und Mobiltelefonbenutzung wie bei den Exponierten. Im Gebäude

mit der Basisstation wurde drei Jahre vor der Studie an verschiedenen Stellen eine Leistungsflussdichte von 1 mW/m^2 gemessen. Die Studienteilnehmer absolvierten zehn neuropsychologische Tests zur visuell-motorischen Geschwindigkeit, zur Problemlösung, zur Aufmerksamkeit und zur Gedächtnisleistung. Signifikante Unterschiede ergaben sich in vier Tests, in drei davon erzielten die Exponierten bessere Resultate als die Kontrollpersonen. Der Expositionsstatus der Teilnehmer ist unklar: Für das Haus gegenüber der Basisstation und das Kontrollgebäude lagen keine Messwerte vor. Die Messungen im Gebäude mit der Antenne ergaben eine sehr geringe Belastung und waren zum Zeitpunkt der Studie bereits drei Jahre alt. Die Angaben, ob die Personen in den entsprechenden Häusern lebten oder arbeiteten, sind im Artikel widersprüchlich. Über die Dauer des Wohnsitzes oder der Anstellung ist nichts bekannt, ebenso wenig über die Vergleichbarkeit der beiden exponierten Gruppen.

In dem einfach verblindeten Experiment von Eliyahu et al. 2006 führten 36 Männer vier neuropsychologische Tests einmal bei rechtsseitiger, einmal bei linksseitiger Mobiltelefonexposition und einmal bei Scheinexposition durch. Die Reihenfolge der Expositionen und Tests war ausgeglichen. Die Aufgaben betrafen die räumliche und verbale Wiedererkennung und sollten gezielt Aktivitäten in bestimmten Arealen der linken oder rechten Grosshirnhemisphäre hervorrufen. In einem Test zeigte sich bei linksseitiger Exposition eine signifikante Verlängerung der Reaktionszeiten, wenn die erforderliche Reaktion mit der linken Hand ausgeführt wurde ($p=0.02$). In zwei weiteren Tests waren nicht signifikante Tendenzen in die gleiche Richtung zu beobachten. Bei rechtsseitiger Exposition zeigten sich keine Unterschiede in der Reaktionszeit. In der Publikation findet sich keine Hypothese, wie es bei linksseitiger Exposition zu einer Beeinträchtigung der Motorik der linken Hand kommen könnte (Steuerung über rechte Grosshirnhemisphäre).

In der doppelt verblindeten EEG-Studie von Hamblin et al. 2006 absolvierten die 120 Teilnehmer kognitive Tests zur akustischen und visuellen Aufmerksamkeit (oddball tasks), die jeweils fünf Minuten dauerten (EEG-Resultate siehe Kapitel 2.2.2). Exponiert wurde mit einem GSM-Mobiltelefon, alle Teilnehmer wurden im Abstand von einer Woche real- und scheinexponiert. Bei 60 Personen erfolgte die Exposition an der rechten Kopfseite, bei den anderen 60 an der linken Seite. Die Auswertungen ergaben keine statistisch signifikanten Unterschiede in den Reaktionszeiten in Zusammenhang mit der Exposition.

Für die österreichische Querschnittstudie von Hutter et al. 2006 wurden je 36 Erwachsene im Umfeld von fünf GSM-Basisstationen in Wien und fünf GSM-Basisstationen in Kärnten zufällig ausgewählt. Die Teilnehmer wurden nach ihrem Wohlbefinden befragt (vgl. Kapitel 2.3.2) und absolvierten kognitive Leistungstests zum Kurz- und Mittelzeitgedächtnis, zur Wahlreaktionszeit und zur Wahrnehmungsgeschwindigkeit. Als primäres Expositionsmaß wurde die von der nächstgelegenen Basisstation erzeugte maximal mögliche Leistungsflussdichte verwendet, welche aufgrund einer Messung im Schlafzimmer der Studienteilnehmer und Hochrechnung auf maximale Auslastung der Basisstation bestimmt wurde. Es wurden drei Kategorien gebildet: $<0.1 \text{ mW/m}^2$, $0.1 \text{ bis } 0.5 \text{ mW/m}^2$, $>0.5 \text{ mW/m}^2$. Ergänzend dazu wurde auch die gesamte Hochfrequenzexposition im Frequenzbereich zwischen 80 MHz und 2 GHz gemessen. Diese

betrug zwischen 0.0002 und 1.4 mW/m², wobei der Beitrag der Mobilfunkbasisstationen im Mittel 73 % ausmachte. Die statistische Auswertung der insgesamt 13 Testparameter mittels Kovarianzanalyse ergab eine Tendenz zur schnelleren Wahrnehmung in der am stärksten exponierten Gruppe ($>0.5 \text{ mW/m}^2$, $p=0.061$). Bei Ausschluss nicht-signifikanter Kovariablen und in einer logistischen Regressionsanalyse war der Unterschied statistisch signifikant. Die Korrektheit der Antworten nahm mit zunehmender Exposition tendenziell ab. Bezüglich Gedächtnisfunktion und Wahlreaktionszeit bestanden keine Unterschiede zwischen den Expositionskategorien. Eine Korrektur für multiple Testung wurde nicht vorgenommen.

Die doppelt verblindete Crossover-Studie von Keetley et al. 2006 untersuchte Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf Leistungen des Arbeitsgedächtnisses und auf die Reaktionszeiten. Im Abstand von einer Woche wurden 120 Probanden zweimal getestet, einmal bei realer Exposition (Gesprächsmodus, volle Sendeleistung), einmal bei Scheinexposition (Standbymodus). Das Mobiltelefon befand sich an der linken Kopfseite, die Reihenfolge der Expositionen war ausgeglichen. Zu Beginn jeder Sitzung führten die Probanden acht neuropsychologische Tests ohne Exposition durch. Dann folgten dreissig Minuten Exposition resp. Scheinexposition in Ruhe, danach die erneute Testung während Exposition resp. Scheinexposition. Es wurden insgesamt 18 Testergebnisse verglichen. Fünf Vergleiche ergaben eine statistisch signifikant schlechtere Leistung unter Mobiltelefonexposition, in zwei weiteren Testparametern war die durchschnittliche Leistung besser als bei Scheinexposition. Es wurde keine Korrektur für multiple Testung vorgenommen.

In der erweiterten Replikationsstudie zur so genannten TNO-Studie (Zwamborn et al. 2003, siehe oben) wurden 33 Personen mit selbstberichteter Hypersensibilität und 84 nicht empfindliche Personen während 45 Minuten doppelblind in zufälliger Reihenfolge UMTS-basisstationsähnlichen Feldern mit Feldstärken von 1 V/m und 10 V/m ausgesetzt (Regel et al. 2006). Während der Exposition führten die Teilnehmer zwei Serien von sechs kognitiven Tests zur Reaktionszeit, zur Wahlreaktionszeit, zum Arbeitsgedächtnis und zur selektiven visuellen Aufmerksamkeit durch. In den Auswertungen ergaben sich nach Korrektur für multiple Testung keine statistisch signifikanten Veränderungen der kognitiven Leistungen unter Exposition.

An der Doppelblindstudie von Russo et al. 2006 nahmen 168 Probanden teil. Exponiert wurde mit einem Mobiltelefon bei drei Expositionsbedingungen: GSM-Signal, nicht modulierte Trägersignale sowie Scheinexposition. Die Expositionszeit betrug 35 bis 40 Minuten. Jeweils 84 Personen wurden dem GSM-Signal resp. dem unmodulierten Signal exponiert. In jeder Expositionsgruppe befand sich das Telefon bei 42 Personen an der rechten und bei 42 Personen an der linken Kopfseite. Alle Probanden durchliefen zwei Expositionssitzungen, waren also jeweils einem der beiden Signale und der Scheinexposition ausgesetzt. Die Tests bezogen sich auf einfache Reaktionszeit, Wahlreaktionszeit, Subtraktion und Aufmerksamkeit und fanden während der Exposition statt. Die Reihenfolge der Expositionen und der Tests war ausgeglichen. Für keinen Test ergaben sich statistisch signifikante Unterschiede in den Reaktionszeiten. Das galt für beide Mobiltelefonsignale sowie für die rechts- und linksseitige Exposition (jeweils

im Vergleich zur Scheinexposition). Auch die Reihenfolge der Expositionen hatte keinen Einfluss auf die kognitiven Leistungen.

Eine weitere Doppelblindstudie mit 16 Probanden beinhaltete einen computergestützten Wahlreaktionstest, mit dem die Vorbereitungsphase einer Handbewegung im Gehirn untersucht wurde (Terao et al. 2006). Die Testpersonen erhielten vier verschiedene Instruktionen, bevor sie eine bestimmte motorische Aufgabe ausführten. Gemessen wurde die Reaktionszeit nach Erhalt der Instruktionen bis zur ersten Bewegung (Loslassen einer Taste) und die «Bewegungszeit» bis zur Ausführung der instruierten Aufgabe (Drücken einer anderen Taste mit der richtigen Hand). Der Test fand vor und nach der Exposition resp. Scheinexposition statt. Exponiert wurde mit einem Mobiltelefon, das die Teilnehmer über einen Zeitraum von 30 Minuten ans rechte Ohr hielten. Die Auswertungen ergaben weder für die Reaktions- noch für die Bewegungszeiten eine Veränderung in Abhängigkeit von der Exposition. Das galt für den Vergleich zwischen Real- und Scheinexposition sowie für die Leistungen vor und nach der Exposition. Auch in Bezug auf die Anzahl korrekter Reaktionen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede.

Für ihr einfach verblindetes Experiment wählten Wilen et al. 2006a aus einer früheren Querschnittstudie 20 Versuchspersonen aus, die Symptome beim mobilen Telefonieren angaben (EMF-Sensible), und 20 Personen ohne solche Beschwerden. Die Probanden wurden während 30 Minuten einem GSM-Telefonsignal oder einer Scheinexposition ausgesetzt, die Antenne befand sich rechts vom Kopf in 8.5 cm Entfernung. Vor und nach der Exposition wurden Tests zur visuellen Wahrnehmung (Critical Flicker Fusion Frequency Test), zum Kurzzeitgedächtnis und zur Reaktionszeit durchgeführt. Zusätzlich wurde das EKG registriert und die Herzfrequenzvariabilität untersucht (siehe Kapitel 2.2.5). Im Kurzzeitgedächtnis-Test schnitten die Sensiblen vor der Exposition in Bezug auf korrekte Antworten und Reaktionszeiten schlechter ab als die Gesunden. Die Unterschiede verschwanden aber in den folgenden Durchgängen und waren nicht von der Exposition abhängig. Im Test zur visuellen Wahrnehmung ergaben sich keine Differenzen.

In den experimentellen Studien bis Ende 2002 hatten sich ziemlich konsistente Hinweise auf eine Verkürzung der Reaktionszeiten unter Mobiltelefonexposition ergeben (vgl. UM 162). Die Resultate der seither publizierten Experimente sind weniger einheitlich: In einigen Untersuchungen wurden unter Exposition längere Reaktionszeiten beobachtet, in mehreren anderen zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Exposition und Scheinexposition. Auch die Replikationsversuche von Haarala et al. (2003a,b und 2004) mit doppelt verblindetem Studiendesign bestätigten die früher beobachteten verkürzten Reaktionszeiten nicht. Bezüglich der Fehlerraten ergaben sowohl die älteren als auch die aktuellen Studien überwiegend keine Expositionseffekte; vereinzelt wurde eine Zu- oder Abnahme der Anzahl korrekter Antworten beobachtet. Auch in den beiden Studien an Kindern zeigten sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich Reaktionszeiten und Fehlerraten im Zusammenhang mit der Exposition (Haarala et al. 2005, Preece et al. 2005).

Die methodische Qualität der neueren Experimente ist besser als diejenige der früheren Studien. Mängel bestehen weiterhin in Bezug auf die Beschreibung der Exposition. Die Vergleichbarkeit wird dadurch limitiert, dass neben Intensität und Dauer der Exposition auch der Zeitpunkt der Testung nicht einheitlich ist: In den meisten Studien wurden die neuropsychologischen Tests während der Exposition durchgeführt, in anderen Arbeiten nach Expositionsende. Zudem ist die Anzahl der Probanden in den meisten Studien gering, und die Frage der statistischen Power zum Nachweis diskreter Unterschiede wird kaum diskutiert. Allerdings ergaben auch grössere Studien keine signifikanten Expositionseffekte (z. B. Schmid et al. 2005, Hamblin et al. 2006 und Russo et al. 2006). Einige positive Resultate könnten auch durch Zufall entstanden sein, weil nicht in allen Studien mit zahlreichen statistischen Vergleichen eine Korrektur für multiple Testung vorgenommen wurde.

Die Ganzkörperexposition unter Fernfeldbedingungen, wie sie von GSM- oder UMTS-Mobilfunkbasisstationen verursacht wird, wurde in zwei experimentellen Studien und zwei epidemiologischen Arbeiten untersucht. Die so genannte TNO-Studie ergab bei UMTS-ähnlicher Exposition in einem von dreissig Tests einen signifikanten Unterschied (Zwamborn et al. 2003). In der erweiterten Replikationsstudie waren unter dem gleichen und einem zehnfach stärkeren UMTS-ähnlichen Signal keine statistisch signifikanten Veränderungen zu beobachten (Regel et al. 2006). Die österreichische Bevölkerungsstudie in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen ergab wenig Hinweise auf einen Expositionseffekt (Hutter et al. 2006).

Die Evidenz für kurzfristige Effekte der Mobiltelefonexposition auf die kognitiven Funktionen wird aufgrund der inkonsistenten Ergebnisse der aktuellen experimentellen Untersuchungen gegenüber der Einschätzung in UM 162 von «wahrscheinlich» auf «möglich» zurückgestuft. Auswirkungen der langfristigen Belastung durch Mobilfunkantennen können erst beurteilt werden, wenn weitere Bevölkerungsstudien mit adäquaten Expositionsmessungen vorliegen.

Bewertung

Tab. 7 > Übersicht über Studien zu Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung auf kognitive Funktionen.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Meister A. et al. 1989	Mikrowellentherapiegerät	K	2450	1–10 W/m ²	~0.06–0.64		Verlängerung der Zahlensuchzeit ± Erkennungsschwelle (tachistoskopische Wahrnehmungsprobe, Reaktionszeit abhängig von der jeweiligen Intensität: bei 1 W/m ² verkürzt, bei 5 W/m ² stark verlängert)
Preece et al. 1999	Mobiltelefon	U/K	analog 915 GSM 915	1 W 0.125 W	~2.3 ~0.3	Abnahme der Reaktionszeit in Wahl-Reaktionstest	Fehlerrate in Reizverarbeitungstests (Arbeitsgedächtnis) Reaktionszeiten in weiteren Tests
Freude et al. 2000	Mobiltelefon	U/K	GSM 916.2	0.35	0.9		Genauigkeit bei einem Reaktionstest Reaktionszeit in visuellem Test
Koivisto et al. 2000b	Mobiltelefon	U/M	GSM 902	0.25 W	~0.6	Abnahme der Fehlerrate bei Wachsamkeitstest Abnahme der einfachen Reaktionszeit und der Reaktionszeit bei Wachsamkeitstest Abnahme der Rechenzeit	Fehlerrate (ausser bei Wachsamkeitstest), Zeit für Bild-/Objekt-erkennung, Semantik, Wahlreaktionszeit
Koivisto et al. 2000a	Mobiltelefon	U/M	GSM 902	0.25 W	~0.6	Abnahme der Reaktionszeit bei hoher Arbeitsgedächtnisladung	Arbeitsgedächtnis: Fehlerrate, Zeit
Krause et al. 2000a	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	~0.6		Fehlerrate und Reaktionszeiten in visuellem Test zum Arbeitsgedächtnis
Krause et al. 2000b	Mobiltelefon	U/K	GSM 900	0.25 W	~0.6		Fehlerrate in auditivem Gedächtnistest
Jech et al. 2001	Mobiltelefon	U/K ¹⁾	GSM 900	0.25 W	0.06	Abnahme der Reaktionszeit für Mustererkennung in jedem von drei Tests (bei Narkolepsie-Patienten)	Fehlerrate
Lee et al. 2001	Mobiltelefon ²⁾	L	-	bei Normalgebrauch	<~2	Abnahme der Fehlerrate in einem Aufmerksamkeitstest (Wege zeichnen)	Fehlerrate in zwei Aufmerksamkeitstests (Sortieren, Worterkennung)
Maier 2001	Mobiltelefon	U/K ¹⁾	GSM 902	1 mW/m ²	~8·10 ⁻⁵	Zunahme der Zeit für Bestimmung der Ordnungsschwelle (= verzögerter Lerneffekt)	
Croft et al. 2002	Mobiltelefon	U	GSM 900	~3–4 mW	~0.009		Fehlerrate Reaktionszeit
Edelstyn and Oldershaw 2002	Mobiltelefon	U	GSM 900		1.2	Zunahme der Aufmerksamkeitskapazität und Abnahme der Verarbeitungszeit in drei von sechs Tests	
Lass et al. 2002	λ/4-Antenne, 10 cm vom Kopf	U	gepulst mit 7 Hz, 450	1 W Pulsleistung	0.0095 ³⁾	Abnahme der Fehlerrate in einem Kurzzeitgedächtnistest Variabilität der Testresultate in zwei von drei Tests	Fehlerrate in zwei Aufmerksamkeitstests
Haarala et al. 2003a	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	0.993		Reaktionszeit und Fehlerrate in Arbeitsgedächtnistest
Haarala et al. 2003b	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	1.2 (SAR ₁)		Reaktionszeit und Fehlerrate in 13 visuellen Reaktions- und Aufmerksamkeitstests

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Lee et al. 2003	Mobiltelefon	U	GSM 1900	k.A.	<~2	Abnahme der Reaktionszeit (in einem von zwei Aufmerksamkeitstests)	Fehlerrate
Smythe et al. 2003	Mobiltelefon	U ¹⁾	GSM 1800	k.A.	0.79	Abnahme der Fehlerrate in Kurzzeitgedächtnistest (nur bei Männern)	Fehlerrate in Langzeitgedächtnistest
Zwamborn et al. 2003	Antenne, Abstand: 3 m	U	GSM 900	1 V/m Pulsspitze	0.045 mW/kg	Abnahme der Reaktionszeit in einem Vergleichstest (Gruppe B)	Reaktionszeiten und Aufmerksamkeitsleistungen
			GSM 1800	1 V/m Pulsspitze	0.082 mW/kg		Reaktionszeiten und Aufmerksamkeitsleistungen
			2100 UMTS-ähnlich	1 V/m Effektivwert	0.078 mW/kg		Reaktionszeit und Aufmerksamkeit in den übrigen 29 Tests
Curcio et al. 2004	Mobiltelefon	U ¹⁾	GSM 902.4	0.25 W	0.5	Abnahme der Reaktionszeit in zwei akustischen Tests (einfache Reaktionszeit und Wahl-Reaktionszeit)	Fehlerrate in zwei akustischen Tests Reaktionszeit und Fehlerrate in einem visuellen und einem arithmetischen Test
Haarala et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	0.99		Reaktionszeit und Fehlerrate in vier visuellen Tests zum Kurzzeitgedächtnis
Hamblin et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM 894.6	0.25 W	~0.6	Zunahme der Reaktionszeit in einem akustischen Aufmerksamkeitstest (oddball task)	Fehlerrate
Hinrichs und Heinze 2004	Mobiltelefon	U	GSM-ähnlich 1870	0.125 W	0.61		Reaktionszeiten und Anteil korrekter Antworten in einem Gedächtnistest
Krause et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	0.648	Zunahme der Fehlerrate in einem akustischen Gedächtnistest	
Papageorgiou et al. 2004, 2006	Dipolantenne, 20 cm vom Kopf	U	unmodulierter Träger 900	3 V/m	?		Leistung in einem Wechsler-Gedächtnistest
Besset et al. 2005	Mobiltelefon	K ¹⁾	GSM 900	k.A.	0.54		Leistung in 22 Tests zu Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Reaktionszeit
Haarala et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25 W	0.99		Reaktionszeit und Fehlerrate in acht Reaktions- und Gedächtnistests
Preece et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W 0.025 W	0.28 0.02		Reaktionszeit und Fehlerrate in 22 Tests
Rodina et al. 2005	Viertelwellenantenne, Abstand: 10 cm	U	450 (gepulst)	1 W Pulsleistung	0.0095 ³⁾	Zunahme der Fehlerrate in einer von elf Auswertungen zur visuellen Wahrnehmung	Anzahl korrekter Antworten in zehn von elf Auswertungen
Schmid et al. 2005	Antenne (am Ohr)	U	UMTS-ähnlich, 1970	k.A.	0.37 0.037		Leistung in vier Tests zur visuellen Wahrnehmung
Aalto et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	0.743		Reaktionszeit und Fehlerrate in Arbeitsgedächtnistest

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Abdel-Rassoul et al. 2006	Mobilfunkantennen auf dem Dach bzw. auf dem Dach des Nachbargebäudes	L	k.A.	?	?	Kognitive Leistungen in vier Tests (drei Verbesserungen, eine Verschlechterung)	Kognitive Leistungen in sechs Tests
Eliyahu et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 890.2	0.25 W	~0.6	Zunahme der Reaktionszeiten in einem Test bei linksseitiger Exposition und Beantwortung mit der linken Hand	Reaktionszeiten in 15 von 16 Tests
Hamblin et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 895	0.25 W	0.11		Reaktionszeiten in zwei Aufmerksamkeitstests
Hutter et al. 2006	Mobilfunk-Basisstation	L	GSM 900	< 0.1 0.1–0.5 > 0.5 mW/m ²	~< 8.3 · 10 ⁻⁶ ~8.3–41 · 10 ⁻⁶ ~> 41 · 10 ⁻⁶	Zunahme der Wahrnehmungsgeschwindigkeit	Leistungen in 12 Testparametern zu Gedächtnisfunktionen und Wahlreaktionszeit
Keetley et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.23 W	~0.5	Verschlechterung in fünf Testparametern (Reaktionszeit und Wahlreaktionszeit) Verbesserung in zwei Testparametern (Arbeitsgedächtnis)	Leistungen in 11 anderen Testparametern
Regel et al. 2006	Laborantenne, Abstand: 2 m	U	UMTS-basisstationsähnlich, 2100	1 V/m 10 V/m	0.045 mW/kg 4.5 mW/kg		Geschwindigkeit und Fehlerraten in sechs kognitiven Tests
Russo et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 888 CW 888	k.A.	1.4		Reaktionszeiten in fünf Aufmerksamkeitstests (beide Expositionsarten)
Terao et al. 2006	Mobiltelefon	U ¹⁾	PDC 800	0.27 W	0.054		Reaktionszeiten und Fehlerraten in Wahlreaktionstest
Wilén et al. 2006a	Mobiltelefon, Antenne in 8.5 cm Entfernung vom Kopf	U ¹⁾	GSM 900		0.8		Leistungen in Tests zur visuellen Wahrnehmung und zum Kurzzeitgedächtnis

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; L = Langzeit, U = unmitelbar, K = Kurzzeit; ~ bezeichnet geschätzte Werte.

U = unmitelbar, K = Kurzzeit, M = mittel, L = Langzeit; ~ bezeichnet geschätzte Werte; CW = continuous wave; PDC = personal digital cellular, japanisches Mobiltelefonssystem

1) Tests wurden nicht während der Exposition durchgeführt.

2) Vergleich zwischen Mobiltelefonbenutzern und -nichtbenutzern, keine Exposition während des Tests

3) Bezugsvolumen nicht angegeben

2.2.4 Gehör und Gleichgewichtsorgan

Auditorisch evozierte Potenziale sind durch Schallreizung des Hörorgans auslösbare Änderungen der Nervenpotenziale im Innenohr und im Gehirn. Die Wellen der auditorisch evozierten Potenziale lassen sich nach ihrer Latenz in frühe (1 bis 10 ms), mittlere (10 bis 50 ms) und späte Potenziale (> 50 ms) unterteilen. Frühe Potenziale werden eher Ursprungsorten in Innenohr, Hörnerv und Hirnstamm zugeordnet, späte Potenziale entsprechen Ursprungsorten in der Grosshirnrinde. Gemäss ihrer Latenzzeit werden die Wellen von I bis VI durchnummeriert, die Abstände zwischen den Wellenmaxima werden als Inter-Peak-Latenzen bezeichnet.

Otoakustische Emissionen sind Schallschwingungen, die von der Gehörgangsschnecke (Cochlea) des Innenohrs erzeugt werden und die sich mit einem Mikrophon im äusseren Gehörgang aufzeichnen lassen. Evozierte otoakustische Emissionen entstehen durch einen kurzen akustischen Reiz und werden nach der Stimulation gemessen. Beim Verzerrungs- oder Distorsionsprodukt der otoakustischen Emissionen handelt es sich um Schwingungen, die das Innenohr während der Anregung mit zwei gleichzeitig angebotenen Tönen produziert.

Sowohl auditorisch evozierte Potenziale als auch otoakustische Emissionen werden zur objektiven Beurteilung des Gehörs eingesetzt, zum Beispiel im Rahmen von Reihenuntersuchungen. Die klassische Audiometrie dient dagegen der Bestimmung der subjektiven Hörschwellen bei verschiedenen Tonfrequenzen nach Angaben der Patienten oder Probanden.

Die Untersuchung des Gehörs im Zusammenhang mit Hochfrequenzexposition ist neu. Bis zum Bericht UM 162 lagen nur einzelne Studien vor, in den letzten drei Jahren sind 17 Arbeiten erschienen. Ein weiteres Experiment befasste sich mit der Funktion des Gleichgewichtsorgans im Innenohr. Die Ergebnisse der Studien sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Arai et al. 2003 untersuchten an zehn Männern und fünf Frauen den Einfluss einer dreissigminütigen Mobiltelefonexposition auf die Reizleitung und Reizbeantwortung des Hörsystems. Jeweils vor und direkt nach der Exposition wurden die auditorisch evozierten Hirnstammpotenziale, die Erholungszeit der Potenziale nach den akustischen Reizen und die mittlere Latenzzeit untersucht. Für keine der drei Zielgrössen zeigte sich ein Expositionseffekt. Die in einer früheren Studie beobachtete Verzögerung der Welle V nach fünfzehnminütiger Exposition (Kellényi et al. 1999) liess sich nicht replizieren. Die Expositionsangaben in der Publikation sind unvollständig.

In der Untersuchung von Bak et al. 2003 wurden jeweils 15 Probanden gegenüber einem Mobiltelefon mit einer Frequenz von 450 MHz, 935 MHz oder 1800 MHz exponiert. Die Exposition dauerte 20 Minuten und erfolgte zuerst an der rechten, dann an der linken Kopfseite. Das Mobiltelefon wurde im Sinne einer intermittierenden Exposition vier Mal pro Minute aktiviert mit Intervallen von einer Sekunde zwischen den Expositionen. Vor, während und unmittelbar nach der Exposition wurden die auditorisch evozierten Hirnstammpotenziale abgeleitet. Im Zusammenhang mit der

Resultate

Mobiltelefonexposition ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in den Latenzzeiten der Wellen I, III und V oder den Inter-Peak-Latenzen I bis V. Die Angaben zur Intensität der Hochfrequenzexposition in der Publikation sind mangelhaft. Es ist nicht ersichtlich, ob die Zuteilung zu den drei Expositionsgruppen zufällig erfolgte und ob die Befunde für beide Kopfseiten getrennt oder gemeinsam ausgewertet wurden.

Monnery et al. 2004 registrierten die otoakustischen Emissionen von 12 Probanden mit und ohne Mobiltelefonexposition. Es zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Aufzeichnungen ohne Telefon, während Exposition durch ein Mobiltelefon im Empfangsmodus oder bei ausgehendem Anruf. In der Publikation fehlen entscheidende Informationen zur Exposition (Art des Signals, Expositionsdauer, Sendeleistung des Telefons etc.) und zur Auswertung der Resultate. In einer früheren Studie hatten sich keine Veränderungen der otoakustischen Emissionen nach Mobiltelefonexposition ergeben (Ozturan et al. 2002).

Das Verzerrungsprodukt der otoakustischen Emissionen wurde von Janssen et al. 2005 an 28 Personen untersucht. Exponiert wurde mit einem mobiltelefonähnlichen Signal (900 MHz, Pulsintervalle: 24.2 ms), die Auslösung der otoakustischen Emissionen erfolgte mit drei verschiedenen Tönen in vier verschiedenen Lautstärken. Der statistische Vergleich der Ergebnisse der Gesamtgruppe in allen zwölf Tests ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen Scheinexposition und realer Exposition. Die geschlechtsspezifische Analyse zeigte ohne Korrektur für multiples Testen bei Frauen einen statistisch signifikanten Unterschied in einem Test (3750 Hz, 60 dB). Wenn in der Auswertung die zeitliche Schwankung des Verzerrungsprodukts berücksichtigt wurde (polynome Anpassung), ergab sich bei vier Probanden in mindestens einem von zwölf Tests eine expositionsabhängige Zunahme des Verzerrungsprodukts von über 0.25 dB. Gemäss den Autoren können kleine Effekte der Hochfrequenzstrahlung auf die Funktion der äusseren Haarzellen des Innenohrs aufgrund dieser Resultate nicht ausgeschlossen werden. Sie empfehlen, die Befunde in technisch verbesserten Experimenten an Menschen und Tieren mit unverändertem Mobiltelefonsignal und bei höheren Intensitäten zu überprüfen.

Die französische Forschergruppe von Maby et al. 2004 untersuchte auditorisch evozierte Potenziale unter Mobiltelefonexposition an neun gesunden Probanden und acht Personen mit Temporallappen-Epilepsie. Die Auswertung ergab für einzelne Untersuchungsparameter in beiden Teilnehmergruppen statistisch signifikante Veränderungen in verschiedene Richtungen. In der Folgearbeit zeigten sich in beiden Gruppen Veränderungen eines Korrelationskoeffizienten unter Mobiltelefonexposition (Maby et al. 2005). Die Potenzialdifferenzen waren bei Gesunden und Epilepsiepatienten an verschiedenen EEG-Elektroden lokalisiert (Maby et al. 2006). In den Analysen aller drei Studien wurden mehrere Auswahlsschritte getroffen und sehr viele Tests durchgeführt. Es kamen nur bestimmte EEG-Elektroden und einzelne Zielgrössen zur Auswertung. Konsistente Veränderungen der evozierten Potenziale waren nicht zu beobachten.

Eine experimentelle Studie von Oysu et al. 2005 untersuchte die Latenzzeiten der auditorisch evozierten Potenziale in Hörnerv und Hirnstamm nach einer fünfzehnminütigen Mobiltelefonexposition am rechten Ohr. Bei den insgesamt 18 Probanden zeigten

sich keine statistisch signifikanten Veränderungen der absoluten Latenzzeiten oder der Inter-Peak-Latenzen der Wellen I, III und V. Die Expositionsangaben in der Publikation sind unzureichend.

Das Doppelblindexperiment von Parazzini et al. 2005 ergab keine Beeinflussung des Verzerrungsprodukts otoakustischer Emissionen respektive seiner Komponenten nach zehnmütiger Exposition gegenüber einem GSM-Mobiltelefon mit Trägerfrequenzen von 900 oder 1800 MHz (jeweils 6 Probanden). Die Angaben in der Publikation bezüglich Sendeleistung und SAR-Wert sind nicht eindeutig.

Pau et al. 2005 untersuchten an 13 Personen, ob es durch Exposition gegenüber zwei mobiltelefonähnlichen Hochfrequenzsignalen zu einer Erwärmung im Bereich des Gleichgewichtsorgans im Innenohr kommt. Bei einer Erwärmung über 0.1 °C wäre das Auftreten eines Nystagmus (= Augenzittern) und eines Schwindelgefühls zu erwarten. In den Experimenten wurde weder beim GSM-Signal, noch beim kontinuierlichen Signal eine expositionsbedingte Reaktion in der Nystagmographie beobachtet. In einem weiteren Experiment untersuchten die Autoren unter denselben Expositionsbedingungen Veränderungen der auditorisch evozierten Potenziale bei 12 Probanden (Sievert et al. 2005). Der statistische Vergleich ergab keine signifikanten Unterschiede in den Latenzen der Wellen III bis V und den Inter-Peak-Latenzen.

An der Doppelblindstudie von Uloziene et al. 2005 nahmen insgesamt 30 Personen teil. Fünfzehn Probanden wurden gegenüber einem 900-MHz-Mobiltelefon exponiert, die übrigen 15 gegenüber einem Mobiltelefon mit einer Frequenz von 1800 MHz. Die audiometrische Untersuchung der Hörschwellen für sieben Töne von 0.4 bis 8 kHz und die Aufzeichnung der evozierten otoakustischen Emissionen erfolgte unmittelbar vor und nach der zehnmütigen Mobiltelefonexposition respektive Scheinexposition. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in den Hörschwellen-Mittelwerten, weder bei 900 noch bei 1800 MHz oder in der Gesamtauswertung. Auch die Amplituden der evozierten otoakustischen Emissionen wiesen keine statistisch signifikanten Veränderungen auf.

Mora et al. 2005 beobachteten an 20 Männern keine signifikanten Veränderungen der evozierten otoakustischen Emissionen oder der auditorisch evozierten Hirnpotenziale vor und nach Mobiltelefonexposition. In der Publikation fehlen wesentliche Informationen zur Exposition, und es werden weder Messergebnisse noch statistische Vergleiche angegeben.

In einer Kohortenstudie führten Garcia Callejo et al. 2005 an 323 Mobiltelefonbenutzern und 122 Nichtbenutzern eine audiometrische Messung für vier Tonfrequenzen durch und wiederholten diese Untersuchung drei Jahre später. In der Gruppe der Mobiltelefonbenutzer beobachteten sie eine geringe Zunahme der einzelnen Hörschwellen (um 1 bis 5 dB). Der Anstieg der mittleren Hörschwelle war statistisch signifikant, lag aber unterhalb der Definitionsgrenze für einen Hörverlust. Der Anstieg betraf beide Ohren, unabhängig von der zum Telefonieren bevorzugten Seite. Es zeigte sich eine tendenzielle, statistisch nicht signifikante Expositions-Wirkungsbeziehung im Sinne eines stärkeren Anstiegs bei intensiverem Mobiltelefongebrauch. In der Publikation

fehlen wesentliche Angaben zur Rekrutierung der Studienteilnehmer und zur Vergleichbarkeit der Gruppen. Personen mit bestehenden Gehörschäden sowie mit habitueller Lärmexposition in Beruf oder Freizeit wurden ausgeschlossen. Die mittlere Hörschwelle und das Ergebnis des statistischen Vergleichs wird nur für Mobiltelefonbenutzer angegeben.

Oktay et al. 2006 untersuchten in einer Prävalenzstudie drei Gruppen à 20 Männer mit unterschiedlicher Mobiltelefonbenutzung mittels Audiometrie und Ableitung der auditorisch evozierten Hirnstammpotenziale. Eine Gruppe bestand aus intensiven Mobiltelefonbenutzern (täglich ca. zwei Stunden seit vier Jahren), die zweite beinhaltete Personen mit moderatem Mobiltelefongebrauch (täglich 10 bis 20 Minuten seit vier Jahren), in der dritten befanden sich Probanden, die kein Mobiltelefon benutzten. Die Auswertung der auditorisch evozierten Hirnstammpotenziale ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede. In der Audiometrie zeigte sich bei intensiven Mobiltelefonbenutzern im Vergleich zu moderaten Benutzern und Nichtbenutzern ein geringer Anstieg der Hörschwellen auf dem rechten Ohr bei 4000 Hz und auf dem linken Ohr bei 500 und 4000 Hz. Aufgrund der spärlichen Angaben zur Auswahl der Probanden und zu soziodemographischen Variablen ist die Vergleichbarkeit der Gruppen fraglich. Auch zur Art der benutzten Mobiltelefone fehlen wesentliche Informationen. Es wurde nicht untersucht, ob der Hörverlust mit der zum Telefonieren bevorzugten Seite korrelierte und wie lange der Befund bei den Mobiltelefonbenutzern bereits bestand.

Dieselbe Autorengruppe untersuchte in einer arbeitsmedizinischen Studie 28 Männer, die in einer Rundfunkstation arbeiteten und in Personalwohnungen in der Nähe der Radiosender lebten, sowie 28 Kontrollpersonen (Oktay et al. 2004). Die Auswertung der auditorisch evozierten Hirnstammpotenziale ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede. In der Audiometrie zeigten sich für die exponierte Gruppe auf beiden Ohren statistisch signifikant höhere Hörschwellen bei 4000 Hz und 8000 Hz ($p < 0.01$). Messungen der Hochfrequenzexposition in den Wohnungen und in der Umgebung ergaben für beide Gruppen niedrige Belastungen mit geringen Unterschieden. In den Rundfunkstationen bestand ein durchschnittlicher Lärmpegel von 70 dB. Zu Auswahl und Exposition der Teilnehmer sowie zu zusätzlichen Einflussfaktoren bleiben in der Publikation viele Fragen offen.

Eine weitere epidemiologische Studie beinhaltete die audiometrische Untersuchung von 98 Mobiltelefonbenutzern (Kerekhanjanarong et al. 2005). Die Messungen ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen dem zum Telefonieren bevorzugten und dem anderen Ohr. Die mangelhafte Darstellung in der Publikation lässt auf methodische Mängel schliessen, eine Beurteilung der Resultate ist nicht möglich.

Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf die auditorisch evozierten Potenziale wurden in sieben experimentellen Untersuchungen und einer epidemiologischen Studie evaluiert. Hinweise auf Expositionseffekte fanden sich in den drei Arbeiten von Maby et al. und betrafen einzelne Zielgrössen. In den sechs Experimenten zu otoakustischen Emissionen wurden keine expositionsabhängigen Veränderungen beobachtet. Die Gesamtbewertung der experimentellen Studien wird dadurch limitiert, dass sich die Studien hinsichtlich Exposition (Frequenz, Intensität, Modulation, Dauer), Versuchsab-

Bewertung

lauf und Messparametern unterscheiden. Zudem wurden jeweils nur kleine Probandengruppen untersucht. Das ist vor allem bei Messgrößen mit grosser interindividueller Variabilität problematisch (geringe statistische Power zum Nachweis diskreter Effekte).

In drei von vier epidemiologischen Untersuchungen zur Audiometrie wurden Hinweise auf einen geringen Anstieg der Hörschwellen in der exponierten Gruppe beobachtet. Zwei dieser Studien betrafen die Mobiltelefonbenutzung, eine die Exposition durch Rundfunksender. Ein methodischer Vorbehalt betrifft die Vergleichbarkeit der Teilnehmergruppen in Bezug auf potenzielle Störfaktoren. Da neben Alter und beruflicher Lärmbelastung auch Freizeitaktivitäten wie Discobesuche oder exzessive Kopfhörerbeschallung das Gehör beeinträchtigen, vermindern entsprechende Unterschiede zwischen Exponierten und Nichtexponierten die Aussagekraft der Studien.

Insgesamt überwiegen zum jetzigen Zeitpunkt Studien, in denen keine kurzfristigen Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf die Wahrnehmung akustischer Reize beobachtet wurden. Die unterschiedlichen Studienanlagen und die methodischen Mängel der Bevölkerungsstudien lassen noch keine Beurteilung zu.

Tab. 8 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf Gehör und Gleichgewichtsorgan.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Messparameter	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Ozturan et al. 2002	Mobiltelefon	U	GSM 900	k.A.	<~2	otoakustische Emissionen		Amplituden der otoakustischen Emissionen
Arai et al. 2003	Mobiltelefon	U	PDC(?), 800	0.27 W	~0.6	auditorisch evozierte Hirnstammpotenziale		Erholungszeit der Potenziale, mittlere Latenzzeit
Bak et al. 2003	Mobiltelefon ¹⁾	U	450 935 1800	0.15 W/m ² 0.052 W/m ² 0.11 W/m ²	?	auditorisch evozierte Hirnstammpotenziale		Latenzzeit der Wellen I, III und IV, Inter-Peak-Latenzen I bis V
Monnery et al. 2004	Mobiltelefon	U	k.A.	k.A.	<~2	otoakustische Emissionen		Amplituden der otoakustischen Emissionen
Maby et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM (Frequenz?)	k.A.	1.4	auditorisch evozierte Potenziale	beide Gruppen: – N100-Amplitude Epilepsiepatienten: + N100-Latenz gesunde Probanden: – N100-Latenz + P200-Amplitude	alle anderen Parameter der evozierten Potenziale
Oktay et al. 2004	Radiosender	L	1.026	0.48 V/m (in Wohnungen) bis 36.23 V/m (Sendegebäude, aussen)	k.A.	Hörschwelle auditorisch evozierte Hirnstammpotenziale	Beruflich Exponierte: Hörschwelle: bei 4000 Hz und 8000 Hz auf beiden Ohren	Hörschwellen bei vier anderen Tonfrequenzen, auditorisch evozierte Hirnstammpotenziale
Garcia Callejo et al. 2005	Mobiltelefon	L	k.A.	bei Normalgebrauch	<~2	Hörschwelle	Mobiltelefonbenutzer: Hörschwellen nach drei Jahren (+1 bis 5 dB), mittlere Hörschwelle	

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Messparameter	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Janssen et al. 2005	Monopol-Antenne, Abstand: 5 cm	U	GSM mobiltelefon-ähnlich, 900	0.465 W	0.1	otoakustisches Verzerrungsprodukt	Niveau des otoakustischen Verzerrungsprodukts in einem von 12 Tests in der Gruppe der Frauen	Gesamtgruppe: keine Veränderung; Anstieg bei 4 von 28 Probanden
Kerekhanjanarong et al. 2005	Mobiltelefon	L	diverse	bei Normalgebrauch	<~2	Hörschwelle		Hörschwelle, Sprachverständnis
Maby et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25 W	1.4	auditorisch evozierte Potenziale	Korrelationskoeffizient an Elektrode FP2	Korrelationskoeffizienten an allen anderen Elektroden
Oysu et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 900/1800?	?	max. 0.82	auditorisch evozierte Potenziale		Latenzzeiten und Inter-Peak-Latenzen der Wellen I, III und V
Parazzini et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 900 GSM 1800	Pulsleistung: 2 W 1 W	Cochlea: 0.41 0.19	otoakustisches Verzerrungsprodukt		otoakustisches Verzerrungsprodukt
Pau et al. 2005	Mobiltelefon, Abstand: ca. 5 cm	U	GSM 889.6 und kontinuierliches Signal	0.275 W	1.9 (SAR ₁)	Reaktion des Gleichgewichtsorgans (Nystagmus)		Nystagmus
Sievert et al. 2005	Mobiltelefon, Abstand: ca. 5 cm	U	GSM 889.6 und kontinuierliches Signal	0.275 W	1.9 (SAR ₁)	auditorisch evozierte Potenziale		Latenzzeiten und Inter-Peak-Latenzen der Wellen I, III und V
Uloziene et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 900 GSM 1800	Pulsleistung: 2 W 1 W	<~2	Hörschwelle evozierte otoakustische Emissionen		Hörschwelle evozierte otoakustische Emissionen
Mora et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 900–1800 (?)	k.A.	<~2	auditorisch evozierte Potenziale evozierte otoakustische Emissionen		auditorisch evozierte Potenziale evozierte otoakustische Emissionen
Maby et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25 W	1.4	auditorisch evozierte Potenziale	+ N100-Latenz in kontralateraler Frontalregion bei Epilepsiepatienten + P200-Amplitude in Frontalregion bei Probanden	alle anderen Parameter und EEG-Regionen
Oktay et al. 2006	Mobiltelefon	L	k.A.	bei Normalgebrauch	<~2	Hörschwelle auditorisch evozierte Hirnstammpotenziale	Intensive Mobiltelefonbenutzer: Hörschwelle bei 4000 Hz (beide Ohren) und 500 Hz (linkes Ohr)	Hörschwellen bei vier anderen Tonfrequenzen, auditorisch evozierte Hirnstammpotenziale

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; L = Langzeit, U = unmittelbar, K = Kurzzeit; ~ bezeichnet geschätzte Werte.

U = unmittelbar, K = Kurzzeit, M = mittel, L = Langzeit, PDC = personal digital cellular; k.A. = keine Angaben;

ERP = ereignisbezogene Potenziale, ~ bezeichnet geschätzte Werte,

1) Basisinformationen zur Exposition fehlen. Da es sich um eine Nahfeldsituation handelt, ist die Angabe der Leistungsfussdichte problematisch.

2.2.5 Herz-/Kreislauffunktionen, Thermoregulation, Hautdurchblutung

Seit dem Bericht UM 162 sind sechzehn Publikationen erschienen, die in irgend einer Weise Herzfunktionen oder die Hautdurchblutung in die Untersuchungen einbezogen haben. Dabei handelt es sich überwiegend um experimentelle Studien. Zudem liegen zwei arbeitsmedizinische Untersuchungen an stark exponierten Plastikschweißern vor und eine kaum interpretierbare Studie an Radio- und Fernsehangehörigen. Zwei Arbeiten befassen sich mit der erhöhten Hautdurchblutung am Ohr und im Wangenbereich durch in der Hand gehaltene Telefone. In einer weiteren experimentellen Studie wurde die Regulierung der Körpertemperatur untersucht bei Hochfrequenzexposition, die Wärme im Körper erzeugte, also über dem Grenzwert für berufliche Belastungen lag. Die übrigen Experimente betrafen Blutdruck und Herzfrequenz sowie ihre Variabilität, teilweise auch die Haut- oder Fingerdurchblutung und den Hautwiderstand als Ausdruck einer Beeinflussung des autonomen Nervensystems.

a) Blutdruck, Puls, Herzfrequenzvariabilität

Resultate

Hietanen et al. 2002 exponierten 20 Personen (13 Frauen, 7 Männer), die sich selbst als hypersensibel gegenüber EMF bezeichneten, mit einem analogen Mobiltelefon, einem 900- und einem 1800-MHz-GSM-Mobiltelefon (Abstand 1 bis 5 cm) während je 30 Minuten, einmal ab- und einmal angeschaltet. Pro Tag wurden drei bis vier Expositionen durchgeführt, die Scheinexposition jeweils als erste oder zweite. Während den Expositionen wurden alle fünf Minuten Puls und Blutdruck gemessen. Der systolische Blutdruck und die Herzfrequenz war bei Scheinexposition am höchsten und nahm im Verlauf der Sitzungen tendenziell ab. Ein systematischer Trend bestand nur für die Exposition mit einem analogen Mobiltelefon. In Bezug auf den diastolischen Blutdruck zeigten sich keine Unterschiede. Da die Reihenfolge von Schein- und echten Expositionen nicht zufällig war und auch im Analysemodell nicht berücksichtigt wurde, lässt sich nicht auseinanderhalten, ob die sinkende Tendenz von Puls und systolischem Blutdruck durch das Angewöhnen an die Testsituation zustande kam oder ob ein echter, expositionsbedingter Unterschied bestand.

Tahvanainen et al. 2004 exponierten doppelblind 32 Probanden mit einem Mobiltelefon auf der Kopfseite der dominanten Körperhälfte mit der Frequenz von 900 oder 1800 MHz. Die Dauer der Exposition betrug 35 Minuten. Reale und Scheinexpositionen erfolgten in zufälliger Reihenfolge. Gemessen wurden Blutdruck und Herzfrequenz während Atmungstests, bei einem Kipptischtest sowie vor und nach Valsalva-Manövern. Es zeigten sich keine Unterschiede zwischen dem Verlauf von Blutdruck und Puls in Abhängigkeit von der Belastung während oder kurz nach den Tests. Die Studie sollte die Ergebnisse der im Bericht UM 162 zitierten Studien von Braune et al. (1998, 2002) überprüfen. Diese Autorengruppe hatte in der ersten Publikation über einen leichten Blutdruckanstieg bei Mobiltelefonexposition berichtet, der sich aber in ihrer eigenen Replikation mit zufälliger Reihenfolge von Exposition und Scheinexposition nicht bestätigte. Auch Tahvanainen et al. 2004 beobachteten einen leichten Blutdruckanstieg im Verlauf der Experimente, unabhängig von der jeweiligen Abfolge der Expositionsarten. Die Hypothese, dass dies mit dem Testablauf und nicht mit der Exposition zusammenhing, wurde damit bestärkt.

In der erweiterten Analyse ihrer früheren Studienresultate untersuchten Huber et al. 2003 neben den Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf das Schlaf-EEG auch die Effekte auf den Puls und die Herzfrequenzvariabilität. Im ersten Experiment (Borbély 1999) waren 24 Männer während der ganzen Nacht einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt worden, das dem einer Mobilfunkbasisstation ähnlich war. Dabei war das Feld abwechslungsweise je 15 Minuten ein- oder ausgeschaltet. Mit drei $\lambda/2$ -Dipolantennen wurde im Kopfbereich der Probanden ein homogenes Feld erzeugt, das eine maximale lokale SAR_{10} von 1 W/kg zur Folge hatte. Während der ganzen Nacht wurde das EKG registriert und die Blutdruckintervalle und Pulsrate pro 20 Sekunden bestimmt. Im zweiten Experiment (Huber et al. 2000) waren 16 Männer zweimal vor einem dreistündigen Schlaf während 30 Minuten einem gleich starken Feld wie im ersten Experiment ausgesetzt worden. Dabei wurde einseitig einmal die rechte und einmal die linke Hemisphäre exponiert, das dritte Mal erfolgte eine Scheinexposition. Hier wurde das EKG bereits während der Exposition in der Wachphase registriert.

Während der Exposition im Schlaf (erstes Experiment) wurde die Pulsrate nicht beeinflusst. Dagegen änderte sich die Herzfrequenzvariabilität: Die Analyse der normalen R-R-Intervalle im EKG ergab beim Einschlafen eine Powerabnahme im Frequenzbereich von 0.1 bis 0.11 Hz und eine Zunahme im Bereich von 0.29 bis 0.31 Hz während der ersten drei Nicht-REM-Phasen des Schlafs. Auch während der dreissigminütigen Exposition im Wachzustand (zweites Experiment) zeigten sich keine Pulsunterschiede zwischen der Scheinexposition und den beiden unilateralen Expositionen. Hingegen war der Puls erniedrigt in der Phase zwischen dem Lichterlöschen und dem Einschlafen, in der Aufwachphase und im Schlafstadium 1 während des ganzen Schlafs. Auch in diesem Experiment zeigten sich in den ersten drei Schlafstunden nach der Exposition Änderungen der Herzfrequenzvariabilität (Frequenzbereich: 0.18 bis 0.22 Hz). Die Autoren weisen darauf hin, dass bestimmte Veränderungen des Schlaf-EEGs und der Herzfrequenzvariabilität miteinander in Beziehungen stehen könnten. Über Wirkungspfade oder -mechanismen könne aber noch nicht spekuliert werden.

Mann et al. 2005 exponierten bereits Mitte der Neunzigerjahre zwölf gesunde junge Männer nach einer Eingewöhnungsnacht während einer Nacht gegenüber einem GSM-Mobiltelefon (acht Stunden, 0.5 W/m², 900 MHz) oder Scheinexposition und führten Polysomnographien (EEG, EKG, EOG, EMG) durch. In der Publikation von 2005 wird die Herzfrequenzvariabilität in den verschiedenen Schlafphasen verglichen. Die Einschlafdauer und die Dauer der REM-Phasen waren unter Exposition verkürzt. Daher wurde die Herzfrequenzvariabilität nur für die REM-Phasen, das Schlafstadium 2 und die Tiefschlafphasen ausgewertet (Durchschnittswerte über die ganze Nacht). Es gab deutliche Unterschiede in der Herzfrequenzvariabilität zwischen den drei Schlafphasen, aber nicht zwischen Exposition und Scheinexposition.

Wilén et al. 2006a wählten aus einer früheren Querschnittstudie 20 Versuchspersonen aus, welche unspezifische Symptome beim mobilen Telefonieren angegeben hatten (EMF-Sensible), und 20 Personen ohne solche Beschwerden. Zu den Beschwerden gehörten Schwindelgefühl, Unwohlsein, Konzentrations- und Sensibilitätsstörungen. Die Versuchspersonen wurden im Wachzustand während 30 Minuten einem GSM-Telefonsignal oder einer Scheinexposition ausgesetzt. Die Antenne befand sich in

8.5 cm Entfernung vom Kopf, das EKG wurde registriert und die Herzfrequenzvariabilität ausgewertet. Die EMF-Sensiblen hatten bereits vor der Exposition eine höhere Aktivität in den niedrigen und eine verminderte Aktivität bei den hohen Frequenzen, was zu einem erhöhten LF/HF-Verhältnis führte. Auch hier gab es keine Unterschiede zwischen der Exposition und der Scheinexposition.

Parazzini et al. 2006 exponierten 26 gesunde junge Personen gegenüber einem auf Maximalleistung hochregulierten GSM-Mobiltelefon (900 MHz) resp. Scheinexposition. Die Exposition dauerte 26 Minuten, von denen die ersten 13 Minuten liegend, der Rest der Belastungszeit stehend zugebracht wurden. Zielgrösse war die Herzfrequenzvariabilität, welche durch das autonome Nervensystem reguliert wird. Die SAR auf Höhe des Hypothalamus wurde auf maximal 0.02 W/kg berechnet. In der Ruhephase gab es keine Unterschiede zwischen der echten Exposition und der Scheinexposition. Nach dem Aufstehen nahm die Power der niederfrequenten Anteile der Herzfrequenzvariabilität bei der echten Belastung etwas stärker zu als bei der Scheinbelastung, während die Indikatoren der Herzfrequenzvariabilität aus dem zeitlichen Bereich etwas stärker abnahmen. Die meisten Indikatoren blieben unverändert, der Puls nahm in beiden Situationen gleichermassen zu.

Die Auswirkungen der Emissionen der in Asien, den USA und Kanada gebräuchlichen CDMA-Telefone auf den Kreislauf, deren Basistechnik etwa der UMTS-Technologie entspricht, wurden in einer experimentellen Studie an Jugendlichen und Erwachsenen in Südkorea von Nam et al. 2006 untersucht. Die 30 Minuten Befeldung mit einer SAR von 1.6 W/kg hatte keinen Einfluss auf den Blutdruck oder die Pulsrate.

Die äusserst knappe Beschreibung der Untersuchung der fetalen Herzfrequenz bei telefonierenden schwangeren Frauen von Celik et al. 2004 lässt auf methodische Schwächen schliessen; eine Bewertung der Ergebnisse ist nicht möglich.

Eine arbeitsmedizinische Querschnittserhebung an 110 elektromagnetisch exponierten Angestellten eines Radio- und eines Fernsehsenders in Bulgarien und an ebenso vielen nicht exponierten Angestellten (Vangelova et al. 2006) ergab, dass die Exponierten einen höheren Blutdruck und höhere Blutfettwerte hatten. In der multivariaten Analyse waren die Werte für das Gesamtcholesterin und LDL-Cholesterin signifikant mit der aus Messungen errechneten durchschnittlichen langjährigen Hochfrequenzbelastung assoziiert. Verschiedene Fragen blieben in der Publikation offen (Medikation, Auslese der Teilnehmer, enge Korrelation der Risikofaktoren), so dass keine Schlüsse gezogen werden können.

Eine arbeitsmedizinische Studie untersuchte 35 Plastikscheisser, welche bei ihrer Arbeit Frequenzen von 27 MHz mit einer durchschnittlichen Intensität im Bereich der ICNIRP-Grenzwerte für beruflich Exponierte sowie relativ starken Kontaktströmen ausgesetzt waren, und 37 Kontrollpersonen ohne solche Expositionen (Wilén et al. 2004). Die Resultate ergaben keine Unterschiede im Blutdruck, keine Arrhythmien oder Ischämiezeichen im EKG, jedoch einen langsameren Puls und vor allem in der Nacht gehäuft Bradykardien bei den Plastikscheissern. Die Auswertung der Herzfrequenzvariabilität zeigte in der Gruppe der Exponierten eine erhöhte Variabilität der

niederfrequenten Komponenten in der Nacht im Vergleich zur Kontrollgruppe. Dieser Anstieg der VLF- und LF-Komponenten nahm aber innerhalb der exponierten Gruppe nicht mit der am Arbeitsplatz gemessenen Hochfrequenzexposition zu. Wegen der fehlenden Dosis-Wirkungsbeziehung vermuten die Autoren einen indirekten Effekt, der bei langfristiger hoher Exposition durch die Beanspruchung thermoregulatorischer Mechanismen zustande kommen könnte (Wilén et al. 2006b).

Zwei Studien eines deutschen Forschungsteams (Müller et al. 2004, Kantz et al. 2005) befassten sich mit gesundheitlichen Auswirkungen der Exposition durch Radarsysteme in Autos. Weder die sehr geringe 15-minütige Exposition mit einem 77-GHz-Feld von 30 mW/m^2 , noch die insgesamt gleichlange Belastung mit 5.8 bis 110 GHz in Zeitschlitzten von 5 ms für jede Frequenz mit einer Intensität von 0.6 W/m^2 zeigten Auswirkungen auf Blutdruck, Puls oder EKG der jeweils 50 Probanden.

b) Thermoregulation, Hautdurchblutung

Adair et al. 2005 untersuchte an sechs Versuchspersonen die Thermoregulation bei 220-MHz-Feldern mit hohen Intensitäten (Ganzkörperexposition bis 150 W/m^2 ; IC-NIRP-Grenzwert für beruflich Exponierte: 10 W/m^2). Die Stoffwechselrate und die Kerntemperatur, gemessen in der Speiseröhre, blieben nahezu konstant, während die Hauttemperatur geringfügig und die Hautdurchblutung und die Schweissabsonderung stark zunahm. Die Autoren schliessen daraus, dass die Thermoregulation durch Nervensignale im Zentralnervensystem kontrolliert wird und dass die Körpertemperatur bei solchen Feldern durch die erhöhte Schweissabsonderung effizient reguliert werden kann.

Nam et al. 2006 untersuchten neben Puls und Blutdruck auch den Hautwiderstand bei Exposition durch ein CDMA-Telefon (SAR: 1.6 W/kg). In der Gruppe der Jugendlichen und bei separater Auswertung der Männer nahm der Hautwiderstand im Verlauf der Exposition im Vergleich zur Nullexposition ab, bzw. die Schweissabsonderung nahm zu. Wenn die Gruppe der Erwachsenen insgesamt ausgewertet wurde, bestand kein signifikanter Unterschied, und auch die separate Auswertung für Frauen zeigte keinen Expositionseffekt. Die sehr knappe Beschreibung der Studie erlaubt keine Bewertung.

Auch in der Studie von Wilén et al. 2006a (siehe oben) wurde die Durchblutung der Finger und das elektrische Potential der Haut bei Exposition gegenüber einem GSM-Mobiltelefon untersucht. Die ebenfalls schon erwähnten Arbeiten von Müller et al. 2004 und Kantz et al. 2005 analysierten die Hauttemperatur an der Hand und ihre Leitfähigkeit während 15-minütiger Radarexposition. Keine der drei Studien beobachtete einen Einfluss der Hochfrequenzstrahlung.

Monfrecola et al. 2003 untersuchten die Durchblutung der Ohrhaut mit einem Laser-Doppler-Flussmeter während mehreren vierminütigen Phasen unterschiedlichen Kontaktes mit einem GSM-Mobiltelefon in folgender Reihenfolge: ausgeschaltet, ohne Ohrkontakt (Basis); ausgeschaltet, mit Ohrkontakt (T1); eingeschaltet, mit Ohrkontakt (T2); eingeschaltet mit Ohrkontakt und Empfang (T3), danach in umgekehrter Reihen-

folge. In jeder Versuchsphase mussten die Probanden in das Telefon sprechen. Die Mikrozirkulation nahm bis zur Phase T3 ständig zu, in dieser Phase war sie um 158 % gesteigert. Danach nahm sie ebenso regelmässig wieder ab bis zum Ausgangswert. Die Autoren interpretieren die signifikant erhöhte Mikrozirkulation der Phasen T2 und T3 (unter Exposition) im Vergleich mit der Phase T1 als unmittelbare und sofort wieder reversible Folge der EMF-Exposition und führen sie auf einen thermoregulatorischen Mechanismus zurück.

Straume et al. 2005 führten eine Pilotuntersuchung an einem einzelnen Probanden durch, um abzuklären, welcher Anteil an der Ohr- oder Wangenhauterwärmung schon durch das Anlegen des abgeschalteten Telefons (Verhinderung der Wärmeabstrahlung) oder durch die Wärmeproduktion des eingeschalteten Telefons (Batterien, Hochfrequenzfeld durch Widerstand abgeschirmt) zustande kommt, und welcher auf die eigentliche Hochfrequenzbefeldung zurückzuführen ist (Telefon normal eingeschaltet). Die Temperaturänderungen wurden mit einer Infrarotkamera gemessen. Im Vergleich zum nicht benutzten Ohr führte die Isolation durch das Telefon zur grössten Erwärmung. Die Eigenwärme des Telefons verursachte eine weitere signifikante Erwärmung. Die Hochfrequenzexposition mit minimaler Intensität von 2 mW am Ohr ergab ebenfalls eine geringe Temperaturzunahme, die Exposition mit 210 mW jedoch nicht.

In der experimentellen Studie von Esen et al. 2006 wurde an 15 Probanden die Latenzzeit bis zur Abnahme des Hautwiderstands nach einem motorischen Reiz untersucht. Durch Auslösung des Kniesehnenreflexes auf der dominanten Körperseite wurden gegenüber liegende Gehirnregionen aktiviert, die für die Regulation der elektrischen Aktivität der Haut zuständig sind. Der Hautwiderstand wurde an beiden Handflächen gemessen. Die Exposition erfolgte unter Doppelblindbedingungen mit Hilfe von zwei Mobiltelefonen, die an beiden Seiten des Kopfes angebracht waren (ipsi- oder kontralaterale Exposition sowie Scheinexposition). Die Latenzzeit bis zur Abnahme des Hautwiderstandes dauerte unter Exposition ca. 200 ms länger. Es zeigten sich keine Unterschiede zwischen ipsilateraler und kontralateraler Exposition. In der Publikation fehlen entscheidende Angaben zur Exposition und zur Durchführung des Experiments, so dass insgesamt keine Schlussfolgerungen gezogen werden können.

Die meisten experimentellen Studien beobachteten keine Veränderungen des Pulses und des Blutdrucks im Wachzustand durch Hochfrequenzstrahlung, einzelne abweichende Ergebnisse wurden später auf andere Einflüsse zurückgeführt.

Bewertung

Die von Huber et al. 2003 beobachtete Verlangsamung der Pulsrate und die Änderungen der Herzfrequenzvariabilität unter Hochfrequenzexposition vor und beim Einschlafen lassen sich nicht mit den Ergebnissen von Mann et al. 2005 vergleichen, da in dieser neuen Auswertung der zehn Jahre alten Studie die Einschlafphase wegen der mit der Exposition assoziierten Verkürzung nicht ausgewertet werden konnte. Im Wachzustand war die Herzfrequenzvariabilität nicht verändert. Das stellten im Wesentlichen auch die beiden anderen experimentellen Studien an wachen Personen fest (Wilen et al. 2006, Parazzini et al. 2006). Möglicherweise ist die Einschlafphase eine besonders empfindliche Situation, in der äussere Einflüsse vermindert sind, der parasymphatische Tonus bei der autonomen Herzaktivität aber noch nicht überwiegt.

Ein kurzfristiger Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf die autonome Regulierung des Kreislaufsystems ist während normaler Aktivität im Wachzustand aufgrund der vorliegenden Resultate eher unwahrscheinlich, kann aber noch nicht ausgeschlossen werden. Was solche Veränderungen im physiologischen Bereich langfristig für den Blutdruck bedeuten könnten, ist vorläufig offen.

Während die Thermoregulation bei Belastungen über dem ICNIRP-Grenzwert in Anspruch genommen wird, gibt es bei geringer Exposition keine sicheren Hinweise für eine vermehrte Hautdurchblutung, Zunahme der Schweissabsonderung oder Abnahme des Hautwiderstandes ausserhalb der direkt im Kontakt mit dem Mobiltelefon liegenden Körperoberfläche. Dass die Ohrhaut durch das Anlegen des Telefons und die Wärme der Telefonbatterie erwärmt wird, ist plausibel und kann die oft berichteten Wärmegefühle erklären. Ein zusätzlicher Effekt durch die Hochfrequenzstrahlung müsste noch mit weiteren Studien belegt werden.

Tab. 9 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf Herz-/Kreislauffunktionen.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Altpeter et al. 1995	Kurzwellenradiosender	L	6.1–21.8	1–50 mA/m ¹ (~0.4–20 V/m)		+ selbstberichteter Bluthochdruck	
Borkiewicz et al. 1996, Borkiewicz et al. 1997, Borkiewicz et al. 1995	Radiosender	K/L	0.74–1.5	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	GSM 900	0.25 W ³⁾	~0.6	+ diastolischer Blutdruck + systolischer Blutdruck + Vasokonstriktion – Puls	
Mann et al. 1998	Mobiltelefon	U, K	GSM 900	0.2 W/m ²	0.3		Pulsrate
Dreyer et al. 1999a	Mobiltelefon	L	800–900 u. 1800 (analog und digital)	bei Normalgebrauch	<~2		Herz-Kreislauf-Todesfälle
Braune et al. 2002	Mobiltelefon	U	GSM 900	0.25 W	0.5		diastolischer Blutdruck, systolischer Blutdruck, Vasokonstriktion, Puls
Hietanen et al. 2002	Mobiltelefon	U	CW analog 900 GSM 900 GSM 1800	1 W 0.25 W 0.125 W	~2.3 ~0.6 ~0.3	– systolischer Blutdruck (?) – Puls (?) – systolischer Blutdruck (?)	diastolischer Blutdruck
Huber et al. 2003	Drei λ/2-Antennen, 30 cm hinter dem Kopf Kopf zwischen zwei planaren Antennen, Abstand: 11 cm	U/K	GSM-basisstationsähnlich, 900		1	– Herzfrequenzvariabilität (0.1–0.11 Hz) + Herzfrequenzvariabilität (0.29–0.31 Hz)	Puls
		U	GSM-mobiltelefonähnlich, 900		1	nach Exposition: + Herzfrequenzvariabilität (0.18–0.22 Hz) – Puls	Puls im Wachzustand
Monfrecola et al. 2003	Mobiltelefon	U	GSM (Frequenz?)	k.A.	<~2	+ Hautdurchblutung am Ohr	
Celik et al. 2004	Mobiltelefon	U	k.A.	k.A.	<~2		Fetale Herzfrequenz
Müller et al. 2004	Radarsystem im Auto	U	77 000 (gepulst)	2.36 W 30 mW/m ² , Spitzenwert: 2.4 W/m ²			systolischer und diastolischer Blutdruck, Puls, AV-Überleitungszeit Hauttemperatur und Leitfähigkeit
Tahvanainen et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM 900 GSM 1800	Pulsleistung: 2 W 1 W	1.58 0.70		systolischer und diastolischer Blutdruck, Puls
Wilen et al. 2004	Berufliche Exposition, Plastikschiessen	L	27	Durchschnittswerte: elektrisches Feld: 107 V/m, magnetisches Feld: 0.24 A/m, induzierte Ströme: 101 mA		– Puls + bradykarde Episoden	Blutdruck, Ischämiezeichen im EKG

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Adair et al. 2005	Dipolantenne, Abstand: 2 bis 2.5 m	U	umoduliertes Trägersignal, 220	90, 120 und 150 W/m ²	0.41, 0.54 und 0.68 (Ganzkörper)	+ Schweissabsonderung (bei Exposition mit 120 und 150 W/m ²)	(+) Hautdurchblutung (+) Hauttemperatur Stoffwechselrate Ösophagus-Temperatur
Kantz et al. 2005	Radarsystem im Auto	U	5800–110 000 (gepulst)	0.6 W/m ²			systolischer und diastolischer Blutdruck, Puls, AV-Überleitungszeit, Hauttemperatur und Leitfähigkeit
Mann et al. 2005	Mobiltelefon, Abstand: 40 cm	U, K	GSM 900	Spitzenleistung: 8 W, 0.5 W/m ²	~0.04		Herzfrequenzvariabilität in REM-Phase, Stadium II und im Tiefschlaf
Straume et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 902	2 mW	k.A.	+ Hauttemperatur am Ohr	Hauttemperatur an der Wange
				210 mW	SAR: Ohr: 0.7 Wange: 0.81		Hauttemperatur an Ohr und Wange
Esen et al. 2006	Mobiltelefon	U	900 (gepulst)	k.A.	k.A.	+ Latenzzeit bis zur Abnahme des Hautwiderstands nach motorischem Reiz	
Nam et al. 2006	Mobiltelefon	U	CDMA 835, unmoduliertes Trägersignal	Spitzenleistung: 0.3 W	max. 1.6	– Hautwiderstand bei Jugendlichen und in der Gruppe der Männer	systolischer und diastolischer Blutdruck, Puls; Hautwiderstand bei Erwachsenen insgesamt und in der Gruppe der Frauen
Parazzini et al. 2006	Mobiltelefon	U	GSM 900	Pulsleistung: 2 W	< 0.02 im Hirnstamm	Herzfrequenzvariabilität nach dem Aufstehen. + LF – SDNN	Herzfrequenzvariabilität im Liegen: alle Indikatoren; nach dem Aufstehen: RMSSD, PNN50, HF, LF/HF-Quotient
Vangelova et al. 2006	Berufliche Exposition: Angestellte von TV- und Radiosendern	L	6–25 und 66–900	Radio: 31 bis 40 mW/m ² TV: 12 bis 19 mW/m ²		+ Gesamtcholesterin + LDL-Cholesterin	systolischer und diastolischer Blutdruck, HDL-Cholesterin, Gesamtcholesterin/HDL-Quotient
Wilén et al. 2006a	Mobiltelefon, Antenne in 8.5 cm Entfernung vom Kopf	U	GSM 900	k.A.	0.8		Herzfrequenzvariabilität, Puls
Wilén et al. 2006b	Berufliche Exposition: Plastikschweisser	L	27	Durchschnittswerte: Elektrisches Feld: 88 V/m, Magnetfeld: 0.19 A/m		Herzfrequenzvariabilität nachts. + Total Power + LF + VLF	Herzfrequenzvariabilität tagsüber

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; U = unmittelbar, K = Kurzzeit, L = Langzeit; CW = continuous wave; ~ bezeichnet geschätzte Werte. Parameter der Herzfrequenzvariabilität: HF = hohe Frequenzen, LF = niedrige Frequenzen, VLF = sehr niedrige Frequenzen, RR-Intervalle: Abstand zwischen zwei Herzschlägen, SDNN = Standardabweichung aller RR-Intervalle, RMSSD = Quadratwurzel des quadratischen Mittelwertes der Summe aller Differenzen zwischen benachbarten RR-Intervallen, PNN50: Prozentsatz der RR-Intervalle mit mindestens 50 ms Abweichung vom vorausgehenden Intervall.

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

2.3 Wirkungen auf das Befinden

2.3.1 Elektrosensitivität (= Feldwahrnehmung)

Als elektrosensitiv werden Personen bezeichnet, die schwache elektromagnetische Felder bewusst wahrnehmen können. Bei Personen, die gesundheitliche Beschwerden auf elektromagnetische Strahlung zurückführen, wird dagegen der Begriff der elektromagnetischen Hypersensibilität verwendet. Wie in Bericht UM 162 beschrieben, sind dies zwei unabhängige Phänomene: Personen mit elektromagnetischer Hypersensibilität haben nicht unbedingt eine überdurchschnittliche Fähigkeit zur Feldwahrnehmung und umgekehrt (Mueller et al. 2002). In den früheren Provokationsstudien wurden einzelne oder mehrere Personen wiederholt Feldern ausgesetzt und untersucht, ob sie dieses An- und Abschalten überzufällig oft korrekt beurteilten. In den neueren Studien werden nun grössere Probandengruppen exponiert. Oft handelt es sich dabei um Personen, die sich als elektromagnetisch hypersensibel bezeichnen, und die durchschnittliche Wahrnehmungsfähigkeit wird für die ganze Gruppe untersucht. Mit solchen Studien kann statistisch besser abgestützt werden, ob hochfrequente Felder von (einem Teil) der Bevölkerung wahrgenommen werden können. Es wird jedoch nicht untersucht, ob diejenigen Probanden, die die Exposition – vielleicht zufällig – richtig eingeschätzt haben, dazu auch in mehreren Versuchen fähig wären.

Einführung

Seit der Publikation von UM 162 haben vier wissenschaftlich publizierte Provokationsstudien mit insgesamt 289 Probanden evaluiert, ob hochfrequente elektromagnetische Strahlung wahrgenommen werden kann. In zwei Studien zur Gehirnphysiologie wurde die Wahrnehmungsfähigkeit als Nebenbefund erhoben.

Resultate

Hietanen et al. 2002 untersuchten 20 Personen, die sich selbst als elektromagnetisch hypersensibel bezeichneten. Expositionsquellen waren ein analoges Mobiltelefon sowie zwei GSM-Mobiltelefone mit Frequenzen von 900 und 1800 MHz, die Expositionsdauer betrug 30 Minuten. Pro Tag erfolgten drei bis vier Expositionen, die Scheinexposition wurde jeweils als erste oder zweite durchgeführt. Die Personen konnten nicht unterscheiden, ob oder welcher Belastung sie ausgesetzt waren.

In der Doppelblindstudie von Tahvanainen et al. 2004 wurden 32 Probanden gegenüber einem Mobiltelefon an der Kopfseite der dominanten Körperhälfte exponiert. In zufälliger Reihenfolge wurden die Teilnehmer während jeweils 35 Minuten einem 900-MHz-Feld, einem 1800-MHz-Feld und zwei Scheinexpositionen ausgesetzt. Nach jeder Expositionsphase füllten die Teilnehmer einen Fragebogen zum Auftreten von unspezifischen Symptomen aus und gaben die vermutete Belastung an. Diese Angaben stimmten nicht überzufällig häufig mit der richtigen Belastung überein.

Auch in der doppelt verblindeten Studie zu Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf das EEG im Schlaf von Loughran et al. 2005 (vgl. Kapitel 2.2.2) wurden die 50 Teilnehmer am Ende des Versuchs nach der Feldwahrnehmung gefragt. Eine korrekte Einschätzung lag bei 27 Probanden vor, es zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang ($p=0.672$).

Rubin et al. 2006 wählten für ihre Provokationsstudie 60 Personen aus, die Kopfschmerzen bei Benutzung eines Mobiltelefons angaben, und 60 Personen ohne solche Beschwerden. Die Teilnehmer wurden doppelblind in zufälliger Reihenfolge entweder dem gepulsten Signal eines GSM-Telefons mit 900 MHz, einem kontinuierlichen Trägersignal von 900 MHz oder einer Scheinexposition ausgesetzt. Während der GSM-Exposition schätzten 60 % der Sensiblen und 58 % der Kontrollpersonen, dass es sich um ein reales Signal handelte, und während der Scheinexposition gingen 63 % der Sensiblen und 68 % der Kontrollen von einem wirklichen Signal aus.

Die Studie von Regel et al. 2006 war als vertiefte Replikation der so genannten TNO-Studie von Zwamborn et al. 2003 angelegt, in der sich ein schlechteres subjektives Befinden nach der Befeldung mit UMTS-basisstationsähnlichen Feldern von 1 V/m ergeben hatte. In der Wiederholungsstudie wurden 33 Personen mit selbstberichteter Hypersensibilität und 84 Personen ohne eine solche Überempfindlichkeit während 45 Minuten doppelblind in zufälliger Reihenfolge UMTS-basisstationsähnlichen Feldern von 1 V/m und 10 V/m ausgesetzt. In keiner Probandengruppe wurde die Feldstärke überzufällig häufig korrekt eingeschätzt.

Auch in der Doppelblindstudie von Wolf et al. 2006 zur Veränderung der Gehirndurchblutung unter Mobiltelefonexposition (vgl. Kapitel 2.2.2) gab es keine Korrelation zwischen der Einschätzung der Probanden und der tatsächlichen Expositionssituation.

Die neuen Provokationsstudien mit hochfrequenter Strahlung zeigen, dass auch Personen, die ihre Befindlichkeitssymptome elektromagnetischen Feldern zuschreiben, diese Felder in einer Testsituation im Allgemeinen nicht wahrnehmen können. Allerdings ist die Wahrnehmungsfähigkeit in einer Laborsituation nicht unbedingt vergleichbar mit der Situation zu Hause. Bekannte Örtlichkeiten und gewohnte Situationen erleichtern eventuell die Unterscheidung zwischen Situationen mit und ohne Exposition. Zumindest in Bezug auf Felder von Bildschirmen wurde diese Hypothese allerdings nicht bestätigt (Rubin et al. 2005, Flodin et al. 2000).

Bewertung

Zwei frühere Provokationsstudien mit Mehrfachtestung der Probanden liessen vermuten, dass es einzelne elektrosensitive Personen gibt (Übersicht in Rubin et al. 2005 und UM 162). Aufgrund dieser früheren Ergebnisse kann deshalb nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Personen hochfrequente Strahlung mit einer Feldstärke im Bereich der Anlagegrenzwerte wahrnehmen können. Dies ist aber die Ausnahme und trifft für die meisten sich selbst als elektrosensibel bezeichnenden Personen nicht zu. Neue Studien zu dieser Fragestellung liegen leider nicht vor, in diesem Bereich besteht erheblicher Forschungsbedarf.

2.3.2 Unspezifische Symptome, elektromagnetische Hypersensibilität

Die meisten Provokationsstudien, die untersucht haben, ob Personen hochfrequente Felder wahrnehmen können, enthielten auch Vergleiche zwischen der Häufigkeit von Symptomen unter Exposition und unter Scheinexposition. Das Auftreten von unspezi-

fischen Symptomen bei experimenteller Belastung mit Hochfrequenzstrahlung wurde seit dem Bericht UM162 in sieben Publikationen evaluiert.

In der Studie von Hietanen et al. 2002 an 20 Personen, die sich selbst als elektromagnetisch hypersensibel bezeichneten, berichteten 19 im Verlauf der Experimente über unspezifische Beschwerden. Expositionsquellen waren ein analoges Mobiltelefon sowie ein 900- und ein 1800-MHz-GSM-Telefon, die Expositionsdauer betrug 30 Minuten. Pro Tag erfolgten drei bis vier Expositionen, die Scheinexposition wurde jeweils als erste oder zweite durchgeführt. Bei allen Probanden traten während der Scheinexposition mehr Symptome auf als bei den realen Expositionen. Am häufigsten waren Schmerzen und Wärmegefühl im Kopf. Da die Reihenfolge von Schein- und echten Expositionen nicht zufällig war, könnten andere Faktoren wie Nervosität, ungewohnte Umgebung usw. zum häufigeren Auftreten von Symptomen während der Scheinexposition beigetragen haben.

Experimentelle Resultate

In der Doppelblindstudie von Tahvanainen et al. 2004 wurden 32 Probanden gegenüber einem Mobiltelefon an der Kopfseite der dominanten Körperhälfte exponiert. In zufälliger Reihenfolge wurden die Teilnehmer während jeweils 35 Minuten einem 900-MHz-Feld, einem 1800-MHz-Feld und zwei Scheinexpositionen ausgesetzt. Nach jeder Expositionsphase füllten die Teilnehmer einen Fragebogen zum Auftreten von unspezifischen Symptomen aus. Da in der Publikation die Resultate zu den Herz-/Kreislaufparametern im Vordergrund stehen, wird auf die unspezifischen Symptome nur kurz eingegangen. Insgesamt beobachteten die Autoren keine Unterschiede in der Symptommhäufigkeit zwischen realer Exposition und Scheinexposition.

Das Doppelblindexperiment von Curcio et al. 2005 zu Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf das spontane EEG im Wachzustand (vgl. Kapitel 2.2.2) beinhaltete auch einen Fragebogen zur Schläfrigkeit, den die Probanden direkt nach der Exposition respektive Scheinexposition ausfüllten. Die Auswertung ergab keine statistisch signifikanten Assoziationen zwischen dem Expositionsstatus und der Schläfrigkeit.

An der Provokationsstudie von Rubin et al. 2006 nahmen 60 Personen teil, die Kopfschmerzen bei Benutzung eines Mobiltelefons angaben, und 60 ohne solche Beschwerden. Die Teilnehmer wurden doppelblind in zufälliger Reihenfolge entweder dem gepulsten Signal eines GSM-Telefons mit 900 MHz, einem kontinuierlichen Trägersignal von 900 MHz oder einer Scheinexposition ausgesetzt. Das Auftreten von Kopfschmerzen und weiteren Symptomen wurde bereits während der Exposition nach 5, 10, 30 und 50 Minuten, aber auch 30 Minuten nach Beendigung der Exposition und einen Tag später erhoben. Die Beschwerden nahmen, unabhängig von der Belastung, im Verlauf des Experiments bei den Elektrosensiblen stärker zu als bei den übrigen Probanden. Aufgrund einer Graphik in der Publikation könnte man bei den Elektrosensiblen einen Unterschied zwischen der Belastung mit dem kontinuierlichen Trägersignal und der Scheinexposition annehmen. Dieses Ergebnis wird aber zahlenmässig nicht angegeben und auch nicht einzeln diskutiert. Die Autoren vermuten für die Symptomzunahme psychologische Faktoren.

Für eine Untersuchung der Herzfunktionen bei Hochfrequenzbelastung durch ein GSM-Telefon (900 MHz) rekrutierten Wilen et al. 2006a aus einer früheren Querschnittsstudie 20 Personen, welche bei Benutzung eines Mobiltelefons unspezifische Beschwerden angegeben hatten, und 20 Personen ohne solche Beschwerden. Zu den Beschwerden gehörten Schwindelgefühl, Unwohlsein, Konzentrations- und Sensibilitätsstörungen. Die Probanden wurden während 30 Minuten einem Feld ausgesetzt, das durch ein GSM-Telefon (900 MHz) erzeugt wurde, sowie an einem weiteren Tag einer Scheinexposition in zufälliger Reihenfolge. Nach der Testsituation beantworteten die Probanden einen Fragebogen zu ihren Symptomen. Von den 20 nicht empfindlichen Personen gab niemand während oder direkt nach den Tests Beschwerden an. Dagegen berichteten acht empfindliche Personen über Symptome während oder nach der GSM-Exposition, vier nach der Scheinexposition und sechs nach beiden Testsituationen. Dieser Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p=0.13$).

In der Studie von Zwamborn et al. 2003 (TNO-Studie) wurden ebenfalls Personen, die Beschwerden im Zusammenhang mit GSM-Strahlung angaben, sowie Personen ohne solche Beschwerden untersucht. Es gab vier Expositionsarten: GSM 900 MHz, GSM 1800 MHz, UMTS-ähnlich 2100 MHz und Scheinexposition. Die Exposition erfolgte als Ganzkörperbelastung unter Fernfeldbedingungen (Abstand zur Antenne: 3 m). Die Feldstärke betrug 1 V/m (Pulsspitze) bei den GSM-Signalen und 1 V/m Effektivwert beim UMTS-Signal. Die Teilnehmer absolvierten zwei Sitzungen mit realer Exposition (zwei von drei Frequenzen) und eine bei Scheinexposition. Nach jeder kognitiven Testung beantworteten sie einen Fragebogen zum Wohlbefinden (Ängstlichkeit, Unzulänglichkeit, körperliche Beschwerden, Depression und Abwehrgefühle). In beiden Gruppen zeigte sich insgesamt eine signifikante Assoziation zwischen der Exposition gegenüber UMTS-ähnlichen Feldern und der Häufigkeit von unspezifischen Symptomen. Bei Exposition gegenüber den beiden GSM-Signalen waren keine Unterschiede im Wohlbefinden zu beobachten.

Die Ergebnisse der Exposition mit UMTS-Feldern der TNO-Studie sollten in einer erweiterten Replikationsstudie durch Regel et al. 2006 überprüft werden. Dazu wurden 33 Personen mit selbstberichteter Hypersensibilität und 84 nicht empfindliche Personen während 45 Minuten doppelblind in zufälliger Reihenfolge UMTS-basisstationsähnlichen Feldern mit Feldstärken von 1 V/m und 10 V/m ausgesetzt. Vor und nach der Exposition füllten die Probanden mehrere Fragebögen zum Wohlbefinden aus: einen Kurzfragebogen zur aktuellen Beanspruchung (Müller und Basler 1993), den modifizierten Fragebogen zur Lebensqualität, der in der ersten UMTS-Studie verwendet worden war, und einen selbstentwickelten Fragebogen mit weiteren Faktoren, die sich aktuell auf die Lebensqualität auswirken könnten. Bei beiden Probandengruppen war das Befinden nach der geringeren und nach der stärkeren Belastung mit UMTS-Feldern nicht schlechter als nach der Scheinbelastung. Die elektrosensiblen Personen fühlten sich gemäss allen Fragebogen unabhängig von der Expositionssituation schlechter als die gesunden Probanden.

Tab. 10 > Übersicht über experimentelle Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf unspezifische Symptome.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Fritzer et al. 2000	Antenne (Art und Abstand nicht angegeben)	M	GSM 900		< 2		Befindlichkeit
Koivisto et al. 2001	Mobiltelefon	U	GSM 902	0.25 W	~0.6		Kopfschmerzen, Schwindel, Müdigkeit, prickelnde/juckende Haut, Hautrötungen, Wärmegefühl
Hietanen et al. 2002	Mobiltelefon	U	CW 900 analog GSM 900 GSM 1800	1 W 0.25 W 0.125 W	~2.3 ~0.6 ~0.3		u.a.: Kopfschmerzen, Wärmegefühl, Schwindel, Atemprobleme, Angst
Zwamborn et al. 2003	Antenne, Abstand: 3 m	U	GSM 900 GSM 1800 2100 UMTS-ähnlich	1 V/m Pulsspitze 1 V/m Pulsspitze 1 V/m Effektivwert	0.045 mW/kg 0.082 mW/kg 0.078 mW/kg	Gruppe A: + Schwindel/Schmerz + Nervosität + Atemprobleme + Taubheits- oder Kribbelgefühl + Schwächegefühl + Konzentrationsschwierigkeiten + Zerstreuung + Mangel an Aufmerksamkeit Gruppe B: + Geduld verlieren Gruppe A: elektromagnetisch Hypersensible, Gruppe B: beschwerdefreie Personen	keine Unterschiede im Wohlbefinden keine Unterschiede im Wohlbefinden
Tahvanainen et al. 2004	Mobiltelefon	U	GSM 900 GSM 1800	Pulsleistung: 2 W 1 W	1.58 0.70		unspezifische Symptome (nicht differenziert)
Curcio et al. 2005	Mobiltelefon	U	GSM 902.4	0.25 W	0.5		Schläfrigkeit
Rubin et al. 2006	Mobiltelefon	U/M	GSM 900 CW 900	k.A. k.A.	1.4 1.4		Kopfschmerzen, unspezifische Symptome
Wilen et al. 2006a	Mobiltelefon, Antenne in 8.5 cm Entfernung vom Kopf	U	GSM 900	k.A.	0.8		Wärmegefühl, Brennen, Müdigkeit, weitere unspezifische Symptome
Regel et al. 2006	Laborantenne, Abstand: 2 m	U	UMTS-basisstations-ähnlich, 2100	1 V/m 10 V/m	0.045 mW/kg 4.5 mW/kg		Befinden direkt nach der Exposition bei Sensiblen und Gesunden

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; U = unmittelbar, K = Kurzzeit, L = Langzeit; CW = continuous wave; ~ bezeichnet geschätzte Werte.

Es gibt viele Spontanberichte, wonach sich das allgemeine Befinden bei Exposition gegenüber elektromagnetischer Strahlung verschlechtert. Typischerweise in diesem Zusammenhang genannte Symptome sind Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel, Müdigkeit/Mattigkeit, Antriebslosigkeit, Kribbelgefühle, Hitzegefühl oder Brennen auf der Haut. Einige Studien haben das Befinden von Mobiltelefonbenutzern und Nichtbenutzern miteinander verglichen. Teilweise wurde auch zwischen verschiedenen Technologien der Mobiltelefonie oder verschieden häufiger Benutzung von Mobiltelefonen verglichen. Andere haben die Häufigkeit von Beschwerden mit der Belastung durch eine Mobilfunkbasisstation in Beziehung gesetzt. Nur zwei Studien haben diese Belastung zu messen versucht.

Die Studie von Wilen et al. 2003 basiert auf einer im Bericht UM 162 erwähnten Untersuchung der selben Gruppe (Ofstedal et al. 2000, Sandström et al. 2001). In dieser Querschnittsstudie an 17'000 Personen, die beruflich ein Mobiltelefon benutzten, traten bei Benutzern von analogen Mobiltelefonen (NMT-System) statistisch signifikant häufiger unspezifische Beschwerden auf als bei Benutzern von digitalen GSM-Mobiltelefonen. Zusätzlich zeigte sich ein Anstieg der Symptommhäufigkeit bei längerer Gesprächsdauer und grösserer Anzahl von Anrufen pro Tag. In der erweiterten Auswertung von 2003 kombinierten die Autoren die Angaben der Mobiltelefonbenutzer zu ihren Telefongewohnheiten mit SAR-Messungen der vier am häufigsten verwendeten Telefentypen und berechneten zwei neue Expositionsparameter: die spezifische Absorption pro Anruf bzw. pro Tag. Ausgewertet wurden Daten von 2197 Personen, die täglich während mehr als zwei Minuten mit einem Mobiltelefon telefonierten. Potenzielle Störgrößen wie sozioökonomische Faktoren und die Geschlechterverteilung in den Gruppen wurden nicht berücksichtigt. Die meisten Symptome waren bei Personen mit SAR₁-Werten über 0.5 W/kg häufiger als bei Teilnehmern mit niedrigeren SAR₁-Werten. Auch unter Einbezug der Gesprächsdauer zeigten sich bei höherer spezifischer Absorption deutlichere Unterschiede.

Eine vertiefte Auswertung ihrer Fragebogenerhebung mit 530 Personen zur Häufigkeit von unspezifischen Symptomen in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Wohnort und einer Mobilfunkbasisstation publizierten Santini et al. 2003. Die früheren Resultate wiesen auf eine signifikante Assoziation zwischen dem Auftreten unspezifischer Symptome und der Nähe von Mobilfunkbasisstationen hin. In der aktuellen Analyse zeigte sich, dass die Unterschiede in der Symptommhäufigkeit nur bei Personen ab 21 Jahren aufwärts bestanden, nicht aber in der Altersgruppe der unter 20-Jährigen. Bei den oberen Altersklassen waren die Unterschiede deutlicher. Die Autoren leiten daraus eine erhöhte EMF-Empfindlichkeit älterer Menschen ab und betonen die Bedeutung der Altersklassen bei der Untersuchung unspezifischer Symptome. Die im Bericht UM162 erwähnten grundlegenden methodischen Mängel dieser Studie wurden durch den Einbezug des Alters nicht behoben.

Navarro et al. 2003 werteten die Fragebögen zu unspezifischen Symptomen von 101 Personen aus, die in der Umgebung einer GSM-Basisstation wohnten. Zusätzlich führten sie Messungen des elektrischen Feldes in den Schlafzimmern der Teilnehmer und im Freien durch. Die Teilnehmer wurden in eine weniger und eine stärker exponierte Gruppe unterteilt (Entfernung zur Basisstation > 250 bzw. < 150 m). Die Perso-

nen mit höherer Exposition gaben 9 von 16 Symptomen statistisch signifikant häufiger an als die Teilnehmer in der geringer exponierten Gruppe. Es zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen dem Logarithmus der gemessenen elektrischen Feldstärke und dem Schweregrad mehrerer Symptome, insbesondere von Unwohlsein, Reizbarkeit und Appetitlosigkeit. Aus der Publikation geht nicht hervor, wie die Rekrutierung der Teilnehmer erfolgte. Falls die Fragebögen nicht nach dem Zufallsprinzip verschickt wurden, ist das Vorliegen eines Selektionsbias wahrscheinlich: Personen, die Beschwerden haben und diese in Zusammenhang mit der Basisstation bringen, beteiligen sich überproportional häufig an der Erhebung. Damit wäre die Repräsentativität der Ergebnisse fraglich. Zudem wurden Personen, die zwischen 150 und 250 m von der Basisstation entfernt wohnen, offensichtlich nicht berücksichtigt, und es finden sich keine Angaben zur Korrektur für eventuelle Störfaktoren.

In einer österreichischen Querschnittsstudie (Hutter et al. 2006) wurden je 36 Erwachsene im Umfeld von fünf GSM-Basisstationen in Wien und fünf GSM-Basisstationen in Kärnten zufällig ausgewählt, nach ihrem Wohlbefinden befragt und mit kognitiven Leistungstests untersucht (vgl. Kapitel 2.2.3). Als primäres Expositionsmaß wurde die von der nächstgelegenen Basisstation erzeugte maximal mögliche Leistungsflussdichte verwendet, welche aufgrund einer Messung im Schlafzimmer der Studienteilnehmer und Hochrechnung auf maximale Auslastung der Basisstation bestimmt wurde. Es wurden drei Kategorien gebildet: $<0.1 \text{ mW/m}^2$, $0.1 \text{ bis } 0.5 \text{ mW/m}^2$, $>0.5 \text{ mW/m}^2$. Ergänzend dazu wurde auch die gesamte Hochfrequenzexposition im Frequenzbereich zwischen 80 MHz und 2 GHz gemessen. Diese betrug zwischen 0.0002 und 1.4 mW/m^2 , wobei der Beitrag der Mobilfunkbasisstationen im Mittel 73 % ausmachte. Die statistische Auswertung der unspezifischen Symptome erfolgte mittels nichtkonditionaler logistischer Regression unter Einbezug der Wohngegend (ländlich vs. städtisch), von Alter, Geschlecht, regelmässiger Benutzung eines Mobiltelefons und subjektiver Einschätzung der Auswirkungen von Basisstationen auf die Gesundheit. Von 14 Symptomen traten drei in der obersten Expositions-kategorie häufiger auf als in der untersten ($<0.1 \text{ mW/m}^2$): Statistisch signifikante Unterschiede zeigten sich für Kopfschmerzen (RR: 3.06, 95 %-CI: 1.22–7.67), kalte Extremitäten (RR: 2.57, 95 %-CI: 1.16–5.67) und Konzentrationsschwierigkeiten (RR: 2.55, 95 %-CI: 1.07–6.08). Zwei von acht Subskalen zur Schlafqualität zeigten tendenziell eine schlechtere Schlafqualität in der obersten Expositions-kategorie. Eine Korrektur für multiple Testung wurde nicht vorgenommen.

Abdel-Rassoul et al. 2006 untersuchten im ägyptischen Bezirk Menoufiya zwischen März und Dezember 2003 37 Personen mit landwirtschaftlichen Berufen, welche in einem zwölfstöckigen Gebäude mit einer Mobilfunkbasisstation wohnten (oder arbeiteten?), und 48 Personen, welche als Angestellte oder Landbauingenieure im Gebäude der landwirtschaftlichen Verwaltung gegenüber arbeiteten (oder wohnten?). Diese beiden Gruppen wurden als Exponierte definiert. Als Kontrollpersonen wurden 80 Personen ausgesucht, welche in einem ungefähr 2 km entfernten Gebäude der Landwirtschaftsverwaltung arbeiteten und nicht in der Nähe einer Basisstation wohnten, mit etwa demselben Geschlechtsverhältnis, Alter, Bildungsniveau, Rauchgewohnheiten und Mobiltelefonbenutzung wie bei den Exponierten. Im Gebäude mit der Basisstation wurde drei Jahre vor der Studie an verschiedenen Stellen eine Leistungsflussdichte von

1 mW/m² gemessen. Die Studienteilnehmer beantworteten einen Fragebogen nach Kopfschmerzen, Gedächtnisproblemen, Zittern, Schwindel, depressiven Gefühle, Verschwommensehen, Schlafstörungen, Reizbarkeit und Konzentrationsschwierigkeiten. Mit dem Chi-Quadratstest ergaben sich signifikant häufiger Kopfschmerzen (Odds Ratio: 2.8, 95 %-CI: 1.06–7.4), Gedächtnisprobleme (OR: 7.5, 95 %-CI: 2.3–27), Schwindel (OR: 4.4, 95 %-CI: 1.3–16.5) und Schlafstörungen (OR: 2.8, 95 %-CI: 1.1–7.4) bei den als exponiert Definierten. Personen aus dem Gebäude gegenüber der Basisstation hatten häufiger Schlafstörungen als die Personen im Gebäude mit der Basisstation (Odds Ratio: 3.8, 95 %-CI: 1.01–15.09). Leider ist der Expositionsstatus der Teilnehmer unklar: Für das Haus gegenüber der Basisstation und das Kontrollgebäude liegen keine Messungen vor. Die Messwerte für das Gebäude mit der Antenne waren sehr niedrig und entsprachen nicht der Situation zur Zeit der Umfrage. Die Angaben, ob die Personen in den entsprechenden Häusern lebten oder arbeiteten, sind im Artikel widersprüchlich. Über die Dauer des Wohnsitzes oder der Anstellung ist nichts bekannt, ebenso wenig über die Vergleichbarkeit der beiden Gruppen Exponierter.

In einer Studie aus Saudiarabien (Al-Khlaiwi und Meo 2004) wurden 437 Freiwillige, meist Studierende der Riad Universität, nach Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schwindel, Anspannung und Schlafstörungen und der Dauer der täglichen Benutzung des Mobiltelefons sowie der Zeitspanne seit Beginn der Benutzung befragt. Zur Selektion des Kollektivs und dessen Repräsentativität gibt es in der Publikation keine Angaben. Als Ergebnis werden Rohdaten zur Symptommhäufigkeit präsentiert, ohne Korrekturen für Alter, Geschlecht und andere Einflussfaktoren. Daher können aus den Ergebnissen keinerlei Schlüsse gezogen werden. Von derselben Forschergruppe stammt der Bericht über eine Studie mit einem etwa doppelt so grossen Kollektiv, überwiegend Studenten, bei dem vermutlich derselbe Fragebogen zur Mobiltelefonbenutzung zur Anwendung kam (Meo et al. 2005). Dieses Mal wurden die Fragen nach Gehörminderung, Ohrschmerzen, Wärmegefühl am Ohr und Sehverminderung oder Verschwommensehen als Symptomkomplexe ausgewertet. Auch in dieser Publikation werden nicht korrigierte Symptommhäufigkeiten in Kategorien der täglichen Benutzungsdauer als Endergebnisse dargestellt. Die Autoren stellen im Text fest, dass die Unterschiede nicht signifikant sind, schliessen im Abstract aber auf eine kausale Beziehung. Die beiden Publikationen werden wegen ihrer schweren methodischen Mängel nicht in der Tabelle aufgeführt.

Auch die beiden Publikationen von Balik et al. 2005 und Balikci et al. 2005 über eine Studie, welche 695 Personen in Elazig, Türkei, nach sechs Augensymptomen und nach zehn Symptomen aus dem neuropsychologischen Bereich befragte, sowie nach der Besitzdauer eines Mobiltelefons, lassen wegen methodischer Schwächen keine Aussagen zu. Unter anderem fehlen Angaben zu Sozialstatus und Beruf, es wurden keinerlei Korrekturen für Alter und Geschlecht vorgenommen, und die Zahlenangaben in den Tabellen sind nicht nachvollziehbar bzw. fehlerhaft. Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen, es gebe statistische Hinweise auf einen Zusammenhang von Mobiltelefonbenutzung und verschwommenem Sehen, Kopfschmerzen, erhöhter Sorglosigkeit, stark erhöhter Reizbarkeit, Reflexabnahme, Klickgeräuschen in den Ohren und Vergesslichkeit. Wegen der gravierenden methodischen Mängel werden auch diese beiden Studien nicht in der Tabelle aufgelistet.

Tab. 11 > Übersicht über Bevölkerungsstudien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf unspezifische Symptome.

Studie	Expositionsquelle	Studientyp, Kollektiv	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	Bemerkungen
Hocking 1998	Mobiltelefon	Fallreihe 40 Personen	analog 830, GSM 900	bei Normalgebrauch	<~2	Brennende Haut dumpfer Schmerz Kopfschmerzen	
Chia et al. 2000b, Chia et al. 2000a	Mobiltelefon	Querschnitt 808 Personen	v.a. GSM	bei Normalgebrauch	<~2	Kopfschmerzen RR 1.31 (1.0–1.7)	
Hocking and Westerman 2000	Mobiltelefon	Fallbericht 1 Person	GSM	bei Normalgebrauch	<~2	Dysästhesie	
Ofedal et al. 2000 und Sandström et al. 2001	Mobiltelefon	Querschnitt 17'000 Personen mit beruflicher Mobiltelefon- benutzung	NMT 900 (analog) oder GSM 900	bei Normalgebrauch	<~2	Brennende Haut Wärmegefühl Kopfschmerzen Schwindel Unbehagen Müdigkeit Konzentrationsschwierigkeit Gedächtnisschwierigkeit Kribbeln	Symptome häufiger bei NMT als bei GSM- Telefonen
Hocking and Westerman 2001	Mobilfunk- basisstation	Fallbericht 1 Person	CDMA 878.49	0.15–0.6 W/m ² ~7.5–15 V/m	~0.01–0.05	Kopfschmerzen trüber Blick Sensitivitätstest	
Santini et al. 2001b	Mobiltelefon	Querschnitt 161 Studie- rende und Angestellte einer Ingeni- eurschule	GSM 900 GSM 1800	bei Normalgebrauch	<~2	Unterschied zwischen GSM 1800- und GSM 900- Benutzern: Konzentrations- schwierigkeiten	keine Unterschiede zwischen Mobiltele- fonbenutzern und Nichtbenutzern
Santini et al. 2001a, Santini et al. 2002	Mobilfunk- Basisstation	Umfrage 530 Personen	GSM 900 GSM 1800	Wohndistanz: 420 Personen < 300m, 110 Personen > 300m		Müdigkeit Reizbarkeit Kopfschmerzen Übelkeit Appetitlosigkeit Schlafstörungen Neigung zu Depressionen Unwohlsein Konzentrationsschwierigkeiten Gedächtnisverlust Hautprobleme Sehstörungen Hörstörungen Schwindel Störungen des Bewegungsapparates Herz-Kreislaufprobleme	Selbsteinschätzung der Exposition, keine Verblindung
Navarro et al. 2003	Mobilfunk- Basisstation	Cluster 47 Personen nah, 54 Personen weit entfernt	GSM 1800	Wohndistanz < 150 m; Gruppenmittel: 0.0011 W/m ² 0.64 V/m Referenzgruppe: Wohndistanz > 250m; Grup- penmittel: 0.0001 W/m ² 0.19 V/m	~7·10 ⁻⁵ ~6.4·10 ⁻⁶	Müdigkeit Reizbarkeit Kopfschmerzen Übelkeit Appetitlosigkeit Unwohlsein Störungen des Bewegungsapparates Schlafstörungen Neigung zu Depressionen Konzentrationsschwierigkeiten Schwindeln	Antwortrate nur 5 %, keine Verblindung, keine Angaben über Berechnung der Belastung.

Studie	Expositionsquelle	Studientyp, Kollektiv	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	Bemerkungen
Santini et al. 2003	Mobilfunk-Basisstation	Umfrage 530 Personen	GSM 900 GSM 1800	Wohndistanz: 420 Personen < 300m, 110 Personen > 300m		21- bis 40-Jährige: Kopfschmerzen Müdigkeit 41- bis 60-Jährige: Kopfschmerzen Müdigkeit Reizbarkeit Herz-Kreislaufprobleme > 60-Jährige: Kopfschmerzen Müdigkeit Reizbarkeit Schlafstörungen Unwohlsein Konzentrationsschwierigkeiten Schwindel	Gleiches Kollektiv wie Santini 2001, Selbsteinschätzung der Exposition, keine Verblindung
Wilen et al. 2003	Mobiltelefon	2197 Personen aus der Querschnittsstudie von Oftedal 2000, Sandström 2001	NMT 900 (analog) oder GSM 900	bei Normalgebrauch (im Beruf)	0.03–0.81 (SAR ₁)	Prävalenz bei SAR ₁ > 0.5W/kg erhöht: Brennende Haut Wärmegefühl Kopfschmerzen Schwindel Unbehagen Müdigkeit Konzentrationsschwierigkeit Gedächtnisschwierigkeit Kribbeln	Mögliche Confounder wie psychosoziale Arbeitsbelastung bzw. Stress, Beruf und Geschlecht nicht berücksichtigt
Hutter et al. 2006	Mobilfunk-Basisstation	L	GSM 900	< 0.1 0.1–0.5 > 0.5 mW/m ²	$\sim < 8.3 \cdot 10^{-6}$ $\sim 8.3-41 \cdot 10^{-6}$ $\sim > 41 \cdot 10^{-6}$	RR für > 0,5 mW/m ² versus < 0.1 mW/m ² : Kopfschmerzen: 3.06, 95 %-CI: 1.22–7.67 kalte Extremitäten: 2.57; 1.16–5.67 Konzentrationsschwierigkeiten: 2.55, 1.07–6.08	keine Korrektur für multiple Tests
Abdel-Rassoul et al. 2006	Mobilfunkantennen auf dem Dach bzw. auf dem Dach des Nachbargebäudes	Querschnitt 165 Personen	k.A.	?	?	Kopfschmerzen, Gedächtnisprobleme, Schwindel, depressive Gefühle, Schlafstörungen	Exposition?, Selektion und Vergleichbarkeit der Teilnehmergruppen?

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe Seite 49; ~ bezeichnet geschätzte Werte.

In einigen Studien wurde nur die Häufigkeit von unspezifischen Beschwerden erhoben, ohne sie einer ursächlichen Exposition zuzuordnen. Untersuchungsziele waren, das normale Vorkommen der Beschwerden in einer Bevölkerung abzuschätzen, die Symptommhäufigkeit bei hypersensiblen Personen oder die Häufigkeit der Problematik in Arztpraxen.

Die Studie von Rösli et al. 2004 galt nicht der Erforschung des Zusammenhangs zwischen Beschwerden und hochfrequenter Strahlung, sondern der Untersuchung, welche Beschwerden von Personen am häufigsten genannt werden, die sich selbst als EMF-empfindlich einschätzen. Diese Beschwerdebhäufigkeit wurde dann mit derjenigen einer repräsentativen Stichprobe der Schweizer Bevölkerung verglichen. 429 Personen, welche sich via Gesundheits- oder Umweltämter, Baubiologen oder Telefongesellschaften gemeldet hatten, füllten einen Fragebogen aus. 394 Teilnehmer gaben Beschwerden im Zusammenhang mit elektromagnetischer Strahlung an: 58 % der Betroffenen nannten Schlafstörungen, 41 % Kopfschmerzen, 19 % Nervosität oder Stress, 18 % Müdigkeit und 16 % Konzentrationsschwierigkeiten. 74 % der Personen führten ihre Beschwerden auf Basisstationen zurück, 36 % auf die Verwendung eines Mobiltelefons und 29 % auf die Verwendung von Schnurlostelefonen. Es zeigte sich kein für die Hochfrequenzexposition spezifisches Symptommuster.

Frick et al. 2006 evaluierten im Rahmen der Vorbereitung auf eine experimentelle Provokationsstudie die Häufigkeit von unspezifischen Beschwerden, die in der Literatur in Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern gebracht wurden. Die repräsentative Stichprobe der Bevölkerung von Regensburg bestand aus 758 Personen, die Antwortrate lag bei 40 %. In der Befragung am häufigsten genannt wurden Müdigkeit (68 %), Tagesmüdigkeit (64 %), Kopfschmerzen (56 %) und Konzentrationsprobleme (55 %).

Die Publikation von Schreier et al. 2006 enthält das Ergebnis einer repräsentativen Umfrage in der Schweizer Bevölkerung, in der neben der Prävalenz von Symptomen, die auf EMF zurückgeführt werden, auch die Einschätzung von EMF als Risiko untersucht wurde. Insgesamt 2048 Erwachsene (55 % der angesprochenen Haushalte) gaben telefonisch über Beschwerden Auskunft, die sie auf verschiedene Umweltfaktoren zurückführten, und über die Stärke dieser Beschwerden: 67 % der Interviewten schrieben mindestens ein Symptom einem Umweltfaktor zu, 2.7 % gaben an, dass sie zur Zeit Beschwerden hätten, welche sie auf elektromagnetische Strahlung zurückführten, und 2.2 % gaben an, sie hätten früher einmal Beschwerden wegen elektromagnetischer Strahlung gehabt. Diese knapp 5 % oder 107 Elektrosensiblen vermuteten zu 25 % Mobiltelefone als Ursache, zu 13 % Mobilfunkbasisstationen. Am häufigsten wurden wiederum Schlafstörungen (43 %), Kopfschmerzen (34 %) Konzentrationsschwierigkeiten (10 %) und Nervosität (9 %) genannt. Insgesamt 53 % aller Befragten meinten, dass elektromagnetische Felder ein mögliches gesundheitliches Risiko darstellen.

Ein etwas anderer Ansatz wurde in der Studie von Huss und Rösli 2005 gewählt. Hier wurde die Expositionssituation von Personen abgeklärt, die ihre Beschwerden auf die Belastung mit elektromagnetischen Feldern zurückführten, und die Plausibilität des Zusammenhangs im Rahmen einer interdisziplinären Beratungsstelle untersucht. Die Messungen erfassten niederfrequente und hochfrequente Felder. Als möglicherweise

Resultate aus Befragungen

relevante Belastung mit hochfrequenten Feldern galten Expositionen mit einer Mindeststärke von 0.6 V/m. Diese Belastung musste an einem Ort bestehen, an der sich die Betroffenen mehrere Stunden pro Tag aufhielten, und es musste ein zeitlicher und räumlicher Bezug zwischen Exposition und Beschwerden vorliegen. Die Betroffenen wurden allergologisch-internistisch und psychologisch untersucht. Von 63 Personen, die an allen Untersuchungen teilnahmen, führten 25 ihre Beschwerden auf EMF-Belastung zurück. Bei 14 von 85 Beschwerden bzw. bei 8 von 25 Personen wurde die Beziehung der Beschwerden zur EMF-Exposition als plausibel beurteilt. Die Hälfte dieser Beschwerden waren Schlafstörungen, Müdigkeit oder Erschöpfung. Die Resultate werden nicht für hoch- und niederfrequente Felder getrennt angegeben. Auch aus dieser Fallreihenstudie kann kein Kausalzusammenhang abgeleitet werden.

Leitgeb et al. 2005 untersuchten, wie oft österreichische Hausärzte mit dem Problem der elektromagnetischen Hypersensibilität konfrontiert werden, und ob sie einen Kausalzusammenhang mit der EMF-Belastung annehmen. Eine Zufallsauswahl von 400 registrierten österreichischen Hausärzten erhielt einen Fragebogen, der von 49% der Praxen beantwortet wurde. Insgesamt 68% der antwortenden Ärzte waren bereits von Patienten auf die Problematik angesprochen worden, 5% hatten sich intensiv damit beschäftigt, 95% hielten es in einem gewissen Ausmass für möglich, dass «Elektromog» Krankheiten verursachen kann. Davon nannten 80% als Ursache Hochspannungsleitungen, 76% Mobiltelefone, 72% Mobilfunkbasisstationen und 60% Schnurlostelefone.

In einer ähnlichen Befragung in der Schweiz konnten 342 von 1328 kontaktierten allgemeinmedizinischen Praxen (Antwortrate: 28%) nach der Häufigkeit von Patienten mit selbst berichteter elektromagnetischer Hypersensibilität befragt werden (Huss und Röösl 2006). Zusätzlich wurden Details des letzten Falles erhoben, unter anderem Symptome und vermutete Ursachen, Einschätzung der Kausalität durch die Ärztin oder den Arzt sowie ihre Ratschläge oder Therapieempfehlungen für die Patienten. Eine weitere Frage betraf die Notwendigkeit von interdisziplinären Beratungszentren. Insgesamt 69% der Praxen berichteten von mindestens einer Konsultation wegen elektromagnetischer Strahlung, der Median der EMF-Konsultationen im vergangenen Jahr lag bei drei Konsultationen. Als Beschwerden wurden am häufigsten Schlafstörungen, dann Kopfschmerzen und Müdigkeit genannt, als Ursachen Mobilfunkbasisstationen, Hochspannungsleitungen und die (eigene) Benutzung von Mobiltelefonen. In 54% der Fälle beurteilten die Ärztinnen und Ärzte den Zusammenhang als plausibel. Diese Beurteilung basierte auf einer Vorsichtshaltung angesichts der wissenschaftlichen Ungewissheit.

In Mainz wurde 2003 das Projekt «Mainzer EMF-Wachhund» gestartet, das in seiner ersten Phase die Erfassung elektromagnetisch hypersensibler Personen und ihrer Beschwerden zum Ziel hatte (Schüz et al. 2006a). Das Projekt wurde mit grossem Aufwand in den Medien publiziert. Interessierte konnten via Internet einen Fragebogen beantworten. Von Oktober 2003 bis März 2005 meldeten sich 192 Personen mit gesundheitlichen Beschwerden, von denen sich 107 als empfindlich auf elektromagnetische Strahlung bezeichneten. Diese Elektrosensiblen hatten stärkere Beschwerden als die übrigen und mehr Bedenken gegenüber allen Strahlungsquellen. In der nächsten

Projektphase sollen die registrierten Personen und eine Zufallsstichprobe aus der Bevölkerung klinisch und psychosomatisch untersucht werden.

Eine Studie zur Bestimmung der Hauptsymptome bei elektromagnetischer Hypersensibilität und ihrer Häufigkeit in der Allgemeinbevölkerung von Grossbritannien führten Eltiti et al. 2006 durch. Sie erstellten einen Fragebogen mit acht Symptomskalen: Neurovegetative Symptome, Haut, Gehör, Kopfschmerzen, Herz- und Atemwege, Erkältung, Bewegungsapparat und Allergien. Dieser Fragebogen wurde an 518 Personen aus Colchester getestet und dann an 20'000 zufällig ausgewählte Probanden verschickt. Vor dem Versand fügten die Autoren weitere Fragen zu Symptomen an, die von den ersten Testpersonen im Zusammenhang mit EMF genannt worden waren. In einer dritten Phase wurde die Validität und Zuverlässigkeit des Fragebogens an 88 Personen mit elektromagnetischer Hypersensibilität getestet. Diese Personen gaben in allen Symptomskalen stärkere Beschwerden an als nicht sensible Teilnehmer. Auf Grund dieser Resultate folgern die Autoren, dass mit diesem Instrument elektrosensible Personen für Forschungsvorhaben ausgewählt werden können.

Die bisherigen experimentellen Studien konnten nicht belegen, dass kurzfristige Belastungen mit hochfrequenter Strahlung, wie sie ein GSM-Mobiltelefon aussendet, zu mehr Beschwerden führen als eine Scheinbelastung, auch nicht bei sich selbst als elektromagnetisch sensibel einstufenden Personen. Die Ergebnisse der TNO-Studie mit verschlechtertem Befinden nach Exposition mit einer basisstationsähnlichen UMTS-Strahlung bestätigten sich in der Nachfolgestudie von Regel et al. 2006 nicht. Dabei wurde gleichzeitig eine zehnfach höhere Belastung getestet, um eine allfällige Dosis-Wirkungsbeziehung untersuchen zu können. Auch diese höhere Belastung erzeugte keine stärkere Symptomatik. Von zwei weiteren Studien mit ähnlichen Studienanlagen sind noch keine Ergebnisse bekannt. Bei keinem Experiment dauerte die Belastung länger als 50 Minuten, und die Probanden wurden spätestens am folgenden Tag nach Beschwerden befragt. Über länger andauernde Belastungen kann daher anhand dieser experimentellen Studien nichts ausgesagt werden.

Bewertung

In den neuen Auswertungen der Studie an Mobiltelefonbenutzern von Wilen und Kollegen wurde versucht, die Hochfrequenzexposition genauer zu quantifizieren (Wilen et al. 2003). Dabei beobachteten die Autoren eine Zunahme der Beschwerden in Abhängigkeit von der kumulierten Exposition. Wie schon in den früheren Auswertungen könnten andere Faktoren als die Hochfrequenzexposition zur Entstehung des beobachteten Zusammenhangs beitragen haben (Lebensstil, Stress usw.). Mögliche Confounder wie psychosoziale Belastungen, Beruf und Geschlecht wurden in der Analyse nicht berücksichtigt. Die saudiarabischen und türkischen Studien genügen wissenschaftlichen Ansprüchen nicht und erlauben daher keinerlei Schlussfolgerungen (Al-Khlaiwi 2004, Meo 2005, Balik 2005, Balikci 2005).

Das Hauptproblem in Bevölkerungsstudien im Umfeld von Mobilfunkbasisstationen ist die Bestimmung der Exposition. Zwei neuere Studien enthalten Expositionsmessungen bei den Teilnehmern (Navarro et al. 2003, Hutter et al. 2006). In der Arbeit von Navarro fehlen Angaben über die Auswahl der Probanden und deren Repräsentativität für die Gesamtbevölkerung sowie über den Einbezug von Störfaktoren in die Analyse. Daher

bleibt lediglich die österreichische Querschnittsuntersuchung zur Beurteilung eines eventuellen Zusammenhangs von unspezifischen Symptomen mit hochfrequenter Strahlung von GSM-Basisstationen. Bei Querschnittsstudien besteht grundsätzlich das Problem, dass die zeitliche Abfolge von Belastung und Beschwerden nicht eindeutig bestimmt werden kann. Ferner bleibt auch in dieser Publikation einiges unklar. Unter anderem fehlen Informationen zu Anzahl und Dauer der Messungen in den Wohnungen, und es wird nicht deutlich, ob nur die 14 in der Publikation aufgelisteten Symptome oder auch alle weiteren der verwendeten Zerssenskala abgefragt wurden. Da in der statistischen Analyse nicht für multiple Tests korrigiert wurde, ist bei zahlreichen Endpunkten mit einigen nur zufällig signifikanten Ergebnissen zu rechnen.

Zusammen mit den früheren skandinavischen Studien (vgl. UM 162) wird weiterhin als wahrscheinlich beurteilt, dass die Häufigkeit von unspezifischen Symptomen mit erhöhtem Mobiltelefongebrauch assoziiert ist. Ob diese Zunahme durch die hochfrequente Strahlung oder durch andere Begleitfaktoren des Mobiltelefonierens verursacht wird, kann nicht beurteilt werden.

Eine einzige wissenschaftlich genügende Studie zum Zusammenhang zwischen der Exposition durch Mobilfunkbasisstationen und unspezifischen Beschwerden (Hutter et al. 2006) lässt noch keine Bewertung zu.

2.3.3 Schlaf (Phasen und Qualität)

Eine Standardmethode zur objektiven Beurteilung des Schlafs und der Schlafregulation ist die Aufzeichnung der Hirnströme mittels Elektroenzephalogramm (EEG) im Schlaflabor. Anhand des EEGs lassen sich die verschiedenen Schlafphasen unterscheiden: Man differenziert zwischen vier orthodoxen Schlafstadien mit jeweils charakteristischen EEG-Mustern und dem paradoxen Schlaf, der durch schnelle Augenbewegungen gekennzeichnet ist (REM-Schlaf, Rapid Eye Movement). Während des REM-Schlafs dominieren im EEG unregelmässige, schnelle Hirnstromwellen mit relativ niedriger Amplitude. In dieser Schlafphase finden die Träume statt. Dauer und Latenzzeiten der orthodoxen und paradoxen Schlafphasen gelten als klassische Schlafparameter.

Einführung

Bei den Studien zur Untersuchung von Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf den Schlaf handelt es sich teilweise um Laborstudien mit experimenteller Exposition und Auswertung des EEGs, teilweise aber auch um Befragungen zum Auftreten von Schlafstörungen in der Umgebung von Rundfunksendern oder bei Mobiltelefonbenutzern. Zusätzlich zu den in Tabelle 12 aufgeführten Untersuchungen wurde auch in den Studien zum Auftreten von unspezifischen Beschwerden nach Schlafstörungen gefragt. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 2.3.2 diskutiert, da die Arbeiten nicht in erster Linie auf den Schlaf ausgerichtet waren.

Die Studie von Herr et al. 2005 beinhaltet eine Befragung von 130 Freiwilligen zu Mobiltelefonbenutzung und Schlafqualität. Nach Berücksichtigung von körperlichen Beschwerden sowie Arbeits- und Stressbelastung ergab sich kein Zusammenhang zwischen der Dauer der Mobiltelefonbenutzung und der Schlafqualität. Statistisch

Resultate

signifikante Beeinträchtigungen der Schlafqualität ergaben sich dagegen bei körperlichen Beschwerden sowie bei Arbeits- und Stressbelastung. Da die Teilnehmer aus dem Bekanntenkreis der Untersucher rekrutiert wurden, handelt es sich nicht um eine für die Gesamtbevölkerung repräsentative Stichprobe.

Hinrichs et al. 2005 untersuchten in einem Doppelblind-Experiment 13 Probanden, die fünf aufeinander folgende Nächte im Schlaflabor verbrachten. Nach einer Adaptationsnacht erfolgte in zwei zufällig ausgewählten Nächten die Exposition, in den beiden anderen Nächten die Scheinexposition. Exponiert wurde mit einem homogenen, vertikal polarisierten GSM-Feld mit Fernfeldcharakteristik. Die Antenne war 1,5 m vom Kopf der Probanden entfernt. Die elektrische Feldstärke lag bei 30 V/m (Leistungsflussdichte ca. 2.3 W/m²) und entsprach damit ungefähr der Hälfte des von der ICNIRP für die Allgemeinbevölkerung empfohlenen Immissionsgrenzwerts für die elektrische Feldstärke bei Ganzkörperexposition. Die EEG-Aufzeichnungen der jeweils zwei Nächte mit Exposition resp. Scheinexposition wurden gemittelt. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Exposition und Scheinexposition bezüglich Einschlafzeit, Wachphasen oder Verlauf der Schlafstadien.

Im Rahmen der doppelt verblindeten Crossover-Studie von Loughran et al. 2005 verbrachten 50 Probanden im Abstand von einer Woche zweimal zwei Nächte im Schlaflabor. Nach einer Adaptationsnacht folgte jeweils eine Nacht mit Mobiltelefonexposition bzw. Scheinexposition. Das Mobiltelefon befand sich an der rechten Kopfseite der Probanden, die Exposition dauerte 30 Minuten und endete ungefähr 20 Minuten, bevor die EEG-Aufzeichnung begann. Die Auswertungen zeigten nach Mobiltelefonexposition eine statistisch signifikante Abnahme der Latenzzeit bis zur ersten REM-Schlafphase. Für neun andere Schlafparameter ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

In der Publikation von Abelin et al. 2005 werden die Ergebnisse der epidemiologischen Studien zum Kurzwellen-Radiosender Schwarzenburg zusammengefasst. Vor dieser ersten Veröffentlichung in einer wissenschaftlichen Zeitschrift mit Peer-Review lagen die Resultate in Form einer Doktorarbeit der Universität Bern und eines Berichts an das Bundesamt für Energie vor (Altpeter et al. 1995). Wie in UM 162 berichtet, handelte es sich um zwei Querschnittserhebungen in der Umgebung des Radiosenders und einer Längsschnittuntersuchung, in der die Häufigkeit von Schlafstörungen vor und nach Abschalten des Senders analysiert wurde. In beiden Querschnittserhebungen zeigte sich ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Hochfrequenzexposition und der Häufigkeit von Ein- und Durchschlafstörungen in der umgebenden Bevölkerung. Bei vorübergehender Unterbrechung des Sendebetriebs für drei Tage verbesserte sich die in den Studientagebüchern angegebene Schlafqualität der Anwohner. Insgesamt weisen die Resultate deutlich auf einen Zusammenhang zwischen dem Betrieb des Kurzwellen-Radiosenders und der Häufigkeit von Schlafstörungen in der umgebenden Bevölkerung hin. Die Aussagekraft der Ergebnisse wird dadurch limitiert, dass die Teilnehmer möglicherweise wahrnehmen konnten, ob der Sender angeschaltet war oder nicht. Zudem könnte die öffentliche Diskussion um den Radiosender die Befragungsergebnisse beeinflusst haben. Daher lässt sich nicht klar unterscheiden, ob es sich um eine biologische oder eine psychologische Wirkung handelt.

Die Veröffentlichung von Altpeter et al. 2006 betrifft ebenfalls den Kurzwellensender Schwarzenburg und enthält die Ergebnisse der «Shut-down-Studie» zur Veränderung der Schlafqualität und des Melatoninstoffwechsels nach der endgültigen Einstellung des Sendebetriebs. Während des Sendebetriebs gaben Personen mit stärkerer Kurzwellenexposition eine schlechtere Schlafqualität an als weniger stark belastete Personen (mittlere Magnetfeldbelastung 2.6 resp. 0.4 mA/m). In der ersten Woche nach der endgültigen Abschaltung des Senders verbesserte sich die Schlafqualität bei Personen mit insgesamt schlechtem Schlaf statistisch signifikant. Für Personen ohne Schlafstörungen zeigte sich kein Unterschied.

In Österreich sollen in einer experimentellen Studie Personen untersucht werden, die ihre Schlafstörungen auf die Hochfrequenzstrahlung von Rund- und Mobilfunksendern zurückführen. Dabei besteht die experimentelle Intervention nicht aus einer Hochfrequenzexposition, sondern aus der Abschirmung der in den Schlafzimmern der Teilnehmer vorhandenen Immissionen. Die Beurteilung des Schlafs bei echter und bei Scheinabschirmung erfolgt mittels EEG- und EKG-Aufzeichnung sowie gemäss Einschätzung der Probanden. Bisher sind lediglich Ergebnisse der Machbarkeitsstudie publiziert worden (Leitgeb et al. 2004).

Aufgrund der vorliegenden Studien wird weiterhin als wahrscheinlich beurteilt, dass sich die Schlafstadien unter Hochfrequenzexposition verändern. Die aktuelle Untersuchung von Loughran et al. 2005 beobachtete allerdings im Gegensatz zu früheren Resultaten keine Verlängerung, sondern eine Verkürzung der Latenzzeit bis zur ersten REM-Schlafphase. Die subjektive Bewertung der Schlafqualität war wie schon in früheren Studien zur Mobiltelefonexposition nicht mit der Hochfrequenzbelastung assoziiert. Die Expositionseffekte werden also nicht unbedingt als negativ empfunden.

Bewertung

Es liegt weiterhin nur eine Studie vor, die gezielt Schlafstörungen in der Umgebung eines Hochfrequenzsenders untersucht hat. Darin wurde in mehreren Auswertungen ein Zusammenhang zwischen der Exposition durch den stark emittierenden Kurzwellen-Radiosender Schwarzenburg und der Häufigkeit von Schlafstörungen beobachtet (Abelin et al. 2005, Altpeter et al. 2006). Ausgehend von diesen Ergebnissen wird es, wie schon in UM 162, als möglich bewertet, dass die Emissionen solcher Kurzwellensender die Schlafqualität beeinträchtigen können.

Tab. 12 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf den Schlaf.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Mann and Röschke 1996	Mobiltelefon, Abstand: 40 cm	K	GSM 900	8 W Spitzenleistung 0.5 W/m ²	~0.04	- Einschlafzeit + Latenzzeit zur 1. REM-Phase - Dauer der REM-Phase + sich ruhiger fühlen	gesamte Schlafzeit Schlafeffizienz Anzahl Erwachen orthodoxe Schlafstadien subjektive Schlafqualität
Wagner et al. 1998, Mann et al. 1998	Mobiltelefon, Abstand: 40 cm	U/K	GSM 900	0.2 W/m ²	0.6		(-) Einschlafzeit (+) Latenzzeit zur 1. REM-Phase (-) Dauer der REM-Phase
Borbély et al. 1999	drei λ/2-Antennen, Abstand: 30 cm	U/K	GSM 900		1	- Wachzeiten während der Nacht	Einschlafdauer, Schlafphasen
Fritzer et al. 2000	Antenne (Art und Abstand nicht angegeben)	M	GSM 900		< 2		(-) Einschlafzeit, sonstige klassische Schlafparameter
Huber et al. 2000	planare Antenne, Abstand: 11 cm	U ²⁾	GSM-ähnlich, 900		1		(-) Einschlafzeit (+) Latenzzeit zur 1. REM-Phase (+) gesamte Schlafdauer (+) Dauer des REM-Schlafs subjektive Bewertung der Schlafqualität
Wagner et al. 2000	Mobiltelefon, Abstand: 40 cm		GSM 900	50 W/m ²	1.8		EEG-Amplitude in allen Bändern
Lebedeva et al. 2001	Mobiltelefon	U/K	GSM (Frequenz?)	bei Normalgebrauch ¹⁾	<~2		(+) Schlafphase II
Santini et al. 2001b	Mobiltelefon	U/L	GSM 900 GSM 1800	bei Normalgebrauch	<~2	Telefonierende Frauen hatten mehr Schlafprobleme als telefonierende Männer	keine Unterschiede zwischen Mobiltelefon-Benutzern und Nicht-Benutzern
Santini et al. 2001a, Santini et al. 2002	Mobilfunk-Basisstation	M/L	GSM 900 GSM 1800	Wohndistanz 0 bis 300 m		+ Schlafstörungen	
Huber et al. 2002	Kopf zwischen zwei planaren Antennen	U ²⁾	GSM-mobiltelefonähnlich, 900 unmodulierter Träger, 900		1		klassische Schlafparameter
Abelin et al. 2005, Altpeter et al. 1995	Kurzwellenradio-sender	L	3–30	1–50 mA/m ³⁾ (~0.4–20 V/m)		+ Einschlafstörungen + Durchschlafstörungen	
Herr et al. 2005	Mobiltelefon	L	GSM 900 GSM1800	bei Normalgebrauch	<~2		Schlafqualität
Hinrichs et al. 2005	Antenne, Abstand: 1.5 m	U	GSM 1800	2.3 W/m ²	0.072		klassische Schlafparameter
Loughran et al. 2005	Mobiltelefon	U ²⁾	GSM 894.6	0.25 W	0.29	- REM-Schlaf-Latenz	übrige Schlafstadien
Altpeter et al. 2006	Kurzwellenradio-sender	L	6.1–21.8	0.2–6.7 mA/m ⁴⁾		+ morgendliche Müdigkeit	

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; U = unmittelbar, K = Kurzzeit, M = mittel, L = Langzeit; CW = continuous wave; ~ bezeichnet geschätzte Werte

1) nicht näher spezifiziert

2) Exposition vor dem Schlaf

3) zeitlicher Höchstwert (einige Stunden pro Tag, während denen die Aufenthaltsorte in Senderichtung lagen)

4) 24-Stunden-Mittelwert

2.4 Kanzerogene Wirkungen

2.4.1 Genotoxizität

Als genotoxisch gilt ein Agens, wenn es direkt oder indirekt die Erbsubstanz einer Zelle schädigt. Experimente zur Genotoxizität werden vorwiegend an Zellkulturen durchgeführt, die im Labor dem zu untersuchenden Agens ausgesetzt werden («in vitro»). Im vorliegenden Kapitel werden nur Studien an Blutproben von Personen mit Hochfrequenzexposition diskutiert. Die Exposition fand also vor der Blutentnahme statt, die Blutzellen waren «in vivo» exponiert.

In Bericht UM 162 sind vier Arbeiten aufgeführt, welche die Lymphozyten von Personen mit beruflicher Hochfrequenzexposition auf Chromosomen- und DNS-Schäden untersuchten. Seither sind zwei neue Publikationen erschienen.

Die Arbeit von Gandhi 2005 enthält die vorläufigen Ergebnisse einer kleinen Studie aus Indien. Darin wurde mittels Gelelektrophorese und Comet-Assay die Häufigkeit von DNS-Schäden in Blutlymphozyten von Mobiltelefonbenutzern untersucht. Zusätzlich analysierten die Autoren die Häufigkeit von Mikrokernen als Indikator für Chromosomenschäden. Bei den 24 Mobiltelefonbenutzern zeigte sich ein signifikant höherer Prozentsatz von Lymphozyten mit DNS-Schäden sowie fünf mal mehr Zellen mit Mikrokernen als bei den zehn Kontrollpersonen, deren Mikrokernzahl auffallend niedrig war. Die zu den Mobiltelefonierenden ausgewählten Kontrollpersonen stimmten laut Angaben der Autoren in Alter und Geschlecht überein. Offensichtlich gehörten sie aber zu einer indischen Bevölkerungsgruppe, die besonders gesund lebt, und waren Nichtraucher und alkoholabstinent. Für die Mobiltelefonbenutzer traf dies nicht zu. Dieser Unterschied wurde in den Auswertungen nicht berücksichtigt. In die Analyse wurden auch keine weiteren Faktoren wie Schadstoffexpositionen oder andere Strahlenbelastungen einbezogen. Auch zur Durchführung der Studie stellen sich Fragen, zum Beispiel hinsichtlich Verblindung der Mitarbeiter, welche die Blutproben analysierten. Diese methodischen Vorbehalte lassen keinerlei Schlussfolgerungen zu.

Resultate

In der Studie von Maes et al. 2006 wurden Angestellte von zwei belgischen Mobilfunkbetreibern untersucht und mit einer Kontrollgruppe ohne berufliche Hochfrequenzexposition verglichen. Die exponierte Gruppe bestand aus 38 Aussendiensttechnikern, die für die Wartung und Reparatur von Mobilfunksendeanlagen (u.a. 450 und 900 MHz) zuständig waren, und aus 11 Verwaltungsangestellten, die in einem Gebäude arbeiteten, das von Hochfrequenz-Dipolantennen (147 bis 169 MHz) und Parabolantennen (6 bis 40 GHz) umgeben war. Als exponiert galten Personen, die ihre Exposition auf mehr als eine Stunde täglich seit mindestens einem Jahr einschätzten. Eine gleichzeitig in der Studienregion durchgeführte Messkampagne ergab, dass an manchen Stellen in unmittelbarer Nähe der Antennen Expositionen über den ICNIRP-Grenzwerten auftraten. Die Exponierten benutzten zusätzlich regelmässig Mobiltelefone, die Kontrollpersonen nicht. Die Auswertung der Lymphozytenresultate ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede in der Anzahl von Chromosomenanomalien bei Exponierten und Nichtexponierten. Durch Zugabe des chemischen Mutagens Mitomy-

cin C zu den Blutproben nahm die Häufigkeit des Schwesterchromatid-Austausches und der DNS-Schäden zu, es bestanden aber ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen Exponierten und Nichtexponierten. In der Studie wurde auf die Vergleichbarkeit der Studiengruppen geachtet, die Expositionsabschätzung erfolgte aber sehr grob.

Bereits die vier in UM 162 diskutierten Studien waren wegen der unklaren Vergleichbarkeit von Exponierten und Nichtexponierten kaum interpretierbar. Auf die neue Arbeit aus Indien trifft dies noch in verstärktem Mass zu, weil die Kontrollpersonen einer Bevölkerungsgruppe mit deutlich gesünderem Lebensstil entstammten als die Mobiltelefonbenutzer. In der belgischen Studie an beruflich Exponierten bestehen Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung.

Insgesamt ist die Datenlage immer noch zu gering, um zu beurteilen, ob hochfrequente Strahlung auf in vivo exponierte menschliche Zellen gentoxisch wirkt.

Bewertung

Tab. 13 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf in vivo exponierte Blutzellen.

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	signifikante Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Garson et al. 1991	im Beruf (TV-, Radio-, Satellitensender)	L	400 kHz–20 GHz	< 614 V/m (Grenzwert)			(+) Chromatidenlücken (+) Chromosomenlücken (+) Chromosomenbrüche Chromatidenbrüche andere Chromosomenveränderungen
Fucic et al. 1992	im Beruf	L	1250–1350 MHz, gepulst	0.1–200 W/m ²	~0.007–15	Grössenverteilung der Mikrokernkerne	
Maes et al. 1995	im Beruf (Mobilfunkantennen)	L	GSM 450, GSM 1800	k.A.	k.A.		(+) Chromatidenbrüche (-) Chromosomenlücken azentrische Fragmente
Lalic et al. 2001	im Beruf (Radio-relaisstation)	L	< 8 GHz	< 10 W/m ²	<<-0.8	+ azentrische Fragmente + dizentrische Fragmente	+Chromatidenbrüche
Gandhi 2005	Mobiltelefonbenutzer	L	GSM oder CDMA, 400–2000 MHz	bei Normalgebrauch	<<-2	+ DNS-Schäden (Comet-Assay) + Mikrokernhäufigkeit	
Maes et al. 2006	im Beruf (Mobilfunk- und andere Hochfrequenzantennen)	L	150 MHz–40 GHz	k.A.	k.A.		Chromosomenanomalien (9 Aberrationstypen) Chromatidaustausch DNS-Schäden (Comet-Assay)

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; U = unmittelbar, K = Kurzzeit, M = mittel, L = Langzeit, ~ bezeichnet geschätzte Werte.

2.4.2 Leukämien, maligne Lymphome

Seit dem Bericht UM 162 sind keine neuen Studien erschienen, welche das Risiko für Tumore der blutbildenden Organe in Zusammenhang mit der Hochfrequenzexposition im Militär, Beruf oder Hobby untersucht haben. Es gibt aber zwei neue Studien zur Häufigkeit von Leukämien im Umfeld von TV- oder Radiosendern. In zwei weiteren Arbeiten wurden Lymphompatienten und Kontrollpersonen zu ihrer Mobiltelefonbenutzung befragt.

Einführung

a) Exposition durch TV- und Radiosender

Resultate

Im Umfeld von drei TV- und Radiosendern in Australien hatten Hocking et al. 1996 bei Erwachsenen und Kindern erhöhte Leukämie-Erkrankungsraten festgestellt. In der Folgepublikation verglichen die Autoren jetzt die Überlebenszeit leukämiekranker Kinder aus dem inneren Ring um die drei Sendetürme herum (bis 4 km) und aus dem angrenzenden Gebiet (Hocking et al. 2003). Die Fünf-Jahres-Überlebensrate betrug in der Nähe der Sender 49 %, im Vergleichsgebiet 62 %. Die Zehn-Jahres-Überlebensrate lag im Sendergebiet bei 33 %, im Vergleichsgebiet bei 55 %. Daraus ergab sich in der für Alter, Geschlecht und Diagnosejahr korrigierten Analyse ein gerade noch signifikantes Sterblichkeitsratenverhältnis von 1.8 (95 %-CI: 1.0–3.0) zwischen Sender- und Kontrollgebiet. Die Autoren weisen auf die Möglichkeit einer krebsbegünstigenden Wirkung der TV-Senderstrahlung hin, da der Sterblichkeitsunterschied bei längerer Beobachtungsdauer zunahm.

Park et al. 2004 verglichen die alterskorrigierten Krebssterberaten in 10 südkoreanischen Gebieten im Umkreis von 2 km um AM-Radiosender mit mindestens 100 kW Leistung mit den Sterberaten in 40 angrenzenden Kontrollgebieten, deren Bewohner einen ähnlichen Sozialstatus aufwiesen. Die Krebssterblichkeit war in den Gebieten um die Sender insgesamt signifikant höher. Es zeigte sich aber kein Anstieg parallel zur ausgestrahlten Sendeleistung im Sinne einer Expositions-Wirkungsbeziehung. Der grösste Unterschied zwischen den Gebieten mit und ohne Radiosender wurde für die Diagnosegruppe «Leukämie oder multiples Myelom» beobachtet: Das Sterblichkeitsratenverhältnis betrug 1.7 (95 %-CI: 0.84–1.38). Besonders bei Kindern (0 bis 14 Jahre, 38 Fälle) und jungen Personen (15 bis 29 Jahre, 41 Fälle) waren die Leukämieraten rund um Radiosender mit Ratenverhältnissen von 2.29 (95 %-CI: 1.05–5.98) respektive 2.44 (95 %-CI: 1.07–5.24) statistisch signifikant höher als in den Kontrollgebieten. In dieser auf Registerdaten basierenden Studie gab es keine Angaben über individuelle Einflussfaktoren wie z. B. die Wohnsitzdauer am Ort oder eine berufliche Belastung.

b) Mobiltelefone

Hardell et al. 2005a konnten bei einer Fall-Kontrollstudie in Schweden und Dänemark über den Lebensstil von Patienten mit Non-Hodgkin-Lymphomen zusätzliche Fragen über berufliche Faktoren, Chemikalien und Benutzung von Mobil- und Schnurlostelefonen anfügen. Die Autoren berechneten das Risiko für B-Zell- und verschiedene T-Zell-Lymphome, differenziert nach Telefontypen und Gebrauchsdauer. Dazu wurden Daten von 910 Patienten und 1016 Kontrollpersonen aus der Bevölkerung des schwe-

dischen Teils der Studie verwendet. Das Risiko, an einem B-Zell-Lymphom zu erkranken, war nicht mit der Benutzung eines Mobil- oder Schnurlostelefon assoziiert. Für T-Zell-Lymphome zeigten sich ein signifikant erhöhtes Risiko bei Personen, die länger als fünf Jahre ein analoges oder digitales Schnurlostelefon benutzt hatten (OR=2.47, 95 %-CI: 1.09–5.60). In Bezug auf digitale Mobiltelefone ergaben sich bei über 5-jähriger Benutzung in Auswertungen zu bestimmten Subtypen des T-Zell-Lymphoms signifikante Resultate. Die Anzahl der Patienten mit T-Zell-Lymphomen (unterschiedlicher Ausprägung) war mit insgesamt 53 allerdings gering.

Ebenfalls aus einer multizentrischen Fall-Kontrollstudie über Non-Hodgkin-Lymphome stammten die Angaben zur Mobiltelefonbenutzung, die Linet et al. 2006 auswerteten (Surveillance Epidemiology and End Results, SEER). Gefragt wurde nach der Häufigkeit der Benutzung von Mobiltelefonen, Schnurlos- und Autotelefonen (bis zu 10 Mal, 10 bis 100 Mal oder über 100 Mal). Bei Vieltelefonierern wurde auch das Jahr der erst- und letztmaligen Benutzung und die Gesprächsdauer pro Woche erfragt. Verglichen wurde die Telefonbenutzung von 551 Lymphompatienten und 462 Kontrollpersonen aus der Bevölkerung. In den Kategorien der Benutzer, welche mehr als 100 Mal ein Mobiltelefon benutzt oder länger als 60 Minuten pro Woche oder insgesamt 209 Stunden telefoniert hatten, waren die Lymphomerkkrankungen nicht häufiger als bei Personen ohne Mobiltelefon. Bei Männern mit mehr als sechsjähriger Benutzungsdauer war das relative Risiko um 80 % erhöht, der Unterschied zur Kontrollgruppe war aber statistisch nicht signifikant. Die Anzahl der Personen mit langjähriger Benutzung war allerdings gering (bei den Frauen sehr gering). Aus solchen Untergruppenanalysen dürfen bei ansonsten fehlenden Expositions-Wirkungsbeziehungen keine Schlüsse abgeleitet werden.

Auf Grund der bis 2002 publizierten Studien wurde als möglich bewertet, dass das Risiko für Tumore des blutbildenden und lymphatischen Systems in der Umgebung von stark sendenden Rundfunksendern erhöht ist. Die aktuelle Auswertung von Hocking et al. 2003 evaluiert nicht das Leukämierisiko selbst, sondern die Überlebenszeit leukämiekranker Kinder in verschiedenen Expositionszonen um Rundfunksender herum. Sie betrifft mögliche Wirkungsmechanismen der Hochfrequenzexposition, kann aber nicht als neuer Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankungsrisiko gewertet werden.

Bewertung

Die Studie von Park et al. 2004 beobachtete erhöhte Leukämierisiken bei Kindern und jüngeren Erwachsenen in der Nähe von Radiosendern, liefert aber keine Angaben zur Feldstärke im als exponiert definierten Gebiet und konnte keine individuellen Faktoren einbeziehen. Die Risikoschätzer für die gesamte Krebssterblichkeit waren nicht mit der Sendeleistung der Radiosender (in kW) assoziiert. Bezüglich des Leukämierisikos liess sich diese Analyse nicht durchführen, weil die Anzahl der Leukämiepatienten zu gering war. Neben der Problematik der rein geografischen Expositionsabschätzung ist insbesondere unklar, wie lange die Leukämiepatienten bereits in dem jeweiligen Gebiet wohnten. Das Resultat deutet aber darauf hin, dass die Leukämie- und Lymphomraten um stark sendende Rundfunksender erhöht sind. Die beobachteten Zusammenhänge sollten zum Beispiel in Fall-Kontrollstudien weiter abgeklärt werden.

Wegen der rudimentären Expositionsabschätzung und der Nichtberücksichtigung möglicher Störgrößen in allen bisherigen Studien bleibt ein Interpretationsspielraum für die Analyse offen, und der Zusammenhang kann nach wissenschaftlichen Kriterien nicht als nachgewiesen gelten. Entsprechend werden in verschiedenen wissenschaftlichen Übersichtsartikeln unterschiedliche Meinungen vertreten (z.B. Kheifets et al. 2005, Ahlbom et al. 2004).

Bezüglich Mobiltelefonbenutzung beobachteten die beiden Registerstudien und die beiden Fall-Kontrollstudien keinen Zusammenhang mit Leukämien oder den häufigsten Lymphom-Typen. Die Anzahl der langjährigen Mobiltelefonbenutzer war in diesen Studien allerdings immer noch klein.

Insgesamt wird daher weiterhin als möglich erachtet, dass in der Umgebung von starken Rundfunksendern bei Expositionen in der Grössenordnung des schweizerischen Anlagengrenzwertes 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.

Tab. 14 > Übersicht über Studien zu Tumoren des blutbildenden und lymphatischen Systems.

Studie	Expositionsquelle (Signal, 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
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 (150–3500 MHz)	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)			
Dreyer et al. 1999a	Mobiltelefon (v.a. analog)	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	

Studie	Expositionsquelle (Signal, 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
Morgan et al. 2000	im Beruf (Herstellung von Radio- und Mobilfunkgeräten, 30–800 MHz)	> 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 (Rundfunktechniker)	-	-	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 (Radiotechniker)	-	-	Fall-Kontroll (517)	OR								3.1 (1.4–66)	
Johansen et al. 2001	Mobiltelefon (NMT 450/900 oder GSM)	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.
Hocking et al. 2003	3 TV-/Radiosender (63–533 MHz)	0.002–0.08 vs. < 0.002 W/m ²	$\sim 2 \cdot 10^{-4}$ – $9 \cdot 10^{-3}$	Cluster (160 Diagnosen, 74 Todesfälle)	MRR		1.8 (1.0–3.0)		2.1 (1.1–4.0)					

Studie	Expositionsquelle (Signal, 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
Park et al 2004	10 Radiosender (AM, Frequenz?)	mind. 100 kW Sendeleistung < 2 km vs. > 2 km		Cluster (224) 38 Kinder 41 junge Erwachsene	SMR		1.70 (0.84–3.45)							
Hardell et al. 2005a	Mobiltelefon (GSM, NMT)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (910 insgesamt; 819 B-Zell-Lymphome, 53 T-Zell-Lymphome)	OR		2.29 (1.05–5.98)						B-Zell-Lymphom: analog: 0.81 digital: 1.02 schnurlos: 1.01 alle n.s.	T-Zell-Lymphom: analog: 1.56, digital: 1.41, schnurlos: 1.36 alle n.s. Signifikant erhöhte ORs ergaben sich für T-Zell-Lymphome bei > 5-jähriger Benutzung von analogen oder digitalen Schnurlostelefonen.
Linnet et al. 2006	Mobiltelefon (generell)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (551)	OR								regelmäßige Benutzer: 0.9 (0.6–1.4)	Männer mit > 6-jähriger Benutzungsdauer: OR: 1.8, nicht signifikant

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; 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 Radiooperateure 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

2.4.3 Tumore des Zentralnervensystems

In den letzten fünf Jahren sind viele neue Publikationen zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Hochfrequenzexposition und Hirntumorrisiko erschienen. Die meisten sind Fall-Kontrollstudien, in denen die Mobiltelefonbenutzung von Hirntumorpatienten und Gesunden verglichen wurde. Viele dieser Untersuchungen sind Teilstudien von «Interphone», einer internationalen multizentrischen Fall-Kontrollstudie mit dem Ziel, die Daten einer möglichst grossen Anzahl von Hirntumorpatienten auszuwerten. Ausser dem Einfluss der Mobiltelefonbenutzung wurde in einzelnen Ländern auch die Entwicklung der Hirntumor-Erkrankungsraten in den letzten Jahrzehnten untersucht. Die berufliche Belastung wurde nur in der deutschen Interphone-Teilstudie evaluiert. Zum Hirntumorrisiko in der Umgebung von TV- oder Radiosendern gab es keine neuen Veröffentlichungen.

Einführung

a) Entwicklung der Erkrankungsraten

Resultate

In einer Registerstudie untersuchten Lönn et al. 2004a die Inzidenz gut- und bösartiger Hirntumore bei Erwachsenen in Dänemark, Finnland, Norwegen und Schweden zwischen 1969 und 1998. Die Inzidenz aller Hirntumore zusammen stieg pro Jahr um 0.6 bis 0.9%. Die Analyse der verschiedenen Zeitabschnitte ergab, dass diese Zunahme zwischen 1977 und 1983 stattfand, gleichzeitig mit der Verbesserung der Diagnostik durch Einführung der Computertomographie. In der Zeit nach 1983 und seit der Verbreitung des Mobilfunks Anfang der 1990er-Jahre war kein Anstieg des Hirntumorrisikos zu beobachten.

Eine weitere ökologische Studie zeigte keinen Anstieg der Inzidenz neuronaler Hirntumoren nach Einführung der Mobilfunktechnik 1985 bis zum Jahr 2002 in den USA (Muscat et al. 2006). Neuronale Tumore sind charakterisiert durch eine unkontrollierte Neubildung von Ganglionzellen und machen ungefähr 1% der Hirntumore im Erwachsenenalter aus.

Da diese beiden Studien keinen direkten Expositionsbezug herstellen, werden sie nicht in Tabelle 15 aufgeführt.

b) Resultate der Interphone-Teilstudien

Als erstes Resultat der internationalen, multizentrisch angelegten Fall-Kontrollstudie Interphone über Hirn-, Kopf- und Halstumoren bei Mobiltelefonbenutzern wurden Daten aus Dänemark zum Akustikusneurinom publiziert (Christensen et al. 2004). Im Studienzeitraum von zwei Jahren wurden 106 Patienten mit gesicherter Erstdiagnose eines Akustikusneurinoms mit 212 dazu gepaarten Kontrollpersonen aus der dänischen Bevölkerung hinsichtlich Verwendungsdauer eines Mobiltelefons (Typ, Jahre, Anzahl Anrufe, Gesamtdauer der Telefonate) und Lateralität des Tumors verglichen. 18% aller Fälle und 24% aller Kontrollen benutzten regelmässig ein Mobiltelefon seit mehr als fünf Jahren. Die regelmässige Benutzung eines Mobiltelefons zeigte keine Beziehung zum Auftreten von Akustikusneurinomen (Odds Ratio 0.90, 95%-CI: 0.51–1.57), auch die Dauer oder Anzahl der Telefonate war nicht mit einem höheren Risiko verbunden.

Die durchschnittliche Tumorgrösse betrug bei regelmässigen Mobiltelefonbenutzern 1.66 cm³ und 1.39 cm³ bei den Nichtbenutzern ($p=0.03$). Die Tumoren traten nicht häufiger auf der Seite auf, an die das Telefon bevorzugt gehalten wurde. Regelmässige Benutzer eines analogen Mobiltelefons hatten eine signifikant erniedrigte Odds Ratio (0.26, 95 %-CI: 0.08–0.83). Dieses Ergebnis basiert auf nur 11 % aller Teilnehmenden bzw. vier Fällen und 30 Kontrollen. In der Studie wurde sowohl nach Rechts- oder Linkshändigkeit gefragt als auch danach, an welcher Kopfseite das Telefon bevorzugt gehalten wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass Händigkeit und Seite des Telefonierens nur in 42 % der Fälle und 59 % der Kontrollen übereinstimmten. Daher sind Studien, welche die Lateralität von Hirntumoren auf die Angabe der Händigkeit beziehen, mit einem Fragezeichen zu versehen.

Die zweite Interphone-Publikation enthielt die Ergebnisse der schwedischen Teilstudie zum Akustikusneurinom (Lönn et al. 2004b). Im Gesamtkollektiv war bei einer Odds Ratio von 1.0 (95 %-CI: 0.6–1.5) kein erhöhtes Erkrankungsrisiko für Mobiltelefonbenutzer zu beobachten. Bei Personen, die seit mindestens zehn Jahren ein Mobiltelefon verwendeten, zeigte sich ein statistisch nicht signifikant erhöhtes Risiko (OR = 1.9, 95 %-CI: 0.9–4.1, 14 Fälle, 29 Kontrollpersonen). Wenn nur die Patienten betrachtet wurden, bei denen der Tumor auf der zum Telefonieren bevorzugten Kopfseite aufgetreten war, ergab sich bei über zehnjähriger Mobiltelefonbenutzung ein signifikant erhöhtes Akustikusneurinom-Risiko von 3.9 (95 %-CI: 1.6–9.5).

Die Auswertung der dänischen Interphone-Daten zeigte weder in Bezug auf Gliome noch auf Meningeome ein erhöhtes Erkrankungsrisiko bei Mobiltelefonbenutzern (Christensen et al. 2005). Auch für Personen mit über zehnjähriger oder intensiver Mobiltelefonbenutzung ergaben sich – bei Fallzahlen unter zehn – keine statistisch signifikant erhöhten Tumorrisiken.

Auch die schwedischen Daten der Interphone-Studie zeigten keinen Anstieg des Gliom- oder Meningeomrisikos beim Gebrauch von analogen oder digitalen Mobiltelefonen (Lönn et al. 2005). Das galt auch bei über zehnjähriger Benutzung und für die zum Telefonieren bevorzugten Kopfseite. In Bezug auf bestimmte Tumorsubtypen oder -lokalisationen wurden ebenfalls keine erhöhten Odds Ratios beobachtet. Für die Verwendung von DECT-Schnurlostelefonen ergaben sich keine erhöhten Tumorrisiken (vgl. Tab. 15).

In einer gepoolten Analyse zum Akustikusneurinom kombinierten Schoemaker et al. 2005 die Daten von sechs Fall-Kontrollstudien, die im Rahmen der Interphone-Studie in vier skandinavischen Ländern und zwei verschiedenen Regionen Grossbritanniens durchgeführt worden waren. Insgesamt ergab sich kein erhöhtes Akustikusneurinom-Risiko in der Gruppe der Benutzer von analogen oder digitalen Mobiltelefonen (OR = 0.9, 95 %-CI: 0.7–1.1), auch nicht bei Langzeitbenutzung. Wenn nur Personen mit ipsilateralem und über zehnjährigem Mobiltelefongebrauch untersucht wurden, resultierte ein statistisch signifikant erhöhtes Erkrankungsrisiko von 1.8 (95 %-CI: 1.1–3.1, 23 Fälle und 72 Kontrollpersonen). Bei separater Auswertung in Bezug auf den Gebrauch von analogen oder digitalen Mobiltelefonen ergab sich keine erhöhten Tumorrisiken.

Die Auswertung der Interphone-Daten aus Grossbritannien von Hepworth et al. 2006 zum Gliomrisiko ergab keine Erhöhung bei Benutzern von analogen oder digitalen Mobiltelefonen insgesamt (OR=0.94, 95 %-CI: 0.78–1.13) oder bei Personen mit über zehnjähriger Mobiltelefonbenutzung (OR=0.90, 95 %-CI: 0.63–1.28). In der separaten Auswertung zum Gebrauch von analogen Mobiltelefonen zeigten sich ebenfalls keine erhöhten Gliomrisiken. Auf der zum Telefonieren bevorzugten Kopfseite bestand ein statistisch signifikant erhöhtes Tumorrisiko: die Odds Ratio lag bei 1.24 (95 %-CI: 1.02–1.52). Für Personen mit kontralateraler Mobiltelefonbenutzung ergab sich ein reduziertes Gliomrisiko von 0.75 (95 %-CI: 0.61–0.93). Gegenläufige Ergebnisse für die beiden Hirnseiten weisen auf eine Verzerrung durch selektive Wahrnehmung von Betroffenen hin (Recall Bias), weil nicht davon auszugehen ist, dass die Mobiltelefonbenutzung einen schützenden Effekt bezüglich Tumoren auf der gegenüberliegenden Hirnhälfte hat.

In der deutschen Interphone-Teilstudie zeigte sich insgesamt keine Assoziation zwischen Hirntumorrisiko und Benutzung von analogen oder digitalen Mobiltelefonen (Schüz et al. 2006b). Für Meningeome lag die Odds Ratio bei 0.84 (95 %-CI: 0.62–1.13), für Gliome bei 0.98 (95 %-CI: 0.74–1.29). Personen, die seit mindestens zehn Jahren ein Mobiltelefon verwendeten, hatten ein relatives Meningeomrisiko von 1.09 (95 %-CI: 0.35–3.37) und ein statistisch nicht signifikant erhöhtes Gliomrisiko von 2.20 (95 %-CI: 0.94–5.11). Ein geschlechtsspezifischer Unterschied zeigte sich nur in Bezug auf hochgradige Gliome. In dieser Auswertung ergab sich für Frauen, die regelmässig ein Mobiltelefon benutzten, eine signifikant erhöhte Odds Ratio von 1.96 (95 %-CI: 1.10–3.50). Hinsichtlich der Benutzung von Schnurlostelefonen zeigte sich kein Zusammenhang mit dem Tumorrisiko.

Anhand der deutschen Interphone-Daten wurde auch das Hirntumorrisiko bei Personen untersucht, die ein Schnurlostelefon des DECT-Standards (Digitally Enhanced Cordless Telecommunications) benutzten und dessen Basisstation in der Nähe des Bettes aufgestellt hatten (Schüz et al. 2006c). Das traf für fünf Gliom- und fünf Meningeompatienten zu. Die Auswertung dieser kleinen Teilnehmergruppe ergab keinen Zusammenhang zwischen Tumorrisiko und Exposition.

Eine Auswertung der Interphone-Daten aus Deutschland von Berg et al. 2006 betraf Personen, die beruflich gegenüber Hochfrequenzfeldern von Rundfunksendern, Radar-, Funkgeräten oder anderen Mikrowellenanwendungen exponiert waren. Insgesamt wurden 191 Personen als exponiert eingestuft, davon 87 als stark exponiert. Als stark exponiert galten Personen, deren Hochfrequenzexposition am Arbeitsplatz kontinuierlich vorhanden war und zeitweise den ICNIRP-Grenzwert von 0.08 W/kg für die Allgemeinbevölkerung überschritt. In dieser Gruppe befanden sich 22 Gliompatienten und 11 Meningeompatienten. Ihr Risiko, an einem Gliom oder einem Meningeom zu erkranken, war im Vergleich zu Nichtexponierten statistisch nicht signifikant erhöht (OR = 1.22, 95 %-CI: 0.69–2.15 resp. 1.34, 95 %-CI: 0.61–2.96). Bei über zehnjähriger, starker Exposition zeigte sich eine tendenzielle Risikozunahme (13 Gliom- und 6 Meningeompatienten; OR = 1.39, 95 %-CI: 0.67–2.88 resp. 1.55, 95 %-CI: 0.52–4.62).

Aus Japan liegen die Auswertungen zum Akustikusneurinom vor (Takebayashi et al. 2006). Sie zeigten keinen Anstieg des Erkrankungsrisikos bei Benutzern von analogen Mobiltelefonen oder digitalen PDC-Mobiltelefonen (OR=0.73, 95 %-CI: 0.43–1.23). Für Personen mit über achtjähriger Mobiltelefonbenutzung (4 Fälle, 12 Kontrollen) betrug die Odds Ratio 0.79 (95 %-CI: 0.24–2.65). Es ergab sich kein erhöhtes Akustikusneurinom-Risiko an dem Ohr, das bevorzugt zum Telefonieren benutzt wurde (OR: 0.90, 95 %-CI: 0.50–1.62).

c) Studien an schwedischen Hirntumorpatienten

In der bisher grössten Fall-Kontrollstudie an Hirntumorpatienten (siehe UM 162) hatten Hardell et al. ein erhöhtes Risiko für Benutzer von analogen Mobiltelefonen beobachtet (OR: 1.3, 95 %-CI: 1.02–1.6). Am deutlichsten war die Risikoerhöhung in dieser Gruppe in Hinsicht auf Akustikusneurinome (OR: 3.5, 95 %-CI: 1.8–6.8). Bei über zehnjähriger Benutzung eines analogen Mobiltelefons betrug die Odds Ratio für Hirntumore insgesamt 1.8 (95 %-CI: 1.1–2.9). Im Zusammenhang mit digitalen Mobiltelefonen und Schnurlostelefonen zeigten sich keine erhöhten Risiken. In der Folge publizierten Hardell et al. 2003 Resultate zur genaueren Lokalisation (z. B. Schläfenlappen) und zur Histologie der Tumore. Dazu konnten Daten von 1358 Patienten benutzt werden, bei denen zwischen 1997 und 2000 ein Hirntumor diagnostiziert worden war. Bei Benutzern von digitalen Mobiltelefonen und Schnurlostelefonen zeigte sich insgesamt keine Risikoerhöhung. Ipsilaterale Tumore traten aber bei Benutzern aller drei Telefontypen häufiger auf als bei Nichtbenutzern. Bei den Benutzern von analogen Mobiltelefonen ergab sich eine Häufung von Tumoren im Schläfenlappen, und zwar sowohl auf der Seite, auf der das Telefon nach Angabe des Teilnehmers bevorzugt gehalten wurde, als auch auf der Gegenseite (OR 2.1, 95 %-CI: 1.3–3.3). Bei über zehnjähriger Benutzung lag die Odds Ratio bei 3.1 (95 %-CI: 1.2–7.7, 19 Patienten, 7 Kontrollpersonen). Die histologische Analyse ergab, dass Astrozytome ipsilateral bei Benutzung aller drei Telefontypen gehäuft vorkamen. Eine weitere Auswertung derselben Patienten und Kontrollpersonen betraf die regionalen Unterschiede im Risiko von gut- und bösartigen Hirntumoren bei Mobiltelefonbenutzern (Hardell et al. 2005b). Die Risikoschätzer für Personen aus ländlichen Regionen lagen höher als für Stadtbewohner. Die grössten Unterschiede zeigten sich bei Benutzern von digitalen Mobiltelefonen: Für die ländliche Bevölkerung ergab sich bei über fünfjähriger Benutzung eines digitalen Mobiltelefons ein statistisch signifikant erhöhtes Tumorrisiko (OR=3.2, 95 %-CI: 1.2–8.4; 17 Fälle, 6 Kontrollpersonen).

Für eine neue Fall-Kontrollstudie rekrutierten Hardell und Kollegen Hirntumorpatienten, deren Diagnose zwischen Juli 2000 und Dezember 2003 gestellt worden war (Hardell et al. 2005c). Das Meningeomrisiko lag für Personen, die ein analoges Mobiltelefon verwendeten, bei 1.7 (95 %-CI: 0.97–3.0), für Benutzer von digitalen Mobiltelefonen oder Schnurlostelefonen betrug es jeweils 1.3 (95 %-CI: 0.9–1.9). Das Akustikusneurinom-Risiko lag für Benutzer von analogen Mobiltelefonen bei 4.2 (95 %-CI: 1.8–10), für Benutzer von digitalen Mobiltelefonen und Schnurlostelefonen bei 2.0 (95 %-CI: 1.05–3.8) resp. 1.5 (95 %-CI: 0.8–2.9). In der «multivariaten Analyse», also nach Korrektur für Verwendung anderer Telefontypen, war nur bei Benutzern von

analogen Mobiltelefonen das Akustikusneurinom-Risiko signifikant erhöht (OR = 2.1, 95 %-CI: 1.1–3.8).

Die Auswertung der selben Studie zum Risiko bösartiger Hirntumore ergab statistisch signifikant erhöhte Risiken für Mobiltelefonbenutzer: Für Verwender von analogen Mobiltelefonen lag die Odds Ratio bei 2.6 (95 %-CI: 1.5–4.3), für Benutzer von digitalen Mobiltelefonen bei 1.9 (95 %-CI: 1.3–2.7) und für Personen, die ein Schnurlostelefon benutzten, bei 2.1 (95 %-CI: 1.4–3.0). Nach Korrektur für die Verwendung mehrerer Telefontypen lag die Odds Ratio für Benutzer von analogen Mobiltelefonen bei 1.5 (95 %-CI: 1.04–2.3), für Benutzer von digitalen Mobiltelefonen bei 1.3 (95 %-CI: 0.9–1.7) und für Benutzer von Schnurlostelefonen bei 1.4 (95 %-CI: 1.02–1.8) (Hardell et al. 2006a).

In gepoolten Analysen werteten die Autoren ihre beiden Fall-Kontrollstudien mit Patientendaten von 1997 bis 2003 gemeinsam aus (Hardell et al. 2006b). Darin war das Meningeomrisiko bei Benutzern aller drei Telefontypen leicht erhöht und lag knapp unterhalb der Signifikanzgrenze. Das Risiko, an einem Akustikusneurinom zu erkranken, war in allen Gruppen statistisch signifikant erhöht (vgl. Tab. 15). Nach Korrektur für die Verwendung mehrerer Telefontypen bestand nur noch für Benutzer von analogen Mobiltelefonen ein signifikant erhöhtes Akustikusneurinom-Risiko (OR = 2.5, 95 %-CI: 1.8–3.5). Auch die gepoolte Auswertung zum Risiko bösartiger Hirntumore ergab in der nicht korrigierten Analyse signifikant erhöhte Risiken für die Benutzung von allen drei Telefontypen (Hardell et al. 2006c). Nach Korrektur für die Verwendung mehrerer Telefontypen lag die Odds Ratio für Benutzer von analogen Mobiltelefonen bei 1.2 (95 %-CI: 0.97–1.5), für Benutzer von digitalen Mobiltelefonen bei 1.1 (95 %-CI: 0.9–1.4) und für Benutzer von Schnurlostelefonen bei 1.1 (95 %-CI: 0.9–1.3).

Die Studien von Hardell et al. sind, solange die gemeinsame Analyse der Interphone-Studie noch aussteht, weiterhin diejenigen mit der grössten Anzahl an Hirntumorpatienten. Sie beinhalten insbesondere eine grosse Gruppe von Patienten mit Akustikusneurinom, und von Personen, die seit mindestens fünf Jahren ein Mobiltelefon benutzen.

d) Weitere neue Studien zum Hirntumorrisiko von Mobiltelefonbenutzern

Die irische Fallserie (Ali Kahn et al. 2003) an Gliompatienten einer neurochirurgischen Klinik wurde erklärermassen mit dem Ziel der Beruhigung der Patienten durchgeführt. Von 92 Gliompatienten wurden 19 ausgeschlossen, deren Tumor zentral, in beiden Hirnhemisphären oder nicht im Cortex gelegen war. Die übrigen wurden postoperativ nach Rechts- oder Linkshändigkeit und nach ihrer Mobiltelefonbenutzung befragt. Es zeigte sich kein Zusammenhang zwischen der Mobiltelefonbenutzung und der Tumorkalisation oder zwischen der Händigkeit und der Lokalisation bei den Mobiltelefonbenutzern. Die Studie schliesst keine Kontrollgruppe ein und kann wissenschaftlichen Ansprüchen nicht genügen. Sie wird daher nicht in Tabelle 15 aufgeführt.

Lahkola et al. 2006 führten eine Metaanalyse durch, in der die Risikoschätzer von zwölf epidemiologischen Studien zum Hirntumorrisiko bei Benutzern von analogen

oder digitalen Mobiltelefonen kombiniert wurden. Die gepoolten Odds Ratios zeigten weder für alle Hirntumore zusammen, noch für einzelne Tumorarten signifikant erhöhte Erkrankungsrisiken. Die höchste Odds Ratio betraf das Risiko eines ipsilateralen Hirntumors und lag bei 1.36 (95 %-CI: 0.99–1.87). In den separaten Auswertungen der beiden Mobiltelefonotypen ergaben sich leicht erhöhte, statistisch nicht signifikante Odds Ratios.

Die Untersuchung zur Entwicklung der Hirntumorinzidenz in den skandinavischen Ländern in den letzten Jahrzehnten ergab keine Zunahme der Neuerkrankungen nach Einführung der Mobilfunktechnik (Lönn et al. 2004a). Bei dieser Arbeit handelt sich um eine deskriptive Studie, die keine Aussagen über die Mobiltelefonbenutzung der Tumorpatienten ermöglicht. Auch allfällige weitere Einflussfaktoren wurden nicht erfasst. Mit einer solchen Studie liesse sich allenfalls ein starker Risikofaktor entdecken, wenn bei einem genügenden Anteil der Personen mit langer Benutzungsdauer die Latenzzeit der Tumoren überschritten wäre. Neuronale Hirntumore (Muscat et al. 2006) sind so selten, dass obige Bedingungen kaum zu erfüllen sind.

Bewertung

Frühere Studien, die den Zusammenhang von beruflicher Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern und Tumoren des Zentralnervensystems untersuchten, beobachteten wiederholt erhöhte Risiken in exponierten Berufsgruppen. Der höchste Wert für das zusätzliche Risiko betrug 90 %, eine Studie an Motorola-Arbeitern fand dagegen ein um 10 % reduziertes Risiko. Im deutschen Kollektiv der Interphone-Studie wurde bei beruflicher Hochfrequenzbelastung ein leicht erhöhtes, statistisch nicht signifikantes Gliom- und Meningeomrisiko mit weiten Vertrauensgrenzen festgestellt (Berg et al. 2006). Eine gemeinsame Analyse der beruflichen Belastung aller Interphone-Teilnehmer wird zuverlässigere Ergebnisse ermöglichen.

Etwa zwei Drittel aller Hirntumoren treten bei Personen im Alter über fünfzig Jahren auf. In dieser Bevölkerungsgruppe sind Mobiltelefone noch nicht lange üblich und werden auch weniger intensiv gebraucht. In vielen der bis 2002 veröffentlichten Fall-Kontrollstudien ist die Dauer oder die Intensität der Telefonbenutzung deshalb gering. Die Auswertungen ergaben teilweise erhöhte Risiken für die Benutzung von analogen Mobiltelefonen. Wegen der langen Latenzzeit von Hirntumoren ist es plausibel, dass ein Zusammenhang mit dem Erkrankungsrisiko vor allem für diese bereits länger eingesetzten Mobiltelefone beobachtet werden könnte. Zudem strahlten analoge Mobiltelefone stärker als moderne digitale Mobiltelefone. Unter diesem Aspekt ist es bemerkenswert, dass gerade die vorläufig umfassendste Studie, sowohl in Bezug auf die Fallzahlen als auch auf die Dauer und Häufigkeit der Mobiltelefonbenutzung, die deutlichsten Zusammenhänge mit dem Hirntumorrisiko ergeben hat (Hardell et al 2006c).

Die Interphone-Studie wurde als multizentrische Untersuchung mit einer ausreichenden Anzahl an Hirntumorpatienten für statistisch aussagekräftige Auswertungen konzipiert. Bisher sind sieben Publikationen erschienen, die Auswertungen der Interphone-Daten aus einzelnen Ländern enthalten. Hinweise auf ein erhöhtes Meningeomrisiko bei Mobiltelefonbenutzern zeigten weder die Interphone-Teilstudien noch die Arbeiten von Hardell und Kollegen. Hinsichtlich Akustikusneurinomen stellte die gepoolte

Analyse mehrerer Interphone-Teilstudien von Schoemaker et al. 2005 kein allgemein erhöhtes Risiko fest. Es zeigte sich aber ein statistisch signifikanter Anstieg bei über zehnjähriger Benutzung auf der zum Telefonieren bevorzugten Seite. Auch in anderen Studien ergaben sich vereinzelt signifikant erhöhte Risiken für Akustikusneurinome und Gliome in bestimmten Untergruppen, zum Beispiel bei Benutzern von analogen Mobiltelefonen, Langzeitbenutzern oder Personen mit ipsilateralen Tumoren. Zur Beurteilung dieser Ergebnisse müssen die Gesamtergebnisse der Interphone-Studie abgewartet werden.

Insgesamt muss immer noch als «möglich» eingestuft werden, dass intensive, langjährige Mobiltelefonbenutzung mit einem erhöhten Risiko für Hirntumoren einhergeht. Dies gilt vor allem für die Benutzung von analogen Mobiltelefonen. Die gemeinsame Analyse der Daten der Interphone-Studie wird wahrscheinlich eine genauere Aussage ermöglichen. Ergebnisse sind 2007 zu erwarten.

Tab. 15 > Übersicht über Studien zu Tumoren des Zentralnervensystems.

Tabelliert sind die gefundenen Risiken^{d)} und das 95 %-Vertrauensintervall (in Klammern).

Studie	Expositionsquelle Signal, Frequenz)	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp (Anzahl Fälle)	Mass	Tumorart	Risikoschätzer
Milham 1988b, Milham 1988c	Bei Ausübung des Hobbys (Funkgerät)		-	Register (29)	SMR	Hirn	1.39 (0.93–2.00)
Selvin et al. 1992	Radio-/TV-Sender	< 3,5 km	-	Cluster (35)	SMR	Hirn (< 20 Jahre)	1.16 (n.s.)
Kheifets et al. 1995	im Beruf	-	-	Meta-Analyse	RR	Hirn	1.2 (1.1–1.3) alle EMF-Exponierten 1.1 (1.0–1.3) Elektriker 1.7 (1.1–2.5) Elektroingenieure 1.3 (1.1–1.5) Schweißer
Grayson 1996	im Militär	< 100 W/m ²	<~6.4	Fall-Kontroll (230)	OR	Hirn	1.39 (1.01–1.90)
Hocking et al. 1996	drei TV-/Radiosender (63–533 MHz)	0.002–0.08 W/m ²	~2·10 ⁻⁴ –9·10 ⁻³	Cluster (606 Erwachsene, 30 Kinder)	SIR	Hirn (Erw. und Kinder)	0.89 (0.71–1.11) 1.10 (0.59–2.06) ^{a)}
Szmigielski 1996	im Militär (Radio- oder Radarstrahlung, 150–3500 MHz)	85 % des Kollektivs: < 2W/m ² Rest: 2–6 W/m ²	<~0.13 ~0.13–0.38	Arbeitsmedizin/Register (ca. 44)	SMR	Zentralnervensystem	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: 1.29 (0.80–2.06) 0–10 km: 1.04 (0.94–1.16)
Dolk et al. 1997a	TV-/Radiosender	< 0.07W/m ² < 10 km	<~8·10 ⁻³	Cluster (244)	SIR	Hirn (gut- und bösartig)	0–2 km: 0.62 (0.17–1.59) ^{a)} 0–10 km: 1.06 (0.93–1.20) ^{a)}
Dreyer et al. 1999a	Mobiltelefon (v.a. analog)	bei Normalgebrauch	<~2	Register (6)	SMR	Hirn	Rate pro 100'000 bei Benutzern von Telefonen mit ext. Antenne 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 (NMT 450/900 oder GSM)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (233)	OR	alle Hirntumore nur ipsilaterale	0.98 (0.69–1.41) 2.62 (1.02–6.71), v.a. Benutzer von analogen Mobiltelefonen
Morgan et al. 2000	im Beruf (Herstellung von Radio- und Mobilfunkgeräten, 30–800 MHz)	> Median		Arbeitsmedizin (51)	SMR	Hirn	0.91 (0.41–1.86)
Muscat et al. 2000	Mobiltelefon (v.a. analog)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (469)	OR	Hirn	0.85 (0.6–1.2) (mehr Tumore auf der ipsilateralen Seite)
Inskip et al. 2001	Mobiltelefon (v.a. analog, 800–900 MHz)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (782)	OR	Hirn	1.0 (0.6–1.5) (keine grössere Tumorhäufigkeit ipsilateral)
Johansen et al. 2001	Mobiltelefon (NMT 450/900 oder GSM)	bei Normalgebrauch	<~2	Register (154)	SIR	Hirn, Nervensystem	Männer: 0.95 (0.79–1.12) Frauen: 1.03 (0.62–1.61) Alle: 1.0 (0.8–1.1)
Auvinen et al. 2002	Mobiltelefon (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Registerbasierte Fall-Kontroll (398)	OR	alle Hirntumore Gliome	1.3 (0.9–1.8) (Total) 1.6 (1.1–2.3) ^{b)} 1.5 (1.0–2.4) (Total) 2.1 (1.3–3.4) ^{b)}

Studie	Expositionsquelle Signal, Frequenz)	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp (Anzahl Fälle)	Mass	Tumorart	Risikoschätzer
Hardell et al. 2002a, Hardell et al. 2002b	Mobiltelefon (NMT 450/900 oder GSM)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (1617)	OR	Hirn	1.3 (1.02–1.6) ^{b)} 1.0 (0.8–1.2) ^{c)}
Muscat et al. 2002	Mobiltelefon (generell)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (90)	OR	Akustikusneurinome	1–2 Jahre Gebrauch: 0.5 (0.2–1.3) 3–6 Jahre Gebrauch: 1.7 (0.5–5.1)
Hardell et al. 2003	Mobil- und Schnurlos-telefone (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (1358, diagnostiziert 1997–2000)	OR	Schläfenlappentumore	2.1 (1.3–3.3) ^{b)}
Christensen et al. 2004	Mobiltelefon (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (Interphone) (106)	OR	Akustikusneurinome (148)	4.4 (2.1–9.2) ^{b)} 0.90 (0.51–1.57) durchschnittliche Tumorgrosse: 1.66 vs. 1.39 cm ³ (p = 0.03)
Lönn et al. 2004b	Mobiltelefon (analog oder digital) Schnurlostelefon (DECT)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (Interphone) (148)	OR	Akustikusneurinome	1.0 (0.6–1.5) > 10 J. Gebrauch: 1.9 (0.9–4.1) ipsilateral, > 10 J.: 3.9 (1.6–9.5) 0.7 (0.4–1.2)
Christensen et al. 2005	Mobiltelefon (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (Interphone) (427)	OR	Meningeome Gliome hochgradig niedriggradig	0.83 (0.54–1.28) 0.71 (0.50–1.01) 0.58 (0.37–0.90) 1.08 (0.58–2.00) > 10 J. Gebrauch: 1.02 (0.32–3.24) 0.48 (0.19–1.26) 1.64 (0.44–6.12)
Hardell et al. 2005b	Mobil- und Schnurlos-telefone (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (1429, diagn. 1997–2000, zusätzl. Auswertung)	OR	Hirntumore	ländliche Region: 1.4 (0.98–2.0) ^{c)} > 5 J. Gebrauch: 3.2 (1.2–8.4) ^{c)} städtische Region: 0.9 (0.8–1.2) ^{c)} > 5 J. Gebrauch: 0.9 (0.6–1.4) ^{c)}
Hardell et al. 2005c	Mobil- und Schnurlos-telefone (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (413, diagn. 2000–2003)	OR	Meningeome	1.7 (0.97–3.0) ^{b)} , > 10 J. Gebr.: 2.1 (1.1–4.3) ^{b)} 1.3 (0.9–1.9) ^{c)} 1.3 (0.9–1.9) ^{b)}
						Akustikusneurinome	4.2 (1.8–10) ^{b)} , > 10 J. Gebr.: 2.6 (0.9–8.0) ^{b)} 2.0 (1.05–3.8) ^{c)} 1.5 (0.8–2.9) ^{b)}
Lönn et al. 2005	Mobiltelefon (NMT, GSM) Schnurlostelefon (DECT)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (Interphone) (644)	OR	Meningeome Gliome	0.7 (0.5–0.9), > 10 J. Gebr.: 0.9 (0.4–1.9) 0.8 (0.6–1.0), > 10 J. Gebr.: 0.9 (0.5–1.5)
						Meningeome Gliome	0.8 (0.5–1.2) 0.8 (0.5–1.1)
Schoemaker et al. 2005	Mobiltelefon (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	6 Fall-Kontrollstudien (Interphone) (678)	OR	Akustikusneurinome	0.9 (0.7–1.1) > 10 J. Gebrauch: 1.1 (0.7–1.8) ipsilateral, > 10 J.: 1.8 (1.1–3.1)

Studie	Expositionsquelle Signal, Frequenz)	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp (Anzahl Fälle)	Mass	Tumorart	Risikoschätzer
Berg et al. 2006	im Beruf: Radio-TV-Sender, Radar, Funk	Belastungskategorie «hoch»	zeitweise > 0.08	Fall-Kontroll (Interphone) (747)	OR	Meningeome Gliome	1.34 (0.61–2.96) 1.22 (0.69–2.15)
Hardell et al. 2006a	Mobil- und Schnurlos-telefone (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (317)	OR	bösartige Hirntumore	2.6 (1.5–4.3) ^{b)} , > 10 J. Gebr.: 3.5 (2.0–6.4) ^{b)} 1.9 (1.3–2.7) ^{c)} , > 10 J. Gebr.: 3.6 (1.7–7.5) ^{c)} 2.1 (1.4–3.0) ^{f)} , > 10 J. Gebr.: 2.9 (1.6–5.2) ^{f)}
Hardell et al. 2006b	Mobil- und Schnurlos-telefone (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	2 Fall-Kontroll (1254)	OR	Meningeome Akustikusneurinome	1.3 (0.99–1.7) ^{b)} 1.1 (0.9–1.3) ^{c)} 1.1 (0.9–1.4) ^{f)} 2.9 (2.0–4.3) ^{b)} 1.5 (1.2–2.1) ^{c)} 1.5 (1.0–2.0) ^{f)}
Hardell et al. 2006c	Mobil- und Schnurlos-telefone (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	2 Fall-Kontroll (905)	OR	bösartige Hirntumore	1.5 (1.1–1.9) ^{b)} 1.3 (1.1–1.6) ^{c)} 1.3 (1.1–1.6) ^{f)}
Hepworth et al. 2006	Mobiltelefon (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (Interphone) (966)	OR	Gliome	0.94 (0.78–1.13) > 10 J. Gebrauch: 0.90 (0.63–1.28) ipsilateral: 1.24 (1.02–1.52) ipsilateral, > 10 J.: 1.60 (0.92–2.76)
Lahkola et al. 2006	Mobiltelefon (NMT, GSM)	bei Normalgebrauch	<~2	Meta-Analyse (2780)	OR	Hirntumore ipsilateral Meningeome Gliome Akustikusneurinome	0.98 (0.83–1.16) 1.36 (0.99–1.87) 0.87 (0.72–1.05) 0.96 (0.78–1.18) 1.07 (0.89–1.30)
Schüz et al. 2006b	Mobiltelefon (analog oder digital) Schnurlostelefon (DECT)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (Interphone) (747)	OR	Meningeome Gliome Meningeome Gliome	0.84 (0.62–1.13) > 10 J. Gebrauch: 1.09 (0.35–3.37) 0.98 (0.74–1.29), Frauen: 1.96 (1.10–3.50) > 10 J. Gebrauch: 2.20 (0.94–5.11) 0.77 (0.58–1.03) 0.93 (0.69–1.25)
Schüz et al. 2006c	Basisstationen von DECT-Schnurlostelefonen	bei Normalgebrauch	< 3 m vs. > 3 m resp. kein DECT-Telefon	Fall-Kontroll (Interphone) (747)	OR	Meningeome Gliome	0.83 (0.29–2.36) 0.82 (0.29–2.33)
Takebayashi et al. 2006	Mobiltelefon (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (Interphone) (97)	OR	Akustikusneurinome	0.73 (0.43–1.23) > 8 J. Gebrauch: 0.79 (0.24–2.65) ipsilateral: 0.90 (0.50–1.62)

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe Seite 49; ~ bezeichnet geschätzte Werte

a) bezieht sich auf Tumoren bei Kindern.

b) bezieht sich nur auf Benutzer von analogen Mobiltelefonen

c) bezieht sich nur auf Benutzer von GSM-Mobiltelefonen

d) bei Dreyer et al. 1999a: standardisierte Mortalitätsraten

e) SI: altersstandardisierte Inzidenz pro 100 000 / Jahr

f) bezieht sich nur auf Benutzer von Schnurlostelefonen

2.4.4 Augentumore

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. Die in UM 162 diskutierte kleine deutsche Studie von Stang et al. 2001 hatte ein erhöhtes Augentumorrisiko bei Mobiltelefon- und Funkgerätbenutzern gefunden, die dänische Registerstudie von Johansen et al. 2002 dagegen nicht.

Einführung

Als Reaktion auf die früheren Ergebnisse analysierten Inskip et al. 2003 anhand des speziellen Krebsregisters SEER die Augenmelanom-Inzidenz in elf Regionen der USA. Sie stellten eine leichte Abnahme über die Jahre 1975 bis 1998 fest. Stang et al. (2004, 2005) kritisierten an dieser Arbeit, dass der Rückgang eventuell durch eine Abnahme des Anteils histologisch bestätigter Augentumoren zustande gekommen sein könnte. Dieser Sachverhalt war auch in deutschen und anderen Krebsregistern beobachtet worden. Im Anschluss an diesen Disput beschäftigten sich weitere Forschungsgruppen mit der Inzidenz von Augenmelanomen. In den flächendeckenden Krebsregistern von Dänemark und Schweden, in die auch nicht histologisch bestätigte Krebserkrankungen Eingang finden, war bis Ende der 1990er-Jahre keine Zunahme der Neuerkrankungsrate zu beobachten. Von einer Fall-Kontrollstudie zum Augenmelanom-Risiko des Forschungsteams um A. Stang wurde bisher nur die Methodik publiziert (Schmidt-Pokrzywniak et al. 2004).

Resultate

Ausser der kleinen deutschen Fall-Kontrollstudie von 2001 gibt es keine Hinweise auf ein erhöhtes Augentumorrisiko bei Mobiltelefonbenutzenden. Weitere Fall-Kontrollstudien liegen zur Zeit nicht vor. Augentumoren sind sehr selten, sie treten vor allem bei älteren Personen auf und gehören zu den Tumortypen mit den langsamsten Wachstumsraten. Die Inzidenzstudien erfassten im allgemeinen Daten bis Ende der 1990er-Jahre. Bei den Arbeiten von Johansen et al. 2002 und Inskip et al. 2003 handelt sich um deskriptive Studien zur Tumorfrequenz seit Einführung der Mobilfunktechnik. Sie enthalten keine Aussagen über die Mobiltelefonbenutzung der Tumorpatienten und erfassen keine allfälligen weiteren Einflussfaktoren. Übereinstimmende Zeitverläufe von Verbreitung der Mobilfunktechnik und Tumorzinidenz sind kein Beweis für einen Zusammenhang. Nicht übereinstimmende Zeitverläufe sind aber auch kein Beweis für die Unschädlichkeit der Hochfrequenzexposition. In derartigen Studien könnte allenfalls ein starker Risikofaktor entdeckt werden, wenn die Latenzzeit der Tumoren bei einem genügenden Anteil älterer Personen mit langer Mobiltelefonbenutzung überschritten wäre.

Bewertung

Die Augen sind insbesondere beim Gebrauch von Mobiltelefonen und Funkgeräten exponiert. Ein damit einhergehendes erhöhtes Augentumorrisiko kann vorläufig nicht ausgeschlossen werden. Dass das Augentumorrisiko in der Nähe von Sendeanlagen wie TV-, Radio- oder Mobilfunkantennen erhöht ist, erscheint aufgrund der vorliegenden Studien eher unwahrscheinlich.

Tab. 16 > Übersicht über Studien zu Augentumoren.

Tabelliert sind die gefundenen Risiken und das 95 %-Vertrauensintervall (in Klammern).

Studie	Expositionsquelle (Signal, Frequenz)	Intensität	Max. SAR10 [W/kg]	Studientyp	Mass	Stärke der Assoziation
Dolk et al. 1997b	TV-/Rudiosender (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: 0 (keine Fälle) 0–10 km: 1.16 (0.75–1.80)
Stang et al. 2001	im Beruf (analoge oder digitale Mobiltelefone, Funkgeräte)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll	OR	Mobiltelefonbenutzer: 4.2 (1.2–14.5) Funkgerätnutzer: 3.3 (1.2–9.2)
Johansen et al. 2001	Mobiltelefon (NMT 450/900 oder GSM)	bei Normalgebrauch	<~2	Register	SIR	Männer: 0.65 (0.28–1.27) Frauen: 0 (keine Fälle)
Johansen et al. 2002	Mobiltelefon (generell)	bei Normalgebrauch	<~2	Register	Zeit-trend SIR	keine Änderung
Inskip et al. 2003	Mobiltelefon (generell)	bei Normalgebrauch	<~2	Register	Zeit-trend SIR	pro Jahr Männer: –0.7 % (–2.3; +0.9 %) Frauen: –1.2 % (–2.5; 0.0 %)

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.

2.4.5 Studien über weitere Tumorarten

Neben den bereits besprochenen Hirn- und Augentumoren wurde auch für Tumoren der Haut, der Speicheldrüsen und der Hoden die Hypothese aufgestellt, dass ihre Entstehung durch hochfrequente Strahlung von Mobiltelefonen oder Radargeräten begünstigt werden könnte. Studien, welche gezielt solche und einzelne weitere Tumorarten untersucht haben, sind in Tabelle 17 zusammengestellt.

Einführung

Hallberg und Johansson 2004 stellten in einem zeitlichen Vergleich fest, dass in Schweden sowohl die Inzidenz und die Sterblichkeit an Hautmelanomen in den letzten 50 Jahren zugenommen haben als auch die Anzahl an Hochfrequenzsendern. Die Autoren deuten dies als einen Hinweis auf einen Zusammenhang. Die Flugreisen in südliche Länder seien erst später häufig geworden, und die Zunahme der UV-Strahlung durch den Rückgang des stratosphärischen Ozons habe in den Jahren von 1955 bis 1965 noch kaum eine Rolle gespielt. Weitere Änderungen des Lebensstils, z. B. der Bekleidungsgeohnheiten, werden nicht diskutiert. Zudem wird nicht untersucht, wie gut die Zahl der Flugreisen in den Süden mit dem sich nicht nur in den Ferien ändernden Freizeitverhalten korreliert. Aus einer zeitlichen Korrelation von zwei Faktoren darf nicht automatisch auf eine ursächliche Beziehung geschlossen werden.

Resultate

Die Nähe der handgehaltenenen Mobiltelefone zur Wangenregion gab Anlass zu Untersuchungen bezüglich Tumoren der Speicheldrüsen und des Gesichtsnervs (Fazialis). Die Fall-Kontrollstudie von Warren et al. 2003 zu Fazialistumoren erlaubt wegen der geringen Fallzahl keine differenzierten Auswertungen oder Schlussfolgerungen. Die drei Fall-Kontrollstudien zum Risiko von Speicheldrüsentumoren von Auvinen et al. 2002, Hardell et al. 2004 und Lönn et al. 2006 geben keine Hinweise auf eine Assoziation mit der Verwendung von Mobil- oder Schnurlostelefonen. Alle Autoren verweisen aber auf die geringe Anzahl langjähriger Benutzer in ihren Kollektiven.

Aufgrund der Resultate der in UM 162 diskutierten Studien konnte ein Zusammenhang zwischen der Mobiltelefonexposition und dem Risiko von Hodentumoren nicht ausgeschlossen werden. Weil der physiologische Temperatúrausgleich im Hodengewebe ähnlich wie bei den Augen wenig effizient ist, reicht eine geringere Strahlungsleistung für einen Temperaturanstieg aus als in gut durchblutetem Gewebe. Da keine neuen Studien zum Risiko von Hodentumoren bei Hochfrequenzexposition erschienen sind, ist der Zusammenhang weiterhin nicht beurteilbar. In Bezug auf Speicheldrüsentumore erscheint ein kausaler Zusammenhang zwischen Hochfrequenzexposition und Erkrankungsrisiko unwahrscheinlich.

Bewertung**Tab. 17 > Übersicht über Studien zu weiteren Tumorarten (Hoden, Haut, Speicheldrüsen, Gesichtsnerv (Fazialis)).**

Studie	Expositionsquelle (Signal, Frequenz)	Intensität	Max SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp	Assoziation	Keine Assoziation
Hayes et al. 1990	im Beruf (Hochfrequenz allgemein)	-	-	Fall-Kontroll	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	Radar pistolen	-	-	Register/Kohorte	Hautkrebsinzidenz: RR = 1.45 (90 %-CI: 1.1–1.9) Hodenkrebsinzidenz: RR = 1.3, (90 % CI: 0.9–1.8)	
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
Auvinen et al. 2002	Mobiltelefon (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll (registerbasiert)		Speicheldrüsentumoren (n = 34): OR = 1.3 (95 %-CI: 0.4–4.7)
Warren et al. 2003	Mobiltelefon (generell)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll		Intratemporale Fazialistumoren (n = 18): OR = 0.6 (95 %-CI: 0.2–1.9)
Hardell et al. 2004	Mobil- und Schnurlos-telefone (analog oder digital)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll		Speicheldrüsentumoren (n = 267): OR = 1.02 (0.75–1.38) insgesamt, analog: 0.92, digital: 1.01, Schnurlos-telefone: 0.99
Lönn et al. 2006	Mobiltelefon (NMT, GSM)	bei Normalgebrauch	<~2	Fall-Kontroll		Speicheldrüsentumoren: maligne (n = 60): OR 0.7 (0.4–1.3) benigne (n = 112): OR 0.9 (0.5–1.5)

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert.

2.4.6 Studien über Krebs allgemein und Zusammenfassung mehrerer Tumorarten

Vor allem in Register- und Kohortenstudien wurden häufig Assoziationen zwischen der Hochfrequenzexposition und allen Krebserkrankungen überprüft. Es wurden nicht nur die Tumorarten evaluiert, für welche a priori eine Hypothese bestand. Studien zu Erkrankungsklustern in der Umgebung von Sendeanlagen werden oftmals von Anwohnern oder praktizierenden Ärzten initiiert und haben die Krebshäufigkeit generell zum Gegenstand.

Einführung

Bei der so genannten Naila-Studie von Eger et al. 2004 handelt es sich um eine von vier Hausarztpraxen durchgeführte Clusterstudie in einer süddeutschen Kleinstadt. Darin wurde die Anzahl der in den Praxen behandelten Krebspatienten aus dem Umfeld einer GSM-Mobilfunkbasisstation mit derjenigen aus angrenzenden Strassenzügen verglichen. Basis des Vergleichs war die Zahl der wegen anderer Krankheiten behandelten Patienten in den Praxen. Während die Odds Ratio für eine Krebsbehandlung in den ersten fünf Jahren der Untersuchung im inneren und äusseren Kreis um die Basisstation ähnlich war, wurden in den zweiten fünf Jahren auffällig viele Krebserkrankungen im inneren Kreis um die Antenne festgestellt: Zwischen 1999 und 2004 traten von insgesamt 21 Krebserkrankungen im ganzen Untersuchungsgebiet 13 im Nahbereich des Senders auf. Daraus ergab sich eine Odds Ratio von 3.38 (95 %-CI: 1.39–8.25). Für den gesamten Studienzeitraum von 1994 bis 2004 betrug die Odds Ratio 2.35 (95 %-CI: 1.18–4.67) aufgrund von insgesamt 34 Fällen. Die Zahl der im ganzen Studiengebiet im Zeitraum von 1999 bis 2004 registrierten Krebsneuerkrankungen entsprach derjenigen, die im Vergleich mit dem saarländischen Krebsregister zu erwarten war; d.h. die Anzahl der Krebsfälle in den Kontrollstrassen war auffällig niedrig. Die Ergebnisse von Messungen und Berechnungen der Hochfrequenzexposition sind nur in einem unveröffentlichten Bericht zusammengestellt. Methodische Fragen stellen sich auch hinsichtlich der Auswahl der in die Studie aufgenommenen Strassenzüge und in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Bevölkerungsgruppen. Ebenfalls unklar ist, wie hoch der Anteil der in den Praxen behandelten Personen unter den Anwohnern der ausgewählten Strassen war.

Resultate

Eine sehr ähnliche Studie wurde in einem Quartier von Netanya, Israel, durchgeführt (Wolf und Wolf 2004). In dieser Arbeit wurde im zweiten Jahr nach der Errichtung eines Mobilfunksenders die Anzahl der neu aufgetretenen Krebserkrankungen in einer Klinik auf die Anzahl aller Patienten des Stadtquartiers bezogen. Diese Rate wurde mit der Zahl der neuen Krebserkrankungen pro Patientenstamm einer benachbarten Klinik, mit den Krebsinzidenzraten der ganzen Stadt Netanya sowie mit der landesweiten Krebsinzidenz verglichen. Die im Studienjahr um den Sender beobachteten 8 Krebserkrankungen von 622 Patienten übertrafen die Erkrankungsrate in dem als Kontrollgebiet ausgewählten Quartier beträchtlich (2 Krebserkrankungen bei 1222 Patienten). Im Vergleich mit der nationalen israelischen Inzidenzrate berechneten die Autoren ein vierfach erhöhtes Krebsrisiko. Auch in dieser Studie war das Krebsrisiko im Kontrollkollektiv auffallend niedrig, und die Ergebnisse wurden nicht für demographische, soziökonomische und weitere Einflussfaktoren korrigiert.

Im Anschluss an die Diskussion um die Naila-Studie stellten Meyer et al. 2006 die Krebserkrankungsraten aller Gemeinden in Bayern mit vollständigen Krebsregistern und kompakter Siedlungsfläche in den Jahren 2002 und 2003 zusammen. Sie teilten die Gemeinden in drei Belastungskategorien ein: nach der Betriebsdauer der Mobilfunkantennen und der Abdeckung des bewohnten Gemeindegebietes durch diese Antennen. Die altersstandardisierte Krebsinzidenz für jede Gemeinde wurde mit der Krebsinzidenz in ganz Bayern verglichen. Diese ökologische Studie fand keine erhöhte Krebshäufigkeit im Umkreis von seit mindestens fünf Jahren bestehenden Mobilfunksendeanlagen. Aufgrund methodischer Schwierigkeiten kann diese Untersuchung wenig über den Zusammenhang zwischen Hochfrequenzexposition und Krebshäufigkeit aussagen: Die meisten kleinen Gemeinden hatten keine Basisstationen, bzw. die Gemeinden mit keiner, geringer und mässiger Senderabdeckung waren nicht vergleichbar. Bei der Expositionsabschätzung wurden technische Parameter der Basisstationen nicht berücksichtigt. Es gab auch keine Korrekturen für soziodemographische oder gar individuelle Einflüsse wie z. B. Rauchen. In den Punktwolkendarstellungen mit Berücksichtigung der Einwohnerzahl ist aber gut zu erkennen, dass die Krebshäufigkeit in kleinen Gemeinden sehr stark variiert, während sie in allen grösseren Gemeinden nahe beim Landesdurchschnitt liegt. Die Chance, dass die Erkrankungsrate einer Gemeinde oder eines Quartiers statistisch signifikant vom Landesdurchschnitt abweicht, steigt also, je kleiner die Gemeinde ist. Solche abweichenden Ergebnisse erhalten im allgemeinen öffentliches Interesse, unauffällige Befunde dagegen nicht. Die selektive Veröffentlichung von Studienergebnissen zu kleinen Krankheitsclustern wie in Naila und Netanya führt daher zum bekannten Publikationsbias, einer einseitigen Wiedergabe der auffälligen Befunde innerhalb eines grossen Streubereichs.

Eine ähnliche Auswertung von Registerdaten publizierten Gavin und Catney 2006, ebenfalls als Reaktion auf eine öffentliche Debatte um das Auftreten von Krebserkrankungen in der Umgebung eines Rundfunksenders in Nordirland. Die Anzahl der Erkrankungen in der Nähe des Senders wurde altersstandardisiert mit den Häufigkeiten in einer weiter entfernten Region und in der Gesamtbevölkerung Nordirlands verglichen. Der Rundfunksender war 1989 errichtet worden, die Inzidenz- und Mortalitätsdaten des nordirischen Krebsregisters stammten aus den Jahren 2001 und 2002. In der Umgebung des Senders wurden 20 Krebserkrankungen registriert. Der Vergleich der Erkrankungs- und Sterblichkeitsraten ergab weder für Krebs allgemein, noch für einzelne Tumorarten eine statistisch signifikante Häufung in der Umgebung des Senders. Bei dieser Arbeit handelt es sich um eine geografische Analyse, deren Aussagekraft durch die kleine Fallzahl limitiert ist. Die Publikation enthält keine Angaben zu den technischen Daten des Senders.

Wie in UM 162 diskutiert, sagen einzelne statistisch signifikante Ergebnisse in Studien mit vielen Zielgrössen noch nichts über einen kausalen Zusammenhang aus. Wenn ohne vorgegebene Hypothese vereinzelt signifikante Assoziationen beobachtet werden, muss in Folgeuntersuchungen gezielt abgeklärt werden, ob es sich um einen realen Effekt oder einen Zufallsbefund handelt. Die älteren Studien zum Krebsrisiko sind mehrheitlich explorative Studien. Die Untersuchungen von Eger et al. 2004 und Wolf et al. 2004 sind geographische Studien an kleinen Kollektiven, mit den bekannten Problemen der Auswahl des Gebietes, der Definition und der Bestimmung der Exposi-

Bewertung

tion sowie der geringen Fallzahlen, die keine Korrektur für Störgrößen erlauben. Wie oben dargestellt, kann die Veröffentlichung von vielen kleinen Studien mit scheinbar signifikanten Resultaten zu einer verzerrten Wahrnehmung von Risiken führen, dem so genannten Publikationsbias. Keine der obigen Studien erlaubt eine Aussage über den kausalen Zusammenhang zwischen Hochfrequenzstrahlung und Krebshäufigkeit.

Tab. 18 > Übersicht über Studien zu Krebs allgemein und Zusammenfassung mehrerer Tumorarten.

Studie	Expositionsquelle (Signal, 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
Szmigielski 1996	Radio- oder Radarstrahlung	85 % des Kollektivs: < 2 W/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 (Herstellung von Radio- und Mobilfunkgeräten, 30–800 MHz)	> Median	-	Arbeitsmedizin	-	Haut, Atmungsorgane, Verdauungsorgane, Magen, Bauchspeicheldrüse, Prostata, weibliche Genitalorgane, Blase, Niere
Johansen et al. 2001	Mobiltelefon (NMT 450/900 oder GSM)	bei Normalgebrauch	<~2	Register	-	Rachen, Speiseröhre, Magen, Darm, Rektum, Leber, Bauchspeicheldrüse, Kehlkopf, Lunge, Gebärmutter, Prostata, Hoden, Niere, Blase, Haut, Schilddrüse, unspezifizierte Tumore
Eger et al. 2004	Mobilfunkbasisstation (GSM 935)	Distanz < 400m vs. ausserhalb		Cluster (34 Fälle)	Krebsfälle insgesamt: OR: 2.35 (1.18–4.67)	
Wolf et al. 2004	Mobilfunkbasisstation (850 MHz, TDMA)	Distanz < 350m	3–0 mW/m ²	Cluster (10 Fälle)	Krebsfälle insgesamt: RR 4.14 (CI nicht angegeben) im Vergleich zur nationalen Inzidenzrate	
Meyer et al. 2006	Mobilfunkbasisstation (Signal, Frequenz?)	Distanz < 400m, Betriebsdauer mind. 5 Jahre		Register		Krebsinzidenz in Gemeinden mit geringer und mässiger Senderabdeckung nicht erhöht.
Gavin und Catney 2006	Rundfunksender (Frequenz?)	Distanz < 5 km vs. Gesamtbevölkerung		Register		Krebsinzidenz und -mortalität in der Umgebung des Senders nicht erhöht

Detaillierte Erläuterungen zur Tabelle siehe S. 49

2.5 Nichtkanzerogene Wirkungen

2.5.1 Fertilität und Auswirkungen auf die Nachkommen

Im Zusammenhang mit einer möglichen zellschädigenden Wirkung von Hochfrequenzstrahlung wurden auch Risiken für die Nachkommen von exponierten Personen und Einflüsse auf die Fruchtbarkeit diskutiert. Die in UM 162 erfassten Studien untersuchten das Risiko für Fehl- oder Frühgeburten, angeborene Missbildungen und Tumorerkrankungen bei Kindern. Zusätzlich wurden Auswirkungen der hochfrequenten Strahlung auf die Spermienqualität von beruflich exponierten Männern untersucht. Die meisten Untersuchungen betrafen Personen, die mit Kurzwellendiathermiegeräten gearbeitet hatten. Ihre Resultate sind nicht konsistent. Nach der Benutzung von Mobiltelefonen wurde nur in einer Studie an Eltern von Kindern mit einem Nervenzelltumor gefragt, und lediglich sieben Mütter gaben an, regelmässig ein Mobiltelefon zu verwenden (De Roos et al. 2001). Zu diesem Thema liegen keine neuen Publikationen vor. Seit dem Bericht UM 162 sind zwei Arbeiten erschienen, die Zusammenhänge zwischen dem Mobiltelefongebrauch und der männlichen Fertilität untersucht haben.

Einführung

Davoudi et al. 2002 analysierten bei 13 Männern nach 5 Tagen ohne Mobiltelefonbenutzung ein Spermogramm. Vor einem zweiten Spermogramm 4 Wochen später wurden die Teilnehmer angewiesen, an 5 Tagen während 6 Stunden ein GSM-Mobiltelefon am Gürtel zu tragen und möglichst viel zu telefonieren. Der Anteil der schnell progressiv beweglichen Spermien (Einteilung nach WHO) nahm im Durchschnitt signifikant von 32.3 auf 26.1 % ab. Der Anteil langsam progressiv beweglicher Spermien stieg von 24.8 auf 29.7 %, die Häufigkeit nicht progressiv beweglicher und unbeweglicher Spermien, sowie alle anderen Parameter blieben unverändert. Die Studie hat viele methodische Unzulänglichkeiten: Die Spermien wurden von Hand ausgezählt, und die Auswertung erfolgte nicht verblindet. Das effektive Ausmass der Telefonbenutzung wurde nicht differenziert, und weitere mögliche Einflussfaktoren nicht erfasst oder diskutiert. Die Publikation erfolgte in einem Journal ohne Peer-Review-Prozess.

Resultate

Zur Überprüfung der Ergebnisse von Davoudi untersuchten Fejes et al. 2005 in einem klinischen Umfeld 371 gesunde, nicht rauchende Männer, welche die Universitätsklinik Szeged wegen Fertilitätsproblemen aufsuchten. Im Rahmen der Anamneseerhebung wurden die Patienten auch nach der Verwendung von Mobiltelefonen, speziell nach der Besitzdauer in Monaten, nach der Dauer des Standbybetriebs und nach der Gesprächsdauer befragt. Anschliessend und drei Wochen später wurde das Ejakulat untersucht, zur Analyse wurde das Sperma mit dem «besseren» Ergebnis verwendet. Die Resultate von Männern mit einer bekannten Ursache für Subfertilität wie Hormonprobleme, Varikozele etc. wurden ausgeschlossen. Die Anteile der beweglichen bzw. nicht beweglichen Spermien wurden zwischen Männern mit bis zu 15 Minuten Gesprächsdauer pro Tag und Männern mit mehr als 60 Minuten Gesprächsdauer pro Tag verglichen. Ferner wurden die Resultate von Männern verglichen, deren Mobiltelefon sich bis zu eine Stunde pro Tag im Standbybetrieb befand (in weniger als 50 cm Entfernung gehalten) und die Ergebnisse von Männern mit mehr als 20 Stunden Standby-

betrieb pro Tag. Es zeigte sich ein negativer Zusammenhang zwischen der Dauer des Mobiltelefonbesitzes und dem Anteil schnell progressiv beweglicher Spermien ($r = -0.12$, $p = 0.023$) sowie eine positive Korrelation mit dem Anteil langsam progressiv beweglicher Spermien ($r = 0.12$, $p = 0.024$). Ähnliche Resultate ergaben sich für die Benutzungsdauer von Mobiltelefonen. Es zeigte sich kein Zusammenhang zwischen der Dauer des Standbybetriebs und den untersuchten Spermienparametern. Auch diese Publikation hat methodische Schwächen: Zum Beispiel ist nicht klar, ob und wie die Teilnehmer einbezogen wurden, deren Belastungen nicht in die Extremkategorien fielen. Zudem wird nicht erwähnt, ob die Untersucher gegenüber dem Expositionstatus verblindet waren. Die Angaben zur Expositionsabschätzung sind sehr knapp, Informationen zur Art des Telefons, zur Lokalisation im Standbybetrieb und zum Gebrauch von Head-Sets fehlen. Zusätzliche Einflussfaktoren wie berufliche Expositionen wurden nicht berücksichtigt, es wurden einfache Korrelationen berechnet.

Ergänzend ist eine In-vitro-Studie zu erwähnen, die sich auf die Ergebnisse von Fejes et al. bezieht. Darin wurde jeweils eine Hälfte einer Spermaprobe von 27 gesunden Männern während fünf Minuten einer GSM-900-MHz-Belastung mit einer durchschnittlichen Leistungsflussdichte von 0.2 W/m oder einer Kontrollsituation ausgesetzt (Erogul et al. 2006). Neben der Abnahme der Spermienanteile mit schnell oder langsam progressiver Beweglichkeit wurde auch eine Zunahme der unbeweglichen Spermien beobachtet.

Sowohl die beiden Studien zur Spermienqualität bei Mobiltelefonbenutzern als auch die experimentelle Studie mit In-vitro-Exposition kamen im Wesentlichen zum selben Ergebnis: Es ergab sich eine Abnahme der Spermienbeweglichkeit nach hochfrequenter Exposition, aber keine Änderung der Spermienkonzentration. Leider haben beide Studien mit In-vivo-Belastung erhebliche methodische Schwächen. Jede einzelne dieser Arbeiten muss als nicht aussagekräftig beurteilt werden. Die Belastungssituationen der drei Studien können nicht verglichen werden. Die übereinstimmenden Resultate könnten Ergebnis eines typischen Publikationsbias sein, bei dem ohne Peer-Review-Verfahren und in sekundären Zeitschriften selektiv das veröffentlicht wird, was bereits beobachtet wurde. Die Studien werden hier trotzdem angeführt, weil sonst keine Ergebnisse aus den letzten Jahren zu diesem Thema vorliegen. Wissenschaftlich gut abgestützte Resultate aus erstklassigen Publikationen sind hier dringend zu wünschen.

Bewertung

Tab. 19 > Übersicht über Studien zu Fertilität und Auswirkungen auf die Nachkommen.

Studie	Expositionsquelle (Signal, Frequenz)	Intensität	Max SAR ₁₀ [W/kg]	Studientyp	Assoziation	keine oder nicht signifikante 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 (Kurzwellendiathermie)	-	-	Fall-Kontroll		Missbildungen
Ouellet-Hellstrom and Stewart 1993	im Beruf (Kurz- oder Mikrowellen-diathermie)	KW: 0.8–120 W/m ² MW: 0.4–166 W/m ²	MW: ~0.03–14	Querschnittsbefragung	Dosis-Wirkungsbeziehung	MW: Spontanaborte: OR = 1.22 (0.92–1.63), KW: keine Assoziation mit Spontanaborten
Gubaran 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	berufliche Hochfrequenzexposition der Mutter (Frequenz?) Mobiltelefongebrauch während der Schwangerschaft (generell)	-	- <~2	Fall-Kontroll		Neuroblastom bei Kindern: OR = 2.8 (0.9–8.7) OR = 2.1 (95 %CI: 0.4–11)
Davoudi et al. 2002	Mobiltelefon (GSM)	– Standbybetrieb am Gürtel: 6 Std. während 5 Tagen – Normalgebrauch	? <~2	Experimentelle Studie	– Anteil gut beweglicher Spermien + Anteil langsam beweglicher Spermien	immobile Spermien, Spermatozoendichte, Morphologie, Samenvolumen
Fejes et al. 2005	Mobiltelefon (Signal, Frequenz?)	– Normalgebrauch: < 15 Min./d vs. > 60 Min./d – Standbybetrieb: < 1 Std./d vs. > 20 Std./d – Besitzdauer	<~2 ?	Fallreihe	– Anteil gut beweglicher Spermien + Anteil langsam beweglicher Spermien	Spermienkonzentration Spermienbeweglichkeit insgesamt
Erogul et al. 2006	Mobiltelefon (GSM 900) Exposition in vitro	0.2 W/m ²	~0.02	Experimentelle Laborstudie	– Anteil gut beweglicher Spermien – Anteil langsamer Spermien + Anteil unbeweglicher Spermien	

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 49; Abkürzungen der Masse sind im Glossar (Verzeichnisse) erläutert. KW: Kurzwelle; MW: Mikrowelle;

3 > Forschungsprogramme «Perform B» und «REFLEX»

3.1 Einleitung

Neben Untersuchungen am Menschen werden für die Risikoanalyse auch Tierstudien und Untersuchungen an isolierten menschlichen oder tierischen Zellen durchgeführt. Grundlagenstudien an Zell- oder Tiermodellen dienen zur Abklärung der Wirkung von HF-Feldern auf spezifische biologische Prozesse in dafür geeigneten Modellsystemen. Eine direkte Ableitung gesundheitlicher Risiken für den Menschen aufgrund solcher Ergebnisse ist jedoch nur beschränkt möglich, da nicht, wie häufig in epidemiologischen Studien, eine gesundheitliche Beeinträchtigung, sondern eine molekulare oder zelluläre Veränderung als Endpunkt gemessen wird. Da solche Veränderungen der Entstehung menschlicher Krankheiten zugrunde liegen, können sie aber durchaus auf ein gesundheitliches Risiko hindeuten. Die Bedeutung für die menschliche Gesundheit muss daher für jeden Befund im Einzelfall bewertet werden.

Die Forschung auf diesem Gebiet sieht sich mit verschiedenen Problemen konfrontiert. Einerseits beschäftigt sie sich mit biologischen Effekten, die oft an der Nachweisgrenze des zur Verfügung stehenden experimentellen Instrumentariums liegen, andererseits lassen sich gewisse Effekte nur unter ganz spezifischen experimentellen Bedingungen beobachten. Dazu kommt, dass die Expositionsbedingungen in der Vergangenheit oft nicht genügend charakterisiert waren, so dass beobachtete biologische Effekte auch Artefakte sein könnten. Es ist eine leidvolle Erfahrung der letzten Jahre, dass erstmalig gefundene Effekte bei Wiederholung der Untersuchung durch eine andere Forschungsgruppe oder mit verbesserter Expositionseinrichtung und -charakterisierung nicht bestätigt werden konnten.

Vor diesem Hintergrund wurden die beiden europäischen Forschungsprogramme «Perform B» und «REFLEX» (Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Energy Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive *in vitro* Methods) lanciert mit dem Ziel, Ergebnisse vorangegangener Studien zu bestätigen oder zu widerlegen und widersprüchliche Befunde zu klären.

Die in diesen beiden Forschungsprogrammen durchgeführten Untersuchungen sind bei Weitem nicht die einzigen an Tieren und Zellen. Das vorliegende Kapitel beschränkt sich jedoch auf die Darstellung dieser beiden Programme, da sie einerseits vom methodischen Standpunkt aus überzeugend und andererseits auch in der Öffentlichkeit auf grosses Interesse gestossen sind.

Grundlage für die Darstellung und Bewertung sind die beiden umfangreichen Schlussberichte, welche ohne Peer-Review publiziert wurden. Dazu kommen einzelne, bereits in wissenschaftlichen Zeitschriften mit Peer-Review-Verfahren publizierte Artikel, die aus diesen Programmen hervorgegangen sind.

In beiden Programmen wurden gegenüber früheren Studien die experimentellen Anordnungen entscheidend verbessert. So wurden alle Versuche unter standardisierten und streng kontrollierten Expositionsbedingungen durchgeführt (Kalibrierung, Temperaturkontrolle, homogene Feldverteilung, Modellierung der SAR-Werte etc.), um beispielsweise thermische Effekte auf das biologische System von vornherein ausschliessen zu können. Es wurden in beiden Forschungsprogrammen für alle Untersuchungen die Expositionssignale vom Typ Mobiltelefon (GSM oder DAMPS) und/oder unmodulierte Trägersignale verwendet. Ausserdem wurden Expositionssysteme eingesetzt, welche computergesteuert, ohne Einflussnahme und Kenntnis der Experimentierenden, ein- oder ausgeschaltet werden konnten, was eine blinde Durchführung und Auswertung der Experimente ermöglichte.

3.2 Perform B

Innerhalb des 5. Europäischen Rahmenprogramms wurde das Forschungsprogramm «Perform B» gefördert, um vorgängig beobachtete Einflüsse von HF-Exposition auf Zellen und Tiere in Replikationsstudien zu überprüfen. Im Zeitraum von zweieinhalb Jahren führten Forschungsgruppen in Grossbritannien, Italien, Finnland, der Schweiz und in Frankreich Versuche zu Genschädigungen in Lymphozyten, zu Enzym-Aktivitäten in Fibroblasten und zum räumlichen Vorstellungsvermögen von Nagern unter dem Einfluss von HF-Exposition durch. Viele Studien, die vorgängig den Einfluss von HF-Exposition auf Tier- und Zellsysteme untersucht hatten, zeigten Schwächen in den Versuchsanordnungen und der Dosimetrie. Aus diesem Grund setzte sich das «Perform B»-Programm zum Ziel, die einzelnen Replikationsexperimente unter sauber kontrollierten technischen Bedingungen durchzuführen. Dazu gehörten.

- > Möglichst präzise Kopie der technischen Expositionsbedingungen/Versuchsanordnungen der Primärstudie, um deren Ergebnisse auf allfällige technisch-physikalische Artefakte hin zu überprüfen.
- > Verbesserung der Expositionssysteme, um eine kontrollierte Exposition zu gewährleisten. Dazu gehörte etwa die kontinuierliche Aufzeichnung von Expositionsdaten (Feldstärke, Frequenz, Modulation etc.) und Umgebungsparametern (Temperatur, Licht, Sauerstoffgehalt, Feuchtigkeit etc.).
- > Parallele Durchführung und Auswertung der Experimente durch zwei verschiedene Laboratorien an unterschiedlichen Standorten in Europa.
- > Konsequente Blindbestimmung der Messgrössen.

Die HF-Exposition erfolgte mit unmodulierten Trägersignalen (CW) und/oder GSM-Signalen vom Typ Mobiltelefon (Schuderer et al. 2003, 2004).

3.2.1 Gentoxizität

Bei einer kontinuierlichen GSM-Exposition mit einer Frequenz von 935 MHz hatten Maes et al. 1997 eine schwache Zunahme von Schwesterchromosomen-Austauschereignissen und DNS-Strangbrüchen in menschlichen Lymphozyten beobachtet, wenn diese mit Mitomycin C (einem Zytostatikum, das die DNS-Synthese hemmt) behandelt wurden. Diese Beobachtungen deuteten auf eine gentoxische Wirkung der HF-Strahlung hin, welche in Kombination mit dem bekannten Mutagen Mitomycin C zur genetischen Veränderung von Zellen führen kann und somit ein Gesundheitsrisiko darstellen würde. Die HF-Exposition alleine führte nicht zur Schädigung der DNS in Lymphozyten, schien aber die Wirkung eines Mutagens zu verstärken. Solche kombinierten Expositionen gegenüber HF-Strahlung und chemischen Mutagenen sind in der heutigen Umwelt durchaus relevant, aber es gibt dazu bisher nur wenige Untersuchungen. Da die Maes-Gruppe (Maes et al. 2001) selbst sowie die Forschungsgruppe von Vijayalaxmi et al. (2001) diese Ergebnisse in späteren Experimenten nicht bestätigen konnten, entschied man sich im «Perform B»-Projekt, die Frage nochmals aufzugreifen und die Experimente mit einem anderen Mutagen (Röntgenstrahlen) zu wiederholen. Im Zentrum dieser Forschungsarbeit stand also nach wie vor die Klärung der Frage, ob die HF-Exposition den gentoxischen Effekt eines Mutagens in Lymphozyten potenzieren kann. Den Einsatz von Röntgenstrahlen an Stelle des in der Originalstudie verwendeten Mutagens Mitomycin C begründeten die Autoren mit der besser charakterisierten Wirkung von schwachen Röntgenstrahlen (1 Gy) auf die DNS.

Ausgangslage

Zur Ermittlung der Gentoxizität kamen verschiedene zytogenetische Standardtests (Kometentest (Comet-Assay), Mikrokerntest) an menschlichen Blutzellen zum Einsatz. Probanden entnommenes Blut wurde vor oder nach der Behandlung mit Röntgenstrahlen (1.0 Gy), welche zu Einzel- und Doppelstrangbrüchen in der DNS führen, für 24 Stunden einer HF-Exposition ausgesetzt (GSM 935 MHz oder 1800 MHz; 8 Hz-Modulation; SAR 1 W/kg oder 2 W/kg).

Methode

Bei keiner der eingesetzten HF-Expositionen menschlicher Lymphozyten konnte eine Verstärkung der durch Röntgenstrahlen induzierten gentoxischen Effekte beobachtet werden, unabhängig davon, ob die HF-Exposition vor oder nach der Röntgenbestrahlung erfolgte (Stronati et al. 2006).

Resultat

Eine direkte oder kombinierte gentoxische Wirkung der HF-Exposition wurde nicht beobachtet. Dies steht im Einklang mit der missglückten Bestätigung ihrer Befunde durch die Maes Gruppe selbst (Maes et al. 2001). Es gilt hier allerdings zu beachten, dass die Art der durch Mitomycin C und Röntgenstrahlen induzierten DNS-Schäden verschieden ist und deshalb die damit verbundene zelluläre Reaktion (DNS-Reparatur) unterschiedlich abläuft. Die biologische Interaktion zwischen HF-Exposition und Mitomycin C kann also durchaus anderer Natur sein als die Wechselwirkung der HF-Exposition mit Röntgenstrahlen. Daher kann man bei der vorgestellten Studie streng genommen nicht von einer Replikation sprechen. Ob HF-Exposition die gentoxische Wirkung des DNS modifizierenden Mitomycin C verstärken kann, bleibt also weiterhin offen.

Bewertung

3.2.2 Das ODC-Enzym und dessen Aktivität in Zellkulturen

Die Forschungsgruppe Litovitz beobachtete 1997 bei HF-Exposition (835 MHz; 50 Hz-Modulation; SAR 2.5 W/kg) eine temporäre Verdoppelung der enzymatischen Aktivität der Ornithindecaboxylase (ODC) in lysierten L929-Fibroblastenzellen der Maus. Dieser Effekt konnte nur mit einem amplitudenmodulierten Signal, nicht jedoch mit einem frequenzmodulierten Signal erzeugt werden (Penafiel et al. 1997). Ein Anstieg der ODC-Aktivität ist ein Hinweis auf eine erhöhte Zellteilungs- und Zellwachstumsrate und ist zum Beispiel in Tumorzellen zu beobachten. Die Ergebnisse der Forschungsgruppe Litovitz veranlassten deshalb das «Perform B»-Konsortium zur Durchführung von Replikationsexperimenten.

Ausgangslage

Sowohl lebende L929-Zellen (Fibroblasten) als auch Proteinextrakte lysierter (aufgeschlossener) L929-Zellen wurden zur Messung der ODC-Aktivität verwendet. Die Verwendung lebender Zellen ermöglicht eine Simulation realer physiologischer Bedingungen, während die Verwendung lysierter Zellextrakte eine präzisere Messung der Enzymaktivität erlaubt. Neben Fibroblastenzellen wurden auch menschliche Neuroblastomzellen sowie Glioblastomzellen und Astrozyten von Ratten getestet. Parallel zur Bestimmung der ODC-Aktivität wurden zellrelevante Parameter wie die Zellproliferation, Apoptose und Lipidperoxidation untersucht. Die L929-Zellen sowie auch die Nervenzellen wurden zusätzlich zu den von der Forschungsgruppe Litovitz gewählten Expositionsbedingungen noch unmodulierten Trägersignalen (CW) und GSM-Signalen verschiedener Frequenzen (teilweise mit 217 Hz-Modulation) bei SAR-Werten zwischen 0.5 und 6 W/kg ausgesetzt.

Methode

Unter den von der Gruppe Litovitz gewählten Expositionsbedingungen (Crawford-Zelle, 835 MHz; 50 Hz-Modulation; SAR 2.5 W/kg; 8h) konnte in den Replikationsversuchen keine Zunahme der ODC-Aktivität in Extrakten lysierter L929-Zellen festgestellt werden. Bei einer SAR von 6 W/kg hingegen wurde eine Abnahme der ODC-Aktivität beobachtet. Dieser Effekt konnte auf eine Temperaturerhöhung von 0.78 °C in der Zellkultur zurückgeführt werden. Unter konstanten Temperaturbedingungen konnte bei unterschiedlichen Expositionszeiten (2h/8h/24h) und SAR-Werten von 2.5 W/kg und 6 W/kg sowohl in lysierten L929-Zellextrakten als auch in lebenden L929-Zellen keine Veränderung der ODC-Aktivität festgestellt werden. Auch andere Expositionssignale, mit oder ohne 217 Hz-Modulation, führten bei keinem getesteten SAR-Wert zu einer Veränderung der ODC-Aktivität in den L929-Zellen (Hoyto et al. 2006). Die Hypothese, wonach sich die Aktivität der ODC bei L929-Zellen frequenz- oder modulationsabhängig verändern könnte, wurde somit nicht verifiziert. Auch bei den zusätzlich getesteten Parametern wie Zellproliferation, Apoptose und Lipidperoxidation konnte bei unterschiedlichen Expositionsbedingungen kein Effekt festgestellt werden. Einzig bei gleichzeitiger Zugabe von Menadione (induziert die Produktion reaktiver Sauerstoffspezies) in die Kultur konnte unter GSM 872 MHz und einer SAR von 5 W/kg ein synergistischer Einfluss auf die Zellproliferation der L929-Zellen beobachtet werden.

Resultat

Bei allen getesteten Expositionsbedingungen zeigten auch die Tumorzellen (Neuroblastomzellen und Glioblastomzellen) keine Veränderungen in Bezug auf die ODC-

Aktivität. In primären Astrozyten hingegen konnte nach HF-Exposition eine signifikante Verminderung der ODC-Aktivität festgestellt werden, während sekundäre Zelllinien keinen Effekt zeigten. Die Verminderung der ODC-Aktivität bei den primären Astrozyten wurde sowohl bei CW- als auch bei modulierten GSM-Signalen beobachtet (Hoyto et al. 2007).

Für die Replikationsversuche wurden verschiedene Zellkulturen derselben Ursprungszelllinie von L929-Zellen verwendet. Die ursprünglichen Beobachtungen an den L929-Zellen konnten nicht bestätigt werden, die HF-Exposition hat offenbar keinen Effekt auf die ODC-Aktivität der L929-Zellen. Aufgrund der in den vorgestellten Studien verwendeten Methoden (quantitative Analyse) gibt es jedenfalls keinen Grund, die Messbarkeit eines möglichen Effektes auf die ODC-Aktivität bei L929-Zellen in Frage zu stellen. Der Effekt der HF-Exposition auf die ODC-Aktivität bei primären Astrozyten, nicht jedoch bei sekundären Zelllinien lässt vermuten, dass die HF-Exposition in gewissen Zelltypen eine Veränderung der ODC-Aktivität hervorrufen kann.

Bewertung

3.2.3 Die Gedächtnisleistung von Nagern

Tierexperimente zeigen einen Einfluss von HF-Exposition auf das Lernverhalten, wenn diese zu einer Erhöhung der Körpertemperatur von 1 °C führt, was bei einer Ganzkörper-SAR von 4 W/kg der Fall ist (WHO, 1993; ICNIRP, 1998; NRPB, 2004). Da die von Mobiltelefonen und -basisstationen ausgehende HF-Strahlung zu keiner Erhöhung der Ganzkörpertemperatur führt, wurde ein Einfluss auf das Verhalten von Tieren nicht erwartet. Drei Studien mit Ratten liessen Zweifel an der Richtigkeit dieser Annahme aufkommen (Lai et al. 1989, 1994; Wang & Lai 2000). Bereits 1989 hatten Lai et al., eine Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der zentralen Cholin-Aufnahme (Neurotransmitter) und der HF-Exposition beobachtet. Lai's Folgeuntersuchungen von 1994 ergaben eine Beeinträchtigung der Gehirnleistung bei den Ratten unter gepulster HF-Belastung (2.45 GHz, SAR 0.6 W/kg, Ganzkörperbelastung während 45 Minuten/Tag). Die exponierten Tiere zeigten ein verzögertes Lernvermögen beim Auffinden der Futterquelle in einem strahlenförmigen Arm-Labyrinth. Dies deutete auf ein Defizit in der Funktion des räumlichen Arbeitsgedächtnisses der Nagetiere hin. Später untersuchten Wang & Lai (2000) den Einfluss einer gepulsten Exposition (2.45 GHz; pulsmoduliert 2µs; SAR 1.2 W/kg; 1 Stunde/Tag) auf das Verhalten von Ratten im Wasser-Labyrinth, in dem räumliche Lern- und Gedächtnisfunktionen getestet wurden. Exponierte Tiere lernten langsamer als scheinexponierte und Käfig-Kontroll-Tiere. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass die Exposition zu einem Defizit des räumlichen Gedächtnisses führt. Weitere Laboratorien (Sienkiewicz et al. 2000; Dubreuil et al. 2002, 2003; Cobb et al. 2004) versuchten, bei Exposition mit verschiedenen gepulsten HF-Signalen unterschiedlicher Frequenzen Defizite beim Gedächtnis von Nagern festzustellen, fanden jedoch keine. Diese kontroversen Resultate bewogen das «Perform B»-Konsortium zur Durchführung von Replikationsexperimenten, die den Einfluss der HF-Exposition auf Verhalten- und Gedächtnisfunktionen von Tieren vertieft klären sollten. Dazu experimentierte man mit Mäusen und Ratten unter Ganz- und Teilkörperexposition mit unterschiedlichen Expositionssignalen.

Ausgangslage

Das Verhalten von Nagern wurde in einem strahlenförmigen Arm-Labyrinth getestet. Nach der Scheinexposition beziehungsweise Exposition setzte man Ratten oder Mäuse ins Labyrinth und mass die Zeit zum Auffinden einer Futterquelle und die Irrtumsrate. Zusätzlich wurden das Angstverhalten und die Schädigung der Blut-Hirn-Schranke getestet: Zu diesem Zweck wurde den Ratten ein Psychopharmakon zur Behandlung von Angstzuständen injiziert und ihr Angstverhalten unter verschiedenem Lichteinfluss geprüft. Ein allfälliger Einfluss der HF-Exposition auf die Blut-Hirn-Schranke der Ratten wurde mit Hilfe eines Pilzgiftes überprüft, welches üblicherweise die Blut-Hirn Schranke nicht passieren kann. Die Replikation der Experimente von Lai et al. zum Verhalten von Ratten erfolgte an 36 Tieren bei identischen Expositionsbedingungen (2.45 GHz; pulsmoduliert (2 μ s Pulse, 500 pps); SAR 0.6 W/kg; 45 Minuten). Die Überprüfung der räumlichen Gedächtnisleistung der Mäuse erfolgte mit GSM-Signalen (900 MHz; 217 Hz-Modulation; SAR zwischen 0.1 und 3 W/kg; 45 Minuten; Ganzkörper- und Teilkörperexposition), während die Studien zum Angstverhalten und der Blut-Hirn-Schranke unter den ursprünglichen, von Lai et al. verwendeten Expositionsbedingungen erfolgten.

Methode

Bei den von Lai et al. verwendeten Expositionsbedingungen wurde keine Beeinträchtigung der Gedächtnisleistung der getesteten Ratten gefunden. Die Ergebnisse der Forschungsgruppe Lai et al., aus dem Jahr 1994 konnten damit nicht bestätigt werden. Auch die Exposition von Mäusen mit einem GSM-Signal ergab keine signifikanten Effekte auf ihre Gedächtnisleistung, unabhängig vom jeweiligen SAR-Wert und unabhängig davon, ob die Tiere ganz- oder teilkörperexponiert wurden. Ebenso wenig wurden das Angstverhalten und die Blut-Hirn-Schranke der Ratten beeinflusst.

Resultat

Die im «Perform B» durchgeführten Studien zeigen keine expositionsabhängigen Unterschiede im Lernverhalten der Nager. Die ursprünglichen Ergebnisse der Forschungsgruppe Lai et al. konnten nicht repliziert werden. Da die physikalischen Parameter der Exposition in einigen Experimenten vergleichbar beziehungsweise sogar identisch zu denjenigen der früheren Studien waren, kann die Diskrepanz der Daten zur Zeit nicht erklärt werden. Die applizierten HF-Expositionen zeigten zusätzlich auch keinen Einfluss auf das Angstverhalten der Nager oder auf die Blut-Hirn Schranke.

Bewertung

3.2.4 Gesamtbewertung «Perform B»

Das Forschungsprogramm «Perform B» untersuchte den Einfluss der HF-Exposition auf die Gentoxizität in Lymphozyten, auf die ODC-Aktivität in Fibroblasten und Nervenzellen sowie auf die Gedächtnisleistung von Mäusen und Ratten. Bei keiner dieser Untersuchungen konnten die ursprünglichen Beobachtungen bestätigt werden, weder in den Replikationsexperimenten noch in den darüber hinausgehenden Untersuchungen.

3.3 REFLEX

Im vier Jahre dauernden «REFLEX»-Programm ging es um die Frage, ob EMF-Exposition auf zellulärer oder molekularer Ebene Veränderungen in der Zelle hervorrufen kann. 12 Forschungsgruppen aus 7 europäischen Ländern waren am Programm beteiligt und der Abschlussbericht (256 Seiten) liegt seit Ende 2004 vor. Einige Ergebnisse wurden inzwischen auch in wissenschaftlichen Fachjournals publiziert und sind im Literaturverzeichnis des vorliegenden Berichtes aufgeführt.

Das Leitthema im «REFLEX»-Programm war standardisiertes und kontrolliertes experimentelles Vorgehen. Unter dieser Prämisse untersuchten die beteiligten Forschungsgruppen Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischen Feldern und einzelnen Zelltypen unter kontrollierten Laborbedingungen und unter Verwendung optimierter Expositionssysteme. Letztere sollten einerseits die blinde Datenerfassung ermöglichen und andererseits eine einwandfreie technische Qualitätskontrolle der Exposition gewährleisten, eine kontinuierliche Aufzeichnung von Expositionsdaten (Feldstärke, Frequenz, Modulation etc.) ermöglichen und Umgebungsparameter wie Temperatur, Licht, Sauerstoffgehalt und Feuchtigkeit kontrollieren. Bei den verwendeten Zelltypen handelte es sich um Primärkulturen, etablierte Zelllinien oder Tumorzellen, die der HF-Exposition vom Typ Mobiltelefon oder unmodulierten Trägersignalen (CW) kontinuierlich oder intermittierend ausgesetzt wurden.

Das Programm umfasste Untersuchungen mit Hoch- und Niederfrequenzstrahlung. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse im Zusammenhang mit der HF-Strahlung zusammengefasst und bewertet.

3.3.1 Gentoxizität

Die Gentoxizität eines Agens reflektiert dessen Fähigkeit, die DNS entweder direkt oder indirekt zu schädigen. Bei der direkten Schädigung ist die DNS selbst der Angriffspunkt eines Agens, während bei der indirekten Schädigung zellbiologische Prozesse so beeinflusst werden, dass es zum gehäuftem Auftreten von DNS-Schäden kommt. Beispiele für Letzteres sind die vermehrte Bildung von Sauerstoffradikalen (ROS), eine Schwächung der Radikalfänger (Stoffe, die in der Lage sind, freie Radikale «einzufangen»), oder eine Beeinträchtigung der zellulären DNS-Reparatursysteme. Direkte oder indirekte DNS-Schäden, die nicht oder fehlerhaft durch zelleigene Reparaturmechanismen korrigiert werden, können zu bleibenden genetischen Veränderungen (Mutationen) und damit zu biologischen Fehlfunktionen führen. Einzelne experimentelle Studien hatten im Vorfeld des REFLEX-Programms eine gentoxische Wirkung von HF-Strahlung ergeben, während andere solche Effekte nicht bestätigen konnten. Ziel dieses Teils von «REFLEX» war deshalb, Klarheit in dieser Frage zu schaffen.

Zur Ermittlung gentoxischer Effekte wurden verschiedene zytogenetische Standardtest angewendet (Kometentest (Comet-Assay), Mikrokerntest). Die Untersuchungen wurden an humanen Fibroblasten, HL-60 Zellen (humane Leukämiezellen), an tierischen

Ausgangslage

Methode

Granulosazellen (Ratte), sowie an embryonalen Stammzellen und neuronalen Vorläuferzellen der Maus durchgeführt. Die HF-Expositionen erfolgten mit intermittierenden oder kontinuierlichen Signalen. Es wurden sowohl unmodulierte Trägersignale (CW) als auch GSM-Signale (GSM-217 Hz; GSM-Basic; GSM-DTX; GSM-Talk) verschiedener Frequenzen (900 MHz; 1800 MHz) angewendet.

Alle innerhalb des «REFLEX»-Programms getesteten Zelltypen zeigten unter HF-Exposition eine erhöhte Häufigkeit von DNS-Strangbrüchen. Bei einzelnen Zelltypen konnte zusätzlich eine erhöhte Häufigkeit von Chromosomenaberrationen und der Bildung von Mikrokernen nachgewiesen werden. Letztere sind von besonderer Bedeutung und deren Resultate werden daher nachfolgend im Einzelnen dargestellt.

Resultat

Die Ergebnisse zweier Forschungsgruppen (Tauber und Rüdiger) gaben Anlass zu wissenschaftlichen Diskussionen, da sowohl erhöhte DNS-Strangbruchraten (im Comet-assay ermittelt), wie auch Chromosomenaberrationen und Mikrokern nach HF-Exposition gefunden wurden.

Die Arbeitsgruppe Tauber fand bei menschlichen HL-60 Zellen eine Schädigung der DNS in Form von Einzel- und Doppelstrangbrüchen, sowie eine Zunahme von Mikrokernen unter dem Einfluss der HF-Exposition. Bei einer HF-Exposition mit einer SAR von 1.3, 1.6 und 2 W/kg, nicht jedoch bei einer solchen von 1 W/kg und 3 W/kg erhöhte sich die DNS-Strangbruchrate und parallel dazu die Mikrokernfrequenz. Während die Arbeitsgruppe Tauber unterhalb von 1 W/kg keine DNS-Strangbrüche fand, beobachtete die Arbeitsgruppe Rüdiger solche in menschlichen Fibroblasten bereits bei 0.3 W/kg. Bei einem SAR-Wert von 1 W/kg stellte diese Forschungsgruppe Chromosomenaberrationen und bei 2 W/kg die Bildung von Mikrokernen nach HF-Exposition fest (Diem. et al., (2005)). Das Mass der Schädigung war bei beiden Arbeitsgruppen von der Dauer der Exposition, der Feldstärke, und der Art des HF-Signals abhängig.

Bei den Tierzellen (embryonale Stammzellen, neuronale Vorläuferzellen der Maus, und Granulosazellen von Ratten) konnten bei einer SAR von 1.5 bis 2 W/kg nach HF-Exposition ebenfalls erhöhte Raten von DNS-Strangbrüchen festgestellt werden. Diese gentoxischen Effekte wurden sowohl bei einem intermittierenden als auch bei einem kontinuierlichen HF-Signal beobachtet (Tabelle 20).

Die Experimente der Arbeitsgruppe Rüdiger (Diem et al. 2005) zeigten signifikante Einzel- und Doppelstrangbrüche in der DNS bei Fibroblasten nach 16 h und 24 h, nicht jedoch nach 4 h Exposition. Eine seither durchgeführte Replikationsstudie von Speit et al. 2005 hingegen konnte diese Ergebnisse nicht bestätigen, obwohl es zu beachten gilt, dass in dieser Arbeit nur Experimente mit CW-Signalen dokumentiert sind. Bei CW-Signalen hatte auch die Arbeitsgruppe Rüdiger die geringsten Effekte auf die DNS Einzel- und Doppelstrangbruchrate beobachtet. Der gentoxische Effekt der pulsbeziehungsweise gesprächsmodulierten Expositionssignale bedarf also weiterhin einer unabhängigen Bestätigung. Es ist weiter wichtig zu sehen, dass bisher nur die Daten zu den DNS-Strangbrüchen, nicht aber zur Bildung von Mikrokernen und den Chromosomenaberrationen den so genannten «Peer-Review»-Prozess durchlaufen haben und in wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert wurden. Angesichts der Tatsache, dass sich

Bewertung

die gegenwärtige Diskussion über mögliche gentoxische Effekte von HF-Strahlung fast ausschliesslich auf Daten aus Komet-Analysen stützt, wird dem Nachweis von bleibenden genetischen Veränderungen grosse Bedeutung zukommen. Komet-Analysen lassen nur eine Momentaufnahme des Zustands der DNS in einzelnen Zellen zu und können so zwar das Auftreten von DNS-Strangbrüchen festhalten, nicht aber, ob diese zu bleibenden genetischen Veränderungen (Mutation) und zu biologischen Fehlfunktionen führen. Eine schwache Anhäufung von DNS-Strangbrüchen alleine muss noch nicht als kritisch angesehen werden. DNS-Strangbrüche treten in Zellen relativ häufig auf und werden durch das zelleigene Reparatursystem effektiv repariert. Fällt diese Reparatur aus oder ist sie fehlerhaft, kann es allerdings zu bleibenden genetischen Veränderungen (Mutationen) kommen, wovon dann ein Teil als Mikrokerne oder Chromosomenaberrationen sichtbar werden. Im Rahmen des «REFLEX»-Programms wurde die Beziehung zwischen den gentoxischen Effekten (DNS-Strangbrüche) und den bleibenden genetischen Veränderungen (Mutation) nicht konsequent geklärt, weshalb sie nun Gegenstand von Folgestudien ist.

3.3.2 Zellwachstum und Zelldifferenzierung

Effekte auf Zellwachstum und -vermehrung sowie auf die Differenzierung spezialisierter Zellen aus Vorläuferzellen wurden im Rahmen von REFLEX untersucht, da Veränderungen in diesen Prozessen auf eine mögliche Entgleisung der Wachstumskontrolle, wie sie etwa in Tumoren vorkommt, hindeuten können.

Ausgangslage

Zur Untersuchung von Zellwachstum und Zelldifferenzierung wurden verschiedene etablierte Standardtechniken (Durchflusszytometrie, MTT-Test) verwendet. Es wurden die Zellparameter Wachstum, Vitalität, Entwicklung, Morphologie und Proliferation gemessen. Verwendet wurden humane Immunzellen, HL-60 Zellen, Neuroblastomzellen und embryonale Stammzellen der Maus, sowie neuronale Stammzellen der Ratte. Exponiert wurden sie mit unmodulierten Trägersignalen (CW) und mit GSM-Signalen (GSM-217 Hz; GSM-Basic; GSM-DTX; GSM-Talk) verschiedener Frequenzen (900 MHz; 1800 MHz) bei SAR-Werten zwischen 0.2 bis 3.0 W/kg.

Methode

Menschliche Zellen des Immunsystems (Lymphozyten und Thymozyten) sowie Tumorzellen (Lymphozyten (NB69) und HL-60 Zellen) zeigten unter dem Einfluss der HF-Exposition keine signifikanten Wachstumsveränderungen. Ebenfalls konnte kein Einfluss der HF-Exposition auf die Differenzierung von embryonalen Herzzellen der Maus gefunden werden (Nikolova et al., (2005)). Bei den neuronalen Stammzellen der Ratten hingegen schien die HF-Exposition (GSM 1800 MHz; 8 Hz-Modulation; intermittierend; 21 Stunden) die Zellmorphologie zu beeinflussen (Tabelle 20).

Resultat

Aufgrund des Fehlens signifikanter Effekte der HF-Exposition auf die in diesen Studien gemessenen Zellparameter erübrigt sich eine weitergehende Diskussion dieser Experimente. Der morphologische Effekt bei den neuronalen Stammzellen der Ratte könnte auf Grund der Ergebnisse aus der Genexpressionsanalyse (Kapitel 3.3.4) als Folge einer reduzierten Expression spezifischer Gene zustande kommen (z. B. Reduktion der Expression von FGFR1). Die biologische Bedeutung dieser Beobachtung ist gegenwärtig unklar.

Bewertung

3.3.3 Apoptose

Die Apoptose, der natürlich programmierte Zelltod, spielt eine zentrale Rolle in der Embryonalentwicklung sowie in der Gewebehomöostase bei multizellulären Organismen. Dieser Suizidprozess schützt den Organismus vor genotoxischen Substanzen oder vor Zellen, die bereits genetisch geschädigt sind, indem solche spezifisch beseitigt werden. Fehlerhafte Apoptose hingegen kommt bei vielen Erkrankungen wie AIDS, Neoplasien und degenerativen Erkrankungen vor.

Ausgangslage

Zur Ermittlung der Apoptoserate wurden unter anderem die Durchflusszytometrie, TUNEL-Assay und Mitochondrien-Funktionalitäts-Tests angewendet. Die Auszählung der Zellen und die Bestimmung der Zellmorphologie erfolgten mittels Fluoreszenzmikroskopie. Die Zelluntersuchungen wurden an humanen HL-60 Zellen, Immunzellen, Endothelzellen und neuronalen Zellen sowie an embryonalen Stammzellen der Maus durchgeführt. Die einzelnen Zellpopulationen wurden unmodulierten Trägersignalen (CW) und GSM-Signalen (GSM-217 Hz; GSM-Basic; GSM-DTX; GSM-Talk) verschiedener Frequenzen (900 MHz; 1800 MHz) bei SAR-Werten zwischen 0.7 bis 2.0 W/kg ausgesetzt.

Methode

Zellen des menschlichen Immunsystems (Monozyten und Lymphozyten) Endothelzellen, HL-60 Zellen, sowie Gehirnzellen unterschiedlichsten Ursprungs zeigten nach HF-Exposition keine veränderten Apoptoseraten. Auch indirekte Effekte, welche etwa durch Fehlregulation einzelner Apoptose-relevanter Gene und Proteine bei humanen Endothelzellen und embryonalen Stammzellen (Maus) erwartet werden könnten (siehe Kapitel 3.3.4), wurden nicht festgestellt (Capri et al. 2004; Nikolova et al. 2005) (Tabelle 20).

Resultat

In mehreren Versuchsreihen wurde kein signifikanter Einfluss auf die Apoptose festgestellt. Die aufgrund der Genexpressionsstudien formulierte Hypothese, dass HF-Exposition den apoptotischen Signalweg aktiviert, wurde in diesen Apoptosestudien nicht bestätigt. Es sollte jedoch beachtet werden, dass bei den verwendeten Standardverfahren (Zytometrie und TUNEL-assay) seltene, aber immer wieder auftretende apoptotische Ereignisse in einer Zellkultur nicht einfach zu detektieren wären.

Bewertung

3.3.4 Genexpression

Heutige Methoden zur Untersuchung der Genexpression ermöglichen eine gesamtheitliche vergleichende Analyse aller Gene eines Genoms. In den im Rahmen des «REFLEX»-Programms durchgeführten Analysen wurde der Regulation von Genen, welche das Zellwachstum und die Apoptose kontrollieren und somit in der Karzinogenese eine Rolle spielen, besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Gleichzeitig wurden ergänzend auch die nach HF-Exposition induzierten Veränderungen der Proteinzusammensetzung der Zellen untersucht.

Ausgangslage

Zur Untersuchung der Genexpression und Bildung von Proteinen wurden verschiedene molekularbiologische Standardtechniken, (Western Blot, Proteingelektrophorese) sowie modernere Methoden der Genomik und Proteomik verwendet. Die Untersuchun-

Methode

gen erfolgten an humanen Immunzellen, HL-60 Leukämiezellen, Neuroblastomzellen, Endothelzellen, sowie an embryonalen Stammzellen der Maus und neuronalen Stammzellen und Nervenzellen der Ratte. Die einzelnen Zellsysteme wurden unmodulierten Trägersignalen (CW) und GSM-Signalen (GSM-217 Hz; GSM-Basic; GSM-DTX; GSM-Talk) verschiedener Frequenzen (900 MHz; 1800 MHz) bei SAR-Werten zwischen 0.2 bis 2.5 W/kg ausgesetzt.

HF-Expositionen mit unterschiedlichen Expositionsszenarien und/oder Signaltypen führten zu zelltyp-spezifischen Deregulierungen verschiedenster Gene und Proteine (Tabelle 20). Die Analyse der genomweiten Veränderungen der Gen-Transkription (m-RNS) deutet darauf hin, dass HF-Exposition in einzelnen Zelltypen Gene aktivieren kann, die eine Rolle bei der Zellteilung, der Zellproliferation, der Zelldifferenzierung und der Apoptose spielen (Capri et al. 2004; Leszczynski et al. 2004). HL-60 Zellen reagierten auf die HF-Exposition (CW 1800 MHz; 24 Stunden) bei einer SAR von 1.3 W/kg sowohl mit positiver und negativer Regulation von Genen auf der Ebene der m-RNS sowie auf Proteinebene. Zusätzlich zur Deregulierung der Expression wurden auch Veränderungen in der Phosphorylierung (regulatorische Proteinmodifikation) gefunden. Die Untersuchungen an menschlichen Endothelzellen zeigten ebenfalls, dass die HF-Exposition die Konzentration zahlreicher, weitgehend unidentifizierter Proteine und deren Phosphorylierung ändert ((Nylund et al. (2004, 2006)); Remondini et al. (2006)). Unter diesen Proteinen war auch das Hitze-Schock-Protein hsp27 zu finden (diese Ergebnisse wurden nur von einer Forschergruppe gefunden), welches als Marker für Stressreaktionen gilt (Leszczynski et al. (2002)). Bei menschlichen Lymphozyten hingegen konnte man keine Effekte auf die Genexpression beobachten. In menschlichen Neuroblastomzellen wurde nach HF-Expositionen (GSM 1800 MHz; 2, 8, 214 Hz-Modulation; SAR 2 W/kg) eine reduzierte Expression des Rezeptors für den Fibroblastenwachstumsfaktor (FGFR1) festgestellt. Dieser Effekt trat auch bei den neuronalen Stammzellen der Ratte auf und könnte für die bereits im Kapitel 3.3.2 beschriebenen morphologischen Veränderungen verantwortlich sein. Eine Überregulation von Stressproteinen (hsp 70), welche den Zellzyklus und die Zelldifferenzierung beeinflussen, wurde nach Langzeitexposition (48 Stunden) bei einer HF-Exposition (GSM; 217 Hz-Modulation; intermittierend) in embryonalen Stammzellen der Maus mit einem genetischen Defekt in einem anti-apoptotischen Gen festgestellt. Dabei kam es ebenfalls zu einer leicht signifikanten vorübergehenden Erhöhung der Expression krebsrelevanter Proteine (c-fos, c-jun, c-myc) (Czyz et al., 2004). Bei den Experimenten mit Nervenzellen der Ratte konnte weder ein Effekt auf die Stressgene noch auf das Enzym Stickstoffmonoxidase (iNOS) beobachtet werden. Versuche mit Astrozyten der Ratte lieferten keine konsistenten Resultate (Tabelle 20).

Resultat

Die Ergebnisse der Genexpressions-Analysen zeigen, dass in verschiedenen Zelltypen Unterschiede zwischen den exponierten und nicht exponierten Zellen auftraten. Unterschiede waren auf der Ebene der m-RNS, der Proteine, sowie der Proteinmodifikationen messbar und deren Art und Ausmass war, soweit vergleichbar, vom eingesetzten Zellmodell abhängig. Bei den genomischen und proteomischen Analysen gilt es zu bedenken, dass die erhaltenen Daten aufgrund ihrer Fülle ein sehr komplexes Bild abgeben, dessen biologische Bedeutung ohne ein gründliches Verständnis der betroffenen funktionellen Wechselwirkungen schwer zu interpretieren ist. Der gegenwärtige

Bewertung

Stand des Wissens erlaubt es jedenfalls nicht, konkrete Folgen der durch HF-Exposition veränderten Genexpression zu benennen.

3.3.5 Gesamtbewertung REFLEX

Der beim «REFLEX»-Programm geforderte und auch erreichte hohe technische Qualitätsanspruch konnte viele Schwachpunkte früherer Untersuchungen in Bezug auf Expositionseinrichtungen, Dosimetriedaten und Qualitätskontrollen beheben. Die durchgeführten Versuche wurden bezüglich Expositionsbedingungen (klare Expositionsanordnung, homogene Feldverteilung, gute Dosimetriedaten, verblindete Versuchsanordnung etc.) gut dokumentiert. Auf der anderen Seite zeigt der Schlussbericht, dass ein anderer Anspruch der Programmleitung, nämlich die Experimente in verschiedenen Laboratorien unter vergleichbaren technischen und biologischen Konditionen durchzuführen, nicht erreicht wurde. Letztendlich zeigt sich, dass sich das «REFLEX»-Programm aus einer Vielzahl verschiedener Analysemethoden, biologischen Versuchsprotokollen und verwendeten Signaltypen zusammensetzt. Die Wirkungskette für gleiche Zelltypen und gleiche Expositionsbedingungen vom Auftreten von DNS-Strangbrüchen bis zu bleibenden genetischen Schädigungen wurde nicht systematisch untersucht, was eine Interpretation der Daten erschwert.

Obwohl das «REFLEX»-Projekt keine kausal-mechanistischen Informationen zur Klärung der möglichen Wechselwirkung von Zellen mit der HF-Exposition lieferte, konnte es doch einen Zusammenhang zwischen der HF-Exposition und gewissen zellulären Reaktionen aufzeigen. Klar ist, dass die Risikobeurteilung mit der Erweiterung der Forschung auf die bisher zu wenig beachteten, zellulären und subzellulären Effekte der HF-Exposition vielschichtiger wird. Es ist aber gerade dieser Forschungsansatz, der am Ende kausale Erklärungen für allfällige gesundheitsrelevante biologische Effekte der HF-Exposition liefern wird. In dieser Hinsicht, sowie in Bezug auf den konzertierten experimentellen Ansatz haben sowohl «REFLEX» wie «Perform B» wichtige Fortschritte für dieses Forschungsgebiet erreicht. Mit Sicherheit werden die Ergebnisse und Studienprotokolle für künftige Untersuchungen zu den Wechselwirkungen von HF-Exposition mit biologischen Systemen wichtige Impulse setzen.

Tab. 20 > Zusammenfassung der «REFLEX»-Ergebnisse: Effekte der HF-Exposition auf Zellen.

		Typ	Kein Effekt/ kein signifikanter Effekt	Signifikanter Effekt
Gentoxizität				
Humanzellen	Fibroblasten	p		Erhöhung der Rate der Strangbrüche ¹ und Chromosomenaberrationen
	HL-60 Zellen	t		Erhöhung der Rate der Strangbrüche und erhöhte Mikrokernenbildung
Tierzellen	Embryonale Stammzellen (Maus)	p,i		Erhöhung der Rate der Strangbrüche ²
	Granulosazellen (Ratte)	p		Erhöhung der Rate der Strangbrüche
	Neuronale Vorläuferzellen (Maus)	p		Erhöhung der Rate der Strangbrüche ²
Zellwachstum und -differenzierung				
Humanzellen	HL-60 Zellen	t	x	
	Immunzellen	p	x	
	Neuroblastomzellen	t	x	
Tierzellen	Embryonale Stammzellen (Maus)	p,i,t	x	
	Neuronale Stammzellen (Ratte)	p		Veränderte Zellmorphologie
Apoptose				
Humanzellen	Endothelzellen	p	x	
	HL-60 Zellen	t	x	
	Immunzellen	p	x	
	Astrozyten	p	x	
Tierzellen	Astrozyten (Ratte)	p,i	x	
	Embryonale Stammzellen (Maus)	p,i,t	x	
	Granulosazellen (Ratte)	p	x	
	Gliomazellen (Ratte)	t	x	
Gen- und Proteinexpression				
Humanzellen	Endothelzellen	p		Veränderung der Genexpression ^{3,4}
	HL-60 Zellen	t		Veränderung der Regulation verschiedener Gene und Proteine ⁴
	Lymphozyten	p	x	
	Neuroblastom-Zellen	t		Reduzierte Expression des Rezeptors für Fibroblastenwachstum (FGFR1) ¹
Tierzellen	Astrozyten (Ratte)	p,i	Daten nicht konsistent	
	Embryonale Stammzellen (Maus)	p,i		Deregulierung von Stressproteinen (hsp 70) ^{2, 5, II}
	Neuronale Stammzellen (Ratte)	p		Reduzierte Expression des Rezeptors für Fibroblastenwachstum (FGFR1) ¹
	Nervenzellen (Ratte)	p	Daten nicht konsistent	

Typ; p: Primärzellen; i: immortalisierte Zellen; t: Tumorzellen

¹ Diem et al. 2005

² Nikolova et al. 2005

³ Nylund et al. 2004/2006; Leszczynski et al. 2002

⁴ Remondini et al. 2006

⁵ Czyz et al. 2004

^I auf Proteinebene

^{II} auf der m-RNS Ebene

> Anhang

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 $\mu_0 = 4 \cdot \pi / 10^7$ 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	$B = \mu \cdot H$
Leistungsflussdichte	S	W/m ²	im Fernfeld: $S = E \cdot H = Z_0 \cdot H^2 = E^2/Z_0$
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	$j = \sigma \cdot E$
Elektrische Leitfähigkeit	σ	S/m	
Spezifische Absorptionsrate	SAR	W/kg	$\sigma \cdot E^2 / (2 \cdot \rho)$
Dezibel	dB	-	Leistungsverhältnis: 10 ^{dB/10} Verhältnis von Feldstärken: 10 ^{dB/20}

> Verzeichnisse

Abkürzungen/Glossar

AM

Amplitudenmodulation: Modulationsverfahren zur Aufprägung der Information auf die hochfrequente Trägerwelle

Apoptose

Natürlich programmierter Zelltod.

Assoziation

Ein in epidemiologischen Studien statistisch festgestellter Zusammenhang zwischen einer Exposition und dem Auftreten biologischer Wirkungen. Eine Assoziation gilt als statistisch signifikant, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass sie durch Zufall erklärbar ist, unter 5 % liegt. 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 zusätzlicher Kriterien beurteilt (siehe UM 162, Kapitel 6.4).

Bias

Verzerrung der Resultate durch systematische Fehler in der Anlage oder in der Erhebungsmethode von epidemiologischen Studien. Siehe auch Selektionsbias, Informationsbias, Publikationsbias.

CDMA

Code Division Multiple Access: Multiplexverfahren für die gleichzeitige Kommunikation mehrerer Telefone mit einer Basisstation; wird unter der Bezeichnung WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) in der UMTS-Technologie eingesetzt.

Chromosomenaberrationen

Abweichungen von der normalen Chromosomenzahl oder Chromosomenstruktur.

CI

Confidence Interval: siehe Vertrauensintervall

Confounder

siehe Störgröße

CW

Continuous Wave: unmoduliertes Trägersignal mit konstanter Frequenz, Phase und Amplitude.

DAMPS

Digital advanced mobile phone system. Mobilfunksystem der 2. Generation, implementiert vor allem in Nordamerika. Frequenzbereich um 850 MHz

DCS

Digital Communication System. Mobilfunknetz im Frequenzbereich 1800 MHz. Frühere Bezeichnung für GSM 1800.

DECT

Digitally Enhanced Cordless Telecommunications. Systemstandard digitaler Schnurlostelefone. Frequenz: 1850 MHz.

DNS oder DNA

Desoxyribonukleinsäure: Trägermolekül der Erbinformationen

DTX

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

Durchflusszytometrie

Damit können Aussagen über die Zellmorphologie, Zellzustand und Zellzyklus gemacht werden.

EEG

Elektroenzephalogramm

Effektschätzer

siehe Risikoschätzer

Embryonale Stammzellen

Aus befruchteten Eiern beziehungsweise Embryonen gewonnene Zellen mit der Fähigkeit, sich zu teilen und sich weiter zu differenzieren (Pluripotenz).

EMF

Elektromagnetische Felder

Endothelzellen

Zellen, die die Herzlumen, Blut- und Lymphgefäße auskleiden.

Epidemiologie

Wissenschaftszweig, der sich mit der Verteilung von Krankheiten in der Bevölkerung und deren physikalischen, chemischen, psychischen und sozialen Parametern befasst.

ERD

Event related desynchronisation: ereignisbezogene Desynchronisation

ERP

Event-related potential: ereignisbezogenes Potenzial (auch: evoziertes Potenzial)

ERS

Event related synchronisation: Ereignisbezogene Synchronisation

FDD

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

FDMA

Frequency Division Multiple Access: Bei Mobilfunksystemen der 1. und 2. Generation 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.

Fibroblasten

Zellen des Bindegewebes.

FM

Frequenzmodulation: Modulationsverfahren zur Aufprägung der Information auf die hochfrequente Trägerwelle

Frequenz

Anzahl der Schwingungen pro Sekunde

Genexpression

Synthese eines Eiweissmoleküls (Proteins) nach dem Bauplan eines Gens auf der DNS.

Gentoxizität

Zusammenfassende Bezeichnung für die Schädigung der Erbsubstanz durch chemische oder physikalische Agenzien. Solche Schädigungen können reversibel oder dauerhaft sein.

Glioblastomzellen

Neuronale Tumorzellen

Granulosazellen

Spezifische Epithelzellen, die die Höhle des reifen Eifollikels auskleiden.

GSM

Global System for Mobile Communication. Digitales Mobilfunknetz der 2. Generation, Frequenzbereiche: 900 und 1800 MHz

HF

Hochfrequenz (siehe dort)

HL-60 Zellen

Leukämiezellen (akute myeloische Leukämie) mit Stammeigenschaften

hochfrequent

Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 300 GHz

ICNIRP

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

Immunzellen

Gesamtheit der Blutzellen, die das Immunsystem aufbauen und an Abwehrreaktionen gegen Krankheitserreger und Schadstoffe beteiligt sind.

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).

(iNOS) Stickstoffmonoxidase

Enzym, welches bei der Abwehr von Entzündungen eine Rolle spielt. Es handelt sich um eine Schutzmaßnahme des Körpers, um sich gegen Viren und Bakterien sowie auch gegen Stress zu verteidigen.

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 zum Telefonieren bevorzugten Kopfseite)

Kometentest (Comet-Assay)

Elektrophoretische Nachweismethode, mit der DNS-Schädigungen in einzelnen Zellen festgestellt werden können. Die Zellen werden dazu in Agarose eingebettet, lysiert und einem elektrischen Feld ausgesetzt (Elektrophorese). Die negativ geladene DNS wandert zum Pluspol, wobei die Agarose DNS-Bruchstücke nach Grösse auftrennt. Unter dem Mikroskop erscheinen schliesslich die Zellkerne, welche zuvor mit Fluoreszenzfarbstoff markiert wurden mit einem mehr oder weniger grossen Schweif aus DNS-Bruchstücken, je nach Grad der DNS Schädigung.

kontralateral

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

Leukämiezellen

Bösartig veränderte hämatopoetische oder lymphatische Zellen, die zu Leukämie (Blutkrebs) führen. Normale Blutzellen werden verdrängt und es kommt zur Beeinträchtigung des Immunsystems und Infiltration atypischer Zellen in verschiedenen Organen.

Lymphozyten

Die spezifischen Abwehrzellen (Immunzellen) des menschlichen Körpers. Lymphozyten gehören zu den weissen Blutkörperchen (Leukozyten).

Mikrokerne

Bruchstücke von Chromosomen. Mikrokerne (micronuclei) können in Zellen durch schädliche Einwirkungen entstehen. Die Schädigung erfolgt entweder durch Fragmentierung der Chromosomen (klastogene Wirkung) oder durch eine Funktionsstörung des Spindelapparats.

Mikrokerntest

Nachweismethode zur Erkennung von Chromosomenfragmenten im Zellplasma, welche aufgrund von DNS-Schädigung oder fehlerhafter Chromosomensegregation bei der Zellteilung entstehen können. Die Mikrokerne werden unter dem Fluoreszenzmikroskop ausgezählt.

Mikrowellen

hochfrequente Strahlung mit einer Frequenz von 300 MHz bis 300 GHz

Mitochondrien-

Von einer Doppelmembran umschlossenes Organell, das bei der Zellatmung unter Sauerstoffverbrauch die Energieversorgung der Zelle gewährleistet.

Modulation

Aufprägung der zu übertragenden Information (Ton oder Bild) auf das hochfrequente Trägersignal, entweder durch Modulation der Amplitude, der Frequenz, der Phase oder Kombinationen davon

Monozyten

Gehören zu den weissen Blutkörperchen (Leukozyten) und sind die größten Zellen im Blut. Sie sind Bestandteil des Immunsystems des menschlichen Körpers.

MTT-Test

Messung der metabolischen Aktivität von Zellen.

Mutagene

Chemische oder physikalische Agenzien, die Mutationen oder Chromosomenaberrationen auslösen.

NATEL C

Zellulares Mobilfunknetz der 1. Generation, analog. Frequenzbereich um 900 MHz

Neuroblastomzellen

Das Neuroblastom ist ein maligner Tumor des autonomen Nervensystems und gehört zu den embryonalen Tumoren. Morphologisch sind Neuroblastome zusammengesetzt aus unreifen Zellelementen, den Neuroblastenzellen.

niederfrequent

Frequenzbereich bis maximal 100 kHz

NISV

Schweizerische Verordnung über den Schutz von nichtionisierender Strahlung

NMT

Nordic Mobile Telephone System. Analoges Mobiltelefonsystem, das vor allem in Skandinavien populär war. Frequenzbereiche: 450 und 900 MHz

Odds

Quotient aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis eintritt und der Wahrscheinlichkeit, dass es nicht eintritt.

OR

Odds Ratio: Mass für den Schätzwert des relativen Risikos in Fall-Kontrollstudien. Wird berechnet als Quotient aus der Odds in der Gruppe der Exponierten und der Odds in der Gruppe der Nichtexponierten.

Ornithindecaboxylase

Protein/Enzym, welches die Geschwindigkeit der Biosynthese von Polyaminen bestimmt; wird unter anderem bei der Karzinogenese aktiviert.

OS

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

Peer-Review

Verfahren zur Beurteilung der Qualität von wissenschaftlichen Arbeiten durch unabhängige Gutachter vor der Publikation mit dem Ziel der Qualitätssicherung der wissenschaftlichen Berichterstattung.

PDC

Personal Digital Cellular. Japanisches Mobiltelefonsystem, TDMA, Frequenzbereiche: 800 und 1500 MHz, Pulsfrequenz: 50 Hz

PHS

Personal Handyphone System. Digitales Mobiltelefonsystem mit geringer Reichweite in Japan, Frequenzbereich: 1900 MHz, ähnlich wie DECT

Prävalenz

Häufigkeit einer Krankheit zu einem bestimmten Zeitpunkt

Publikationsbias

Es ist anzunehmen, dass Studien, in denen ein Expositionseffekt beobachtet wurde, mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit publiziert werden als solche, die keinen Effekt nachweisen.

PWC

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

REM

Rapid eye movement: paradoxe Schlafphase mit starker Traumaktivität

Risikoschätzer

Mass für den statistischen Zusammenhang in epidemiologischen Studien, z. B.: Relatives Risiko, Odds Ratio.

ROS

Reaktive Sauerstoffspezies (Radical Oxygen Species). Diese entstehen bei oxidativem Stress und sind eine schädliche Form des Sauerstoffs. Sie spielen eine pathophysiologische Rolle. ROS entsteht im Organismus bei der Zellatmung in den Mitochondrien und bei Entzündungszellen.

RR

Rate Ratio oder Relative Risk: Verhältnis der Ereignisrate in einem bestimmten Kollektiv im Vergleich zu einem Referenzkollektiv (als relatives Risiko interpretierbar)

SAR

Spezifische Absorptionsrate: Mass für die Absorption von hochfrequenter Strahlung 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)

Schwesterchromosomenaustauschereignis

Spezielle Variante einer Chromosomenmutation, zum Teil als Folge einer missglückten DNS-Reparatur. Schwesterchromatidaustausch kommt zustande, wenn die beiden Hälften eines Chromosoms (die Schwesterchromatiden) so geschädigt werden, dass die DNS-Stränge aufbrechen und auf dem jeweils falschen «Arm» des Chromosoms wieder in den Strang eingefügt werden.

Selektionsbias

Ein Selektionsbias ist insbesondere in Fall-Kontrollstudien relevant, wenn die Auswahl von Patienten und Kontrollpersonen mit einem systematischen Unterschied in Bezug auf die Exposition erfolgt ist. Beispiel: Für eine Studie zum Zusammenhang zwischen Mobiltelefongebrauch und Hirntumorrisiko werden die Patienten aus Spitalakten rekrutiert, die Kontrollpersonen aus dem Telefonbuch. Auf diese Weise können Personen ohne Festnetzanschluss (z. B. reine Mobiltelefonbenutzer) nicht als Kontrollpersonen ausgewählt werden, jedoch durchaus als Patienten. In diesem Fall wäre zu erwarten, dass sich in der Gruppe der Patienten tendenziell mehr Mobiltelefonbenutzer befinden als in der Kontrollgruppe. Dies kann eine Assoziation vortäuschen, die real nicht besteht (Fehler der 2. Art).

Signifikanz

Statistisches Mass für die Irrtumswahrscheinlichkeit, ausgedrückt als p-Wert.

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

SP

Slow brain potential

Störgrösse

engl: confounder. Ein Faktor, der sowohl mit der Exposition als auch mit dem untersuchten Gesundheitseffekt korreliert ist. Zum Beispiel beobachtet man eine statistische Assoziation zwischen Alkoholkonsum und dem Auftreten von Lungenkrebs. Dieser Zusammenhang ist jedoch darauf zurückzuführen, dass häufiges Rauchen – der kausale Faktor für Lungenkrebs – meistens gleichzeitig mit einem höheren Alkoholkonsum einhergeht. Wird in der Analyse für die Störgrösse Rauchen kontrolliert, verschwindet die Assoziation zwischen Alkoholkonsum und Lungenkrebs.

TDMA

Time Division Multiple Access: Im GSM- und DAMPS-System verwendete Technik, die es mehreren Nutzern erlaubt, gleichzeitig auf der gleichen Frequenz mit einer Basisstation zu kommunizieren.

Thymozyten

Vorläuferzellen im Thymus, welche zu T-Lymphozyten differenzieren.

TUNEL-Assay

Bestimmung der Zunahme an apoptotischen Zellen. Wenn eine Zelle apoptotisch wird, kommt es zur Degradierung der DNS, wodurch Fragmente mit freien 3'-hydroxyl-Enden entstehen. Diese können mit einem Enzym markiert und nachgewiesen werden.

UMTS

Universal Mobile Telecommunications System: 3. Mobilfunkgeneration

Uplink

Kommunikation vom Mobiltelefon zur Basisstation

Vertrauensintervall (auch: Konfidenzintervall, confidence interval)

Das Vertrauensintervall ist ein Mass für die Genauigkeit der statistischen Schätzung. Es gibt den Bereich an, in dem der gesuchte Wert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt. Wenn nicht anders deklariert, wird das 95 %-Vertrauensintervall angegeben.

WCDMA

Wideband Code Division Multiple Access. Siehe CDMA.

Western Blot

Nachweisverfahren für Proteine. Die Proteine werden auf eine Trägermembran übertragen, wo sie anschliessend über unterschiedliche Reaktionen nachgewiesen werden können.

WHO

World Health Organisation: Weltgesundheitsorganisation

WLAN

Wireless Local Area Network: drahtloses lokales Funknetz

Zelldifferenzierung

Strukturelle sowie funktionelle Spezialisierung von Zellen.

Zellwachstum

Veränderung der Grösse einer Zelle

Tabellen

Tab. 1 > Zusammenfassung der Evidenz für gesundheitliche Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung im Niedrigdosisbereich (Exposition von Menschen).	11
Tab. 2 > Résumé du degré de preuve des effets sanitaires engendrés par le rayonnement à haute fréquence de faible intensité (exposition d'humains).	21
Tab. 3 > Ricapitolazione dell'evidenza delle ripercussioni sulla salute associate alle radiazioni ad alta frequenza nell'intervallo delle dosi deboli (esposizione di persone).	29
Tab. 4 > Summary of the evidence for high frequency radiation effects on health at low dose levels (exposure of human beings).	38
Tab. 5 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf das Hormonsystem.	54
Tab. 6 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf Parameter der Gehirnphysiologie.	64
Tab. 7 > Übersicht über Studien zu Wirkungen von Hochfrequenzstrahlung auf kognitive Funktionen.	76
Tab. 8 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf Gehör und Gleichgewichtsorgan.	83
Tab. 9 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf Herz-/Kreislauffunktionen.	91
Tab. 10 > Übersicht über experimentelle Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf unspezifische Symptome.	97
Tab. 11 > Übersicht über Bevölkerungsstudien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf unspezifische Symptome.	101
Tab. 12 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf den Schlaf.	109
Tab. 13 > Übersicht über Studien zum Einfluss von Hochfrequenzstrahlung auf in vivo exponierte Blutzellen.	111

Tab. 14 > Übersicht über Studien zu Tumoren des blutbildenden und lymphatischen Systems.	115
Tab. 15 > Übersicht über Studien zu Tumoren des Zentralnervensystems.	125
Tab. 16 > Übersicht über Studien zu Augentumoren.	129
Tab. 17 > Übersicht über Studien zu weiteren Tumorarten (Hoden, Haut, Speicheldrüsen, Gesichtsnerv (Fazialis)).	130
Tab. 18 > Übersicht über Studien zu Krebs allgemein und Zusammenfassung mehrerer Tumorarten.	133
Tab. 19 > Übersicht über Studien zu Fertilität und Auswirkungen auf die Nachkommen.	136
Tab. 20 > Zusammenfassung der «REFLEX»-Ergebnisse: Effekte der HF-Exposition auf Zellen.	149

Literatur zu Kapitel 2

Aalto S., Haarala C., Bruck A., Sipila H., Hamalainen H., Rinne J.O. 2006: Mobile phone affects cerebral blood flow in humans. *J Cereb Blood Flow Metab*: 26 (7), 885–890.

Abdel-Rassoul G., El-Fateh O.A., Salem M.A., Michael A., Farahat F., El-Batanouny M., Salem E. 2006: Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology*, doi:10.1016/j.neuro.2006.07.012.

Abelin T., Altpeter E., Rösli M. 2005: Sleep Disturbances in the Vicinity of the Short-Wave Broadcast Transmitter Schwarzenburg. *Somnologie*: 9, 203–209.

Adair E.R., Blick D.W., Allen S.J., Mylacraine K.S., Ziriak J.M., Scholl D.M. 2005: Thermophysiological responses of human volunteers to whole body RF exposure at 220 MHz. *Bioelectromagnetics*: 26 (6), 448–461.

Ahlbom A., Green A., Kheifets L., Savitz D., Swerdlow A. 2004: Epidemiology of health effects of radiofrequency exposure. *Environ Health Perspect*: 112 (17), 1741–1754

Ali Kahn A., O'Brien D.F., Kelly P., Phillips J.P., Rawluk D., Bolger C., Pidgeon C.N. 2003: The anatomical distribution of cerebral gliomas in mobile phone users. *Ir Med J*: 96 (8), 240–242.

Al-Khlaiwi T. Meo S.A. 2004: Association of mobile phone radiation with fatigue, headache, dizziness, tension and sleep disturbance in Saudi population. *Saudi Med J*: 25 (6), 732–736.

- 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., Abelin T. 1995: Study on health effects of the shortwave transmitter station of Schwarzenburg, Berne, Switzerland (Major Report). Federal Office of Energy, Bern.
- Altpeter E.S., Rössli M., Battaglia M., Pfluger D., Minder C.E., Abelin T. 2006: Effect of short-wave (6–22 MHz) magnetic fields on sleep quality and melatonin cycle in humans: the Schwarzenburg shut-down study. *Bioelectromagnetics*: 27 (2), 142–150.
- Arai N., Enomoto H., Okabe S., Yuasa K., Kamimura Y., Ugawa Y. 2003: Thirty minutes mobile phone use has no short-term adverse effects on central auditory pathways. *Clin Neurophysiol*: 114 (8), 1390–1394.
- Auvinen A., Hietanen M., Luukkonen R., Koskela R.S. 2002: Brain tumors and salivary gland cancers among cellular telephone users. *Epidemiology*: 13 (3), 356–359.
- BAG 2007: Risikopotenzial von drahtlosen Netzwerken. Bericht in Erfüllung des Postulates 04.3594 Allemann vom 8. Oktober 2004. Eidgenössisches Departement des Inneren, Bundesamt für Gesundheit, Januar 2007. www.bag.admin.ch/wlan-bericht, aufgerufen am 25.04.07
- Bak M., Sliwiska-Kowalska M., Zmyslony M., Dudarewicz A. 2003: No effects of acute exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on brainstem auditory potentials in young volunteers. *Int J Occup Med Environ Health*: 16 (3), 201–208.
- Balik H.H., Turgut-Balik D., Balikli K., Cem Ozcan I. 2005: Some ocular symptoms and sensations experienced by long term users of mobile phones. *Pathol Biol*: 53, 88–91
- Balikli K., Cem Ozcan I., Turgut-Balik D., Balik H.H. 2005: A survey study on some neurological symptoms and sensations experienced by long term users of mobile phones. *Pathol Biol*: 53 (1), 30–34
- Berg G., Spallek J., Schüz J., Schlehofer B., Böhler E., Schlaefer K., Hettinger I., Kunna-Grass K., Wahrendorf J., Blettner M. 2006: Occupational Exposure to Radio Frequency/Microwave Radiation and the Risk of Brain Tumors: Interphone Study Group, Germany. *Am J Epidemiol*: 164 (6): 538–548.
- Bergamaschi A., Magrini A., Ales G., Coppetta L., Somma G. 2004: Are thyroid dysfunctions related to stress or microwave exposure (900 MHz)? *Int J Immunopathol Pharmacol*: 17 (2 Suppl): 31–36.
- Besset A., Espa F., Dauvilliers Y., Billiard M., de Seze R. 2005: No effect on cognitive function from daily mobile phone use. *Bioelectromagnetics*: 26 (2), 102–108.
- Borbély A. A., Huber R., Graf T., Fuchs B., Gallmann E., Achermann P. 1999: Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neuroscience Letters*: 275 (3), 207–210.
- Braune S., Wrocklage C., Raczek J., Gailus T., Lucking C. H. 1998: Resting blood pressure increase during exposure to a radio-frequency electromagnetic field. *Lancet*: 351 (9119), 1857–1858.
- Braune S., Riedel A., Schulte-Monting J., Raczek J. 2002: Influence of a radiofrequency electromagnetic field on cardiovascular and hormonal parameters of the autonomic nervous system in healthy individuals. *Radiation Research*: 158 (3), 352–356.
- Celik O., Hascalik S. 2004: Effect of electromagnetic field emitted by cellular phones on fetal heart rate patterns. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*: 112 (1), 55–56.
- Christensen H., Schüz J., Kosteljanetz M., Poulsen HS, Thomsen J., Johansen C. 2004: Cellular telephone use and risk of acoustic neuroma. *Am J Epidemiol*: 159 (3):277–283.
- Christensen H., Schüz J., Kosteljanetz M., Poulsen H.S., Boice J.D. Jr., McLaughlin J.K., Johansen C. 2005: Cellular telephones and risk for brain tumors: a population-based, incident case-control study. *Neurology*: 64 (7), 1189–1195.
- Curcio G., Ferrara M., De Gennaro L., Cristiani R., D'Inzeo G., Bertini M. 2004: Time-course of electromagnetic field effects on human performance and tympanic temperature. *Neuroreport*: 15 (1), 161–164.
- Curcio G., Ferrara M., Moroni F., D'Inzeo G., Bertini M., De Gennaro L. 2005: Is the brain influenced by a phone call? An EEG study of resting wakefulness. *Neuroscience Research*: 53 (3), 265–270.
- Davoudi M., Brossner C., Kuber W. 2002: Der Einfluss elektromagnetischer Wellen auf die Spermienmotilität. *J Urol Urogynaekol*: 9 (3), 18–22
- D'Costa H., Trueman G., Tang L., Abdel-rahman U., Abdel-rahman W., Ong K., Cosic I. 2003: Human brain wave activity during exposure to radiofrequency field emissions from mobile phones. *Australas Phys Eng Sci Med*: 26 (4), 162–167.
- De Roos A.J., Teschke K., Savitz D.A., Poole C., Grufferman S., Pollock B.H., Olshan A.F. 2001: Parental occupational exposures to electromagnetic fields and radiation and the incidence of neuroblastoma in offspring. *Epidemiology*: 12 (5), 508–517.
- Eger H., Hagen K.U., Lucas B., Vogel P., Voit H. 2004: Einfluss der räumlichen Nähe von Mobilfunkseanlagen auf die Krebsinzidenz. *Umwelt – Medizin – Gesellschaft*: 17 (4), 326–332.

- Eliyahu I., Luria R., Hareuveny R., Margalioth M., Meiran N., Shani G. 2006: Effects of radiofrequency radiation emitted by cellular telephones on the cognitive functions of humans. *Bioelectromagnetics*: 27 (2), 119–126.
- Eltiti S., Wallace D., Zougkou K., Russo R., Joseph S., Rasor P., Fox E. 2006: Development and evaluation of the electromagnetic hypersensitivity questionnaire. *Bioelectromagnetics*, doi: 10.1002/bm.20279.
- Erogul O., Oztas E., Yildirim I., Kir T., Aydur E., Komesli G., Irkilata H.C., Irmak M.K., Peker A.F. 2006: Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: an in vitro study. *Arch Med Res.*: 37 (7), 840–843.
- Esen F., Esen H. 2006: Effect of electromagnetic fields emitted by cellular phones on the latency of evoked electrodermal activity. *Int J Neurosci*: 116 (3), 321–9.
- Eulitz C., Ullsperger P., Freude G., Elbert T. 1998: Mobile phones modulate response patterns of human brain activity. *Neuroreport*: 9, 3229–3232.
- Fejes I., Zavaczki Z., Szollosi J., Koloszar S., Daru J., Kovacs L., Pal A. 2005: Is there a relationship between cell phone use and semen quality? *Arch Androl*: 51 (5), 385–393.
- Flodin U., Seneby A., Tegenfeldt C. 2000: Provocation of electric hypersensitivity under everyday conditions. *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*: 26 (2), 93–98.
- Frick U., Mayer M., Hauser S., Binder H., Rosner R., Eichhammer P. 2006: Entwicklung eines deutschsprachigen Messinstrumentes für «Elektrosmog-Beschwerden». *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*: 11 (2), 103–113.
- Gandhi G. A. 2005: Genetic damage in mobile phone users: some preliminary findings. *Indian Journal of Human Genetics*: 11 (2), 99–104.
- Garcia Callejo F.J., Garcia Callejo F., Pena Santamaria J., Alonso Castaneira I., Sebastian Gil E., Marco Algarra J. 2005: Nivel auditivo y uso intensivo de telefonos moviles. [Hearing level and intensive use of mobile phones]. *Acta Otorrinolaringol Esp*: 56 (5), 187–191.
- Gavin A.T., Catney D. 2006: Addressing a community's cancer cluster concerns. *Ulster Med J*: 75 (3), 195–199.
- Haarala C., Aalto S., Hautzel H., Julkunen L., Rinne J.O., Laine M., Krause B., Hamalainen H. 2003a: Effects of a 902 MHz mobile phone on cerebral blood flow in humans: a PET study. *Neuroreport*: 14 (16), 2019–2023.
- Haarala C., Bjornberg L., Ek M., Laine M., Revonsuo A., Koivisto M., Hamalainen H. 2003b: Effect of a 902 MHz electromagnetic field emitted by mobile phones on human cognitive function: A replication study. *Bioelectromagnetics*: 24 (4), 283–288.
- Haarala C., Ek M., Bjornberg L., Laine M., Revonsuo A., Koivisto M., Hamalainen H. 2004: 902 MHz mobile phone does not affect short term memory in humans. *Bioelectromagnetics*: 25 (6), 452–456.
- Haarala C., Bergman M., Laine M., Revonsuo A., Koivisto M., Hamalainen H. 2005: Electromagnetic field emitted by 902 MHz mobile phones shows no effects on children's cognitive function. *Bioelectromagnetics*: 7, S144–150.
- Hallberg O., Johansson O. 2004: Malignant melanoma of the skin – not a sunshine story!. *Med Sci Monit*: 10 (7), CR336–340.
- Hamblin D.L., Wood A.W., Croft R.J., Stough C. 2004: Examining the effects of electromagnetic fields emitted by GSM mobile phones on human event-related potentials and performance during an auditory task. *Clin Neurophysiol*: 115(1), 171–178.
- Hamblin D.L., Croft R.J., Wood A.W., Stough C., Spong J. 2006: The sensitivity of human event-related potentials and reaction time to mobile phone emitted electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*: 27 (4), 265–273.
- Hardell L., Mild K.H., Carlberg M. 2003: Further aspects on cellular and cordless telephones and brain tumours. *Int J Oncol*: 22 (2), 399–407.
- Hardell L., Hallquist A., Hansson Mild K., Carlberg M., Gertzen H., Schildt E.B., Dahlqvist A. 2004: No association between the use of cellular or cordless telephones and salivary gland tumours. *Occup Environ Med*: 61 (8), 675–679.
- Hardell L., Eriksson M., Carlberg M., Sundstrom C., Mild K.H. 2005a: Use of cellular or cordless telephones and the risk for non-Hodgkin's lymphoma. *Int Arch Occup Environ Health*: 78 (8), 625–32.
- Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. 2005b: Use of cellular telephones and brain tumour risk in urban and rural areas. *Occup Environ Med*: 62 (6), 390–394.
- Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. 2005c: Case-Control Study on Cellular and Cordless Telephones and the Risk for Acoustic Neuroma or Meningioma in Patients Diagnosed 2000–2003. *Neuroepidemiology*: 25 (3), 120–128.
- Hardell L., Carlberg M., Mild K.H. 2006a: Case-control study of the association between the use of cellular and cordless telephones and malignant brain tumors diagnosed during 2000–2003. *Environmental Research*: 100 (2), 232–241.

- Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. 2006b: Pooled analysis of two case-control studies on the use of cellular and cordless telephones and the risk of benign brain tumours diagnosed during 1997–2003. *Int J Oncol*: 28 (2), 509–518.
- Hardell L., Carlberg M., Hansson Mild K. 2006c: Pooled analysis of two case-control studies on use of cellular and cordless telephones and the risk for malignant brain tumours diagnosed in 1997–2003. *Int Arch Occup Environ Health*: 79 (8), 630–639.
- Hepworth S.J., Schoemaker M.J., Muir K.R., Swerdlow A.J., van Tongeren M.J.A., McKinney P.A. 2006: Mobile phone use and risk of glioma in adults: case-control study. *British Medical Journal*: 332 (7546), 883–887.
- Herr C.E.W., zur Nieden A., Lindenstruth M., Stilianakis N., Seitz H., Eikmann T.F. 2005: Relating Use of Mobile Phones to Reported Sleep Quality. *Somnologie*: 9 (4), 199–202.
- Hietanen M., Hamalainen A.M., Husman T. 2002: Hypersensitivity symptoms associated with exposure to cellular telephones: No causal link. *Bioelectromagnetics*: 23 (4), 264–270.
- Hinrichs H., Heinze H.-J. 2004: Effects of GSM electromagnetic field on the MEG during an encoding-retrieval task. *NeuroReport*: 15 (7): 1191–1194.
- Hinrichs H., Heinze H.-J., Rotte M. 2005: Human Sleep under the Influence of a GSM 1800 Electromagnetic Far Field. *Somnologie*: 9 (4), 185–191.
- Hinrikus H., Parts M., Lass J., Tuulik V. 2004: Changes in human EEG caused by low level modulated microwave stimulation. *Bioelectromagnetics*: 25 (6), 431–440.
- Hocking B., Gordon I. 2003: Decreased survival for childhood leukemia in proximity to television towers. *Arch Environ Health*: 58 (9), 560–564.
- Huber R., Graf T., Cote K.A., Wittmann L., Gallmann E., Matter D., Schuderer J., Kuster N., Borbély A.A., Achermann P. 2000: Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG. *Neuroreport*: 11 (15), 3321–3325.
- Huber R., Treyer V., Borbély A.A., Schuderer J., Gottselig J.M., Landolt H.P., Werth E., Berthold T., Kuster N., Buck A., 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 (4), 289–295.
- Huber R., Schuderer J., Graf T., Jutz K., Borbély A.A., Kuster N., Achermann P. 2003: Radio frequency electromagnetic field exposure in humans: Estimation of SAR distribution in the brain, effects on sleep and heart rate. *Bioelectromagnetics*: 24 (4), 262–276.
- Huber R., Treyer V., Schuderer J., Berthold T., Buck A., Kuster N., Landolt H.P., Achermann P. 2005: Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow. *Eur J Neurosci*: 21 (4), 1000–1006.
- Huss A., Küchenhoff J., Bircher A., Niederer M., Tremp J., Waeber R., Braun-Fahrlander C. 2005: Elektromagnetische Felder und Gesundheitsbelastungen – Interdisziplinäre Fallabklärungen im Rahmen eines umweltmedizinischen Beratungsprojektes. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*: 10 (1), 21–28.
- Huss A., Rössli M. 2006: Consultations in primary care for symptoms attributed to electromagnetic fields – a survey among general practitioners. *BMC Public Health*: 6, doi: 10.1186/1471-2458-6-267.
- Hutter H.P., Moshammer H., Wallner P., Kundi M. 2006: Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations. *Occup Environ Med*: 63 (5), 307–313.
- Inskip P.D., Devesa S.S., Fraumeni J.F. Jr. 2003: Trends in the incidence of ocular melanoma in the United States, 1974–1998. *Cancer Causes Control*: 14 (3), 251–257.
- Janssen T., Boege P., von Mikusch-Buchberg J., Raczek J. 2005: Investigation of potential effects of cellular phones on human auditory function by means of distortion product otoacoustic emissions. *J Acoust Soc Am*: 117 (3 Pt 1), 1241–1247.
- Jarupat S., Kawabata A., Tokura H., Borkiewicz A. 2003: Effects of the 1900 MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on nocturnal melatonin secretion. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci.*: 22 (1), 61–63.
- Johansen C., Boice J.D., McLaughlin J.K., Christensen H.C., Olsen J.H. 2002: Mobile phones and malignant melanoma of the eye. *British Journal of Cancer*: 86 (3), 348–349.
- Kantz J., Müller J., Haderer K.P., Landstorfer F.M., Lang F. 2005: Insensitivity of cardiovascular function to low power cm-/mm-microwaves. *Int J Environ Health Res*: 15 (3), 207–215.
- Kellényi L., Thuroczy Gy., Faludy B., Lenard L. 1999: Effects of mobile GSM radiotelephone exposure on the auditory brainstem response (ABR). *Neurobiology*: 7, 79–81.
- Kerekhanjanarong V., Supiyaphun P., Naratrico J., Laungpitackchumpon P. 2005: The effect of mobile phone to audiological system. *J Med Assoc Thai*: 88 (Suppl 4), S231–234.
- Keetley V., Wood A.W., Spong J., Stough C. 2006: Neuropsychological sequelae of digital mobile phone exposure in humans. *Neuropsychologia*: 44 (10), 1843–1848.

- Kheifets L., Shimkhada R. 2005: Childhood leukemia and EMF: Review of the epidemiologic evidence. *Bioelectromagnetics*: 26 (S7), S51-S59.
- Khiat A., Boulanger Y., Breton G. 2006: Monitoring the effects of mobile phone use on the brain by proton magnetic resonance spectroscopy. *Int J Radiat Biol.*: 82 (9), 681–685.
- Koivisto M., Revonsuo A., Krause C., Haarala C., Sillanmaki L., Laine M., Hamalainen H. 2000b: Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. *Neuroreport*: 11 (2), 413–415.
- Krause C.M., Sillanmaki L., Koivisto M., Haggqvist A., Saarela C., Revonsuo A., Laine M., Hamalainen H. 2000: Effects of electromagnetic fields emitted by cellular phones on the EEG during a memory task. *NeuroReport*: 11 (4), 761–764.
- Krause C.M., Haarala C., Sillanmaki L., Koivisto M., Alanko K., Revonsuo A., Laine M., Hamalainen H. 2004: Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during an auditory memory task: a double blind replication study. *Bioelectromagnetics*: 25 (1), 33–40.
- Krause C.M., Bjornberg C.H., Pesonen M., Hulten A., Liesivuori T., Koivisto M., Revonsuo A., Laine M., Hamalainen H. 2006: Mobile phone effects on children's event-related oscillatory EEG during an auditory memory task. *Int J Radiat Biol*: 82 (6), 443–450.
- Lahkola A., Tokola K., Auvinen A. 2006: Meta-analysis of mobile phone use and intracranial tumors. *Scand J Work Environ Health*: 32 (3), 171–177.
- Lass J., Tuulik V., Ferenets R., Riisalo R., Hinrikus H. 2002: Effects of 7 Hz-modulated 450 MHz electromagnetic radiation on human performance in visual memory tasks. *Int J Radiat Biol*: 78 (10), 937–944.
- Lee T.M., Lam P.K., Yee L.T., Chan C.C. 2003: The effect of the duration of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention. *Neuroreport*: 14 (10), 1361–1364.
- Leitgeb N., Schröttner J., Cech R., Kerbl R. 2004: Investigation of sleep disorders in the vicinity of high frequency transmitters. *Biomed Tech (Berl)*: 49 (7–8), 186–193.
- Leitgeb N., Schröttner J., Böhm M. 2005: Does «electromagnetic pollution» cause illness? An inquiry among Austrian general practitioners. *Wien Med Wochenschr*: 155 (9–10), 237–241.
- Linnet M.S., Taggart T., Severson R.K., Cerhan J.R., Cozen W., Hartge P., Colt J. 2006: Cellular telephones and non-Hodgkin lymphoma. *Int J Cancer*: 119 (10), 2382–2388.
- Lönn S., Klæboe L., Hall P., Mathiesen T., Auvinen A., Christensen H.C., Johansen C., Salminen T., Tynes T., Feychting M. 2004a: Incidence trends of adult primary intracerebral tumors in four Nordic countries. *Int J Cancer*: 108 (3), 450–455.
- Lönn S., Ahlbom A., Hall P., Feychting M. 2004b: Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma. *Epidemiology*: 15 (6), 653–659.
- Lönn S., Ahlbom A., Hall P., Feychting M. 2005: Long-term mobile phone use and brain tumor risk. *Am J Epidemiol*: 161 (6), 526–535.
- Lönn S., Ahlbom A., Christensen H.C., Johansen C., Schüz J., Edstrom S., Henriksson G., Lundgren J., Wennerberg J., Feychting M. 2006: Mobile Phone Use and Risk of Parotid Gland Tumor. *Am J Epidemiol*: 164 (7), 637–643.
- Loughran S.P., Wood A.W., Barton J.M., Croft R.J., Thompson B., Stough C. 2005: The effect of electromagnetic fields emitted by mobile phones on human sleep. *Neuroreport*: 16 (17), 1973–1976.
- Maby E., Le Bouquin Jeanes R., Liegeois-Chauvel C., Gourevitch B., Faucon G. 2004: Analysis of auditory evoked potential parameters in the presence of radiofrequency fields using a support vector machines method. *Med Biol Eng Comput*: 42 (4), 562–568.
- Maby E., Le Bouquin Jeanes R., Faucon G., Liegeois-Chauvel C., De Seze R. 2005: Effects of GSM signals on auditory evoked responses. *Bioelectromagnetics*: 26 (5), 341–350.
- Maby E., Le Bouquin Jeanes R., Faucon G. 2006: Scalp localization of human auditory cortical activity modified by GSM electromagnetic fields. *Int J Radiat Biol*: 82 (7), 465–472.
- Maes A., Van Gorp U., Verschaeve L. 2006: Cytogenetic investigation of subjects professionally exposed to radiofrequency radiation. *Mutagenesis*: 21 (2), 139–142.
- Maier R. 2001: Do pulsed electromagnetic fields impair CNS activity? [Besteht eine Beeinträchtigung der ZNS-Aktivität durch gepulste elektromagnetische Felder?] *Biomedizinische Technik*: 46 (1–2), 18–23.
- Maier R., Greter S.E., Maier N. 2004: Effects of pulsed electromagnetic fields on cognitive processes – a pilot study on pulsed field interference with cognitive regeneration. *Acta Neurol Scand*: 110 (1), 46–52.
- Mann K., Connemann B., Röschke J. 2005: Cardiac Autonomic Activity during Sleep under the Influence of Radiofrequency Electromagnetic Fields. [Autonome Herzaktivität im Schlaf unter dem Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder]. *Somnologie*: 9 (4): 180–184.
- Meo S.A., Al-Drees A.M. 2005: Mobile phone related-hazards and subjective hearing and vision symptoms in the Saudi population. *Int J Occup Med Environ Health*: 18 (1), 53–7.

- Meyer M., Gärtig-Daus A., Radespiel-Tröger M. 2006: Mobilfunkbasisstationen und Krebshäufigkeit in Bayern. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*: 11 (2), 89–97.
- Monfrecola G., Moffa G., Procaccini E.M. 2003: Non-ionizing electromagnetic radiations, emitted by a cellular phone, modify cutaneous blood flow. *Dermatology*: 207 (1), 10–14.
- Monnery P.M., Srouji E.I., Bartlett J. 2004: Is cochlear outer hair cell function affected by mobile telephone radiation?. *Clin Otolaryngol Allied Sci*: 29 (6), 747–749.
- Mora R., Crippa B., Mora F., Dellepiane M. 2006: A study of the effects of cellular telephone microwave radiation on the auditory system in healthy men. *Ear Nose Throat J*: 85 (3), 160–163.
- Mueller C. H., Krueger H., Schierz C. 2002: Project NEMESIS: Perception of a 50 Hz electric and magnetic field at low intensities (laboratory experiment). *Bioelectromagnetics*: 23 (1), 26–36.
- Müller J., Hadelar K.P., Muller V., Waldmann J., Landstorfer F.M., Wisniewski R., Kantz J., Lang F. 2004: Influence of low power cm-/mm-microwaves on cardiovascular function. *Int J Environ Health Res*: 14 (5), 331–341.
- Muscat J.E., Hinsvark M., Malkin M. 2006: Mobile Telephones and Rates of Brain Cancer. *Neuroepidemiology*: 27 (1), 55–56.
- Nam K.C., Kim S.W., Kim S.C., Kim D.W. 2006: Effects of RF exposure of teenagers and adults by CDMA cellular phones. *Bioelectromagnetics*: 27 (7), 509–514.
- Navarro E., Segura J., Portolés M., Gómez-Perretta de Mateo G. 2003: The Microwave Syndrome: A Preliminary Study in Spain. *Electromagnetic Biology and Medicine*: 22 (2), 161–169.
- Oftedal G., Wilen J., Sandstrom M., Mild K. H. 2000: Symptoms experienced in connection with mobile phone use. *Occup Med Lond*: 50 (4), 237–245.
- Oktay M.F., Dasdag S., Akdere M., Cureoglu S., Cebe M., Yazicioglu M., Topcu I., Meric F. 2004: Occupational safety: effects of workplace radiofrequencies on hearing function. *Arch Med Res*: 35 (6), 517–521.
- Oktay M.F., Dasdag S. 2006: Effects of intensive and moderate cellular phone use on hearing function. *Electromagn Biol Med*: 25 (1), 13–21.
- Oysu C., Topak M., Celik O., Yilmaz H.B., Sahin A.A. 2005: Effects of the acute exposure to the electromagnetic field of mobile phones on human auditory brainstem responses. *Eur Arch Otorhinolaryngol*: 262 (10), 839–843.
- Ozturan O., Erdem T., Miman M.C., Kalcioğlu M.T., Oncel S. 2002: Effects of the electromagnetic field of mobile telephones on hearing. *Acta Otolaryngol*: 122 (3), 289–293.
- Papageorgiou C.C., Nanou E.D., Tsiafakis V.G., Capsalis C.N., Rabavilas A.D. 2004: Gender related differences on the EEG during a simulated mobile phone signal. *NeuroReport*: 15 (16), 2557–2560.
- Papageorgiou C.C., Nanou E.D., Tsiafakis V.G., Kapareliotis E., Kontoangelos K.A., Capsalis C.N., Rabavilas A.D., Soldatos C.R. 2006: Acute mobile phone effects on pre-attentive operation. *Neurosci Lett*: 397 (1–2), 99–103.
- Parazzini M., Bell S., Thuroczy G., Molnar F., Tognola G., Lutman M.E., Ravazzani P. 2005: Influence on the mechanisms of generation of distortion product otoacoustic emissions of mobile phone exposure. *Hearing Research*: 208 (1–2), 68–78.
- Parazzini M., Ravazzani P., Tognola G., Thuroczy G., Molnar F.B., Sacchetti A., Ardesi G., Mainardi L.T. 2006: Electromagnetic fields produced by GSM cellular phones and heart rate variability. *Bioelectromagnetics*, doi: 10.1002/bem.20275
- Park S.K., Ha M., Im H.J. 2004: Ecological study on residences in the vicinity of AM radio broadcasting towers and cancer death: preliminary observations in Korea. *Int Arch Occup Environ Health*: 77 (6), 387–394.
- Pau H.W., Sievert U., Eggert S., Wild W. 2005: Can electromagnetic fields emitted by mobile phones stimulate the vestibular organ?. *Otolaryngol Head Neck Surg*: 132 (1), 43–49.
- Preece A.W., Goodfellow S., Wright M.G., Butler S.R., Dunn E.J., Johnson Y., Manktelow T.C., Wesnes K. 2005: Effect of 902 MHz mobile phone transmission on cognitive function in children. *Bioelectromagnetics*: 7, S138–S143.
- Regel S.J., Negovetic S., Rössli M., Berdiñas V., Schuderer J., Huss A., Lott U., Kuster N., Achermann P. 2006: UMTS Base Station-Like Exposure, Well Being and Cognitive Performance. *Environmental Health Perspectives*: 114 (8), 1270–1275.
- Rodina A., Lass J., Riipulk J., Bachmann T., Hinrikus H. 2005: Study of effects of low level microwave field by method of face masking. *Bioelectromagnetics*: 26 (7), 571–577.
- Rössli M., Moser M., Baldinini Y., Meier M., Braun-Fahrlander C. 2004: Symptoms of ill health ascribed to electromagnetic field exposure--a questionnaire survey. *Int J Hyg Environ Health*: 207 (2), 141–50.
- Rubin G.J., Das Munshi J., Wessely S. 2005: Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med*: 67 (2), 224–32.
- Rubin G.J., Hahn G., Everitt B.S., Cleare A.J., Wessely S. 2006: Are some people sensitive to mobile phone signals? Within participants double blind randomised provocation study. *British Medical Journal*: 332 (7546), 886–891.

- Russo R., Fox E., Cinel C., Boldini A., Defeyter M.A., Mirshekar-Syahkal D., Mehta A. 2006: Does acute exposure to mobile phones affect human attention?. *Bioelectromagnetics*: 27 (3), 215–220.
- Sandström M., Wilen J., Oftedal G., Mild K. H. 2001: Mobile phone use and subjective symptoms. Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones. *Occupational Medicine*: 51 (1), 25–35.
- Santini R., Seigne M., Bonhomme-Faivre L., Bouffet S., Defrasne E., Sage M. 2001: Symptoms experienced by users of digital cellular phones [Symptôme rapportés par des utilisateurs de téléphones mobiles cellulaires]. *Pathologie Biologie*: 49 (3), 222–226.
- Santini R., Messagier R., Claustrat B., Fillion-Robin M., Youbicier-Simo B.J. 2003: Video screen exposure and 6-sulfatoxymelatonin urinary excretion in women. *Pathol Biol (Paris)*: 51(3), 143–146.
- Santini R., Santini P., Danze J.M., Le Ruz P., Seigne M. 2003: Enquête sur la santé de riverains de stations relais de téléphonie mobile: II/Incidence de l'âge des sujets, de la durée de leur exposition et de leur position par rapport aux antennes et autres sources électromagnétiques. *Pathol Biol (Paris)*: 51 (7), 412–415.
- Sievert U., Eggert S., Pau H.W. 2005: Can mobile phone emissions affect auditory functions of cochlea or brain stem?. *Otolaryngol Head Neck Surg*: 132 (3), 451–455.
- Schmid G., Sauter C., Stepansky R., Lobentanz I.S., Zeitlhofer J., 2005: No influence on selected parameters of human visual perception of 1970 MHz UMTS-like exposure. *Bioelectromagnetics*: 26 (4), 243–250.
- Schoemaker M.J., Swerdlow A.J., Ahlbom A., Auvinen A., Blaasaas K.G., Cardis E., Christensen H.C., Feychting M., Hepworth S.J., Johansen C., Klæboe L., Lönn S., McKinney P.A., Muir K., Raitanen J., Salminen T., Thomsen J., Tynes T. 2005: Mobile phone use and risk of acoustic neuroma: results of the Interphone case-control study in five North European countries. *British Journal of Cancer*: 93 (7), 842–848.
- Schmidt-Pokrzywniak A. 2004: Case-control study on uveal melanoma (RIFA): rational and design. *BMC Ophthalmol*: 4 (11), doi:10.1186/1471-2415-4-11.
- Schreier N., Huss A., Rösli M. 2006: The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: a cross-sectional representative survey in Switzerland. *Soz Präventiv Med*: 51, 201–209.
- Schüz J., Petters C., Egle U.T., Jansen B., Kimbel R., Letzel S., Nix W., Schmidt L.G., Vollrath L. 2006a: The «Mainzer EMF-Wachhund»: results from a watchdog project on self-reported health complaints attributed to exposure to electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*: 27 (4), 280–287
- Schüz J., Böhler E., Berg G., Schlehofer B., Hettlinger I., Schlaefer K., Wahrendorf J., Kunna-Grass K., Blettner M. 2006b: Cellular Phones, Cordless Phones, and the Risks of Glioma and Meningioma (Interphone Study Group, Germany). *Am J Epidemiol*: 163 (6), 512–520.
- Schüz J., Böhler E., Schlehofer B., Berg G., Schlaefer K., Hettlinger I., Kunna-Grass K., Wahrendorf J., Blettner M. 2006c: Radiofrequency Electromagnetic Fields Emitted from Base Stations of DECT Cordless Phones and the Risk of Glioma and Meningioma (Interphone Study Group, Germany). *Radiat Res*: 166 (1), 116–119.
- Smythe J.W., Costall B. 2003: Mobile phone use facilitates memory in male, but not female, subjects. *Neuroreport*: 14 (2) :243–246.
- Stang A., Anastassiou G., Ahrens W., Bromen K., Bornfeld N., Jockel K. H. 2001: The possible role of radiofrequency radiation in the development of uveal melanoma. *Epidemiology*: 12 (1), 7–12.
- Stang A., Jöckel K.H. 2004: Trends in the incidence of ocular melanoma in the United States, 1974–1998. *Cancer Causes Control*: 15, 95–96.
- Stang A., Parkin D.M., Ferlay J., Jöckel K.H. 2005: International uveal melanoma incidence trends in view of a decreasing proportion of morphological verification. *Int J Cancer*: 114 (1): 114–123.
- Straume A., Oftedal G., Johnsson A. 2005: Skin temperature increase caused by a mobile phone: a methodological infrared camera study. *Bioelectromagnetics*: 26 (6), 510–519.
- Tahvanainen K., Nino J., Halonen P., Kuusela T., Laitinen T., Lansimies E., Hartikainen J., Hietanen M., Lindholm H. 2004: Cellular phone use does not acutely affect blood pressure or heart rate of humans. *Bioelectromagnetics*: 25 (2), 73–83.
- Takebayashi T., Akiba S., Kikuchi Y., Taki M., Wake K., Watanabe S., Yamaguchi N. 2006: Mobile phone use and acoustic neuroma risk in Japan. *Occup Environ Med*: 63 (12), 802–807.
- Terao Y., Okano T., Furubayashi T., Ugawa Y. 2006: Effects of thirty-minute mobile phone use on visuo-motor reaction time. *Clin Neurophysiol*: 117 (11), 2504–2511.
- Uloziene I., Uloza V., Gradauskiene E., Saferis V. 2005: Assessment of potential effects of the electromagnetic fields of mobile phones on hearing. *BMC Public Health*: 5 (1), 39.
- Vangelova K., Deyanov C., Israel M. 2006: Cardiovascular risk in operators under radiofrequency electromagnetic radiation. *Int J Hyg Environ Health*: 209 (2), 133–138.
- Warren H.G., Prevatt A.A., Daly K.A., Antonelli P.J. 2003: Cellular telephone use and risk of intratemporal facial nerve tumor. *Laryngoscope*: 113 (4), 663–667.

Wilén J., Sandström M., Hansson Mild K. 2003: Subjective symptoms among mobile phone users – a consequence of absorption of radiofrequency fields? *Bioelectromagnetics*: 24 (3), 152–159

Wilén J., Hornsten R., Sandström M., Bjerle P., Wiklund U., StenSSon O., Lyskov E., Mild K.H. 2004: Electromagnetic field exposure and health among RF plastic sealer operators. *Bioelectromagnetics*: 25 (1), 5–15.

Wilén J., Johansson A., Kalezić N., Lyskov E., Sandström M. 2006a: Psychophysiological tests and provocation of subjects with mobile phone related symptoms. *Bioelectromagnetics*: 27 (3), 204–214.

Wilén J., Wiklund U., Hornsten R., Sandström M. 2006b: Changes in heart rate variability among RF plastic sealer operators. *Bioelectromagnetics*, doi: 10.1002/bem.20276.

Wolf R., Wolf D. 2004: Increased incidence of cancer near a cell-phone transmitter station. *International Journal of Cancer Prevention*: 1 (2), 2–19.

Wolf M., Haensse D., Morren G., Froehlich J. 2006: Do GSM 900MHz signals affect cerebral blood circulation? A near-infrared spectrophotometry study. *Optics Express*: 14 (13), 6128–6141.

Wood A.W., Loughran S.P., Stough C. 2006: Does evening exposure to mobile phone radiation affect subsequent melatonin production?. *Int J Radiat Biol*: 82 (2), 69–76.

Yuasa K., Arai N., Okabe S., Tarusawa Y., Nojima T., Hanajima R., Terao Y., Ugawa Y. 2006: Effects of thirty minutes mobile phone use on the human sensory cortex. *Clin Neurophysiol*: 117 (4), 900–905.

Zwamborn A., Vossen S., van Leersum B., Ouwens M., Mäkel W. 2003: Effects of Global Communication system radio-frequency fields on Well-Being and Cognitive Functions of human subjects with and without subjective complaints. TNO-report FEL–03-C148.

Literatur zu Kapitel 3

Capri M., Scarcella E., Bianchi E., Fumelli C., Mesircas P., Agostini C., Remondini D., Schuderer J., Kuster N., Franceschi C., Bersani F. 2004: 1800 MHz radiofrequency (mobile phones, different Global System for Mobile communication modulations) does not affect apoptosis and heat shock protein 70 level in peripheral blood mononuclear cells from young and old donors. *Int J Radiat Biol*, Vol 80, No 6, 389–397.

Cobb B L., Jauchem J. R., Adair E. R. 2004: Radial arm maze performance of rats following repeated low level microwave radiation exposure. *Bioelectromagnetics*, 25 (1), 49–57.

Czyz J., Guan K., Zeng Q., Nikolova T., Meister A., Schönborn F., Schuderer J., Kuster N., Wobus A.M. 2004: High frequency electromagnetic fields affect gene expression levels in tumor suppressor p53-deficient embryonic stem cells. *Bioelectromagnetics*: 25 (4), 296–307.

Diem E., Jahn O., Rüdiger H.W. 2005: Non-thermal DNA breakage by mobile phone radiation in human fibroblasts and transformed GFSH-R17 (rat granulosa) cells in vitro. *Mutation Res*, 583 (2), 178–83.

Dubreuil D., Jay T. M., Edeline J.-M. 2002: Does head-only exposure to GSM-900 MHz electromagnetic fields affect the performance of rats in spatial learning task? *Behav Brain Res*: 129 (49), 203–10.

Dubreuil D., Jay T. M., Edeline J.-M. 2003: Head-only exposure to GSM-900 MHz electromagnetic fields does not alter rat's memory in spatial and non-spatial tasks. *Behav Brain Res*: 145, 51–61.

Hoyto A., Sihvonen A.P., Juutilainen J., Naarala J. 2006: Modest increase in temperature affects ODC activity in L929 cells: Low-level radiofrequency radiation does not. *Radiat Environ Biophys*: 45, 231–235.

Hoyto A., Juutilainen J., Naarala J. 2007: Ornithine decarboxylase activity is affected in primary astrocytes but not in secondary cell lines exposed to 872 MHz RF radiation. *Int J Radiat Biol*: 83 (6), 367–74.

ICNIRP 1998: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys*: 74 (4), 494–522.

Lai H., Horita A., Guy A. W. 1994: Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics*: 15, 95–104.

Lai H., Carino M. A., Horita A., Guy A. W. 1989: Low-level microwave irradiation and central cholinergic systems. *Pharmacol Biochem Behav*: 33 (1), 131–138.

Leszczynski D., Joenväärä S., Reivinen R., Kuokka R. 2002: Non-thermal activation of hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: Molecular mechanism for cancer- and blood-brain barrier-related effects. *Differentiation*: 70, 120–129.

Leszczynski D., Nylund R., Joenväärä S., Reivinen J. 2004: Applicability of Discovery Science-Approach to Determine Biological Effects of Mobile Phone Radiation. *Proteomics*: 4, 426–431.

Litovitz T.A., Krause D., Penafiel L.M., Elson E.C., Mullins J.M. 1993: The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics*: 14, 395–403.

Maes A., Collier M., van Gorp U., Vandoninck S., Verschaeve L. 1997: Cytogenic effects of 935.2-MHz (GSM) microwaves alone and in combination with mitomycin C. *Mutation Res*: 393 (1–2), 151–6.

- Maes A., Collier M., Verschaeve L. 2001: Cytogenetic effects of 900 MHz (GSM) microwaves on human lymphocytes. *Bioelectromagnetics*: 22, 91–96.
- Nikolova T., Czyz J., Rolletschek A., Blyszczuk P., Schuderer J., Kuster N., Wobus A. 2005: Electromagnetic fields affect the transcript levels of apoptosis-related genes in embryonic stem cell-derived neural progenitor cells. *The FASEB J.*: 19 (12), 1686–8.
- NRPB 2004: Review of the Scientific Evidence for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (0–300 GHz). *Docs NRPB*: 15 (3), 1–215.
- Nylund R., Leszczynski D. 2004: Proteomics analysis of human endothelial cell line EA.hy926 after Exposure to GSM 900 radiation. *Proteomics*: 4, 1359–1365.
- Nylund R., Leszczynski D. 2006: Mobile phone radiation causes changes in gene and protein expression in human endothelial cell lines and the response seems to be genome- and proteome-dependent. *Proteomics*: 6 (17), 4769–4780.
- Penafiel ML, Litovitz T., Krause D., Desta A., Mullins J.M. 1997: Role of modulation on the effect of microwaves on ornithin decarboxylase activity in L929 cells. *Bioelectromagnetics*: 18, 132–141.
- Remondini D., Nylund R., Reivinen J., Poullietier de Gannes F., Veyret B., Lagroye I., Haro E., Trillo M.A., Capri M., Franceschi C., Schlatterer K., Gminski R., Fritznier R., Tauber R., Schuderer J., Kustr N., Leszczynski D., Bersani F., Maercker C. 2006: Gene expression changes in human cells after exposure to mobile phone microwaves. *Proteomics*: 6 (17), 4745–4754.
- Schuderer J., Kuster N. 2003: The Effect of the Meniscus at the Solid/Liquid Interface on the SAR Distribution in Petri Dishes and Flasks. *Bioelectromagnetics*: 24 (2), 103–108.
- Schuderer J., Schmid T., Urban G., Kuster N. 2004: Novel High Resolution Temperature Probe for RF Dosimetry. *Physics in Med and Biol*: 49 (6), N83-N92.
- Schuderer J., Samaras T., Oesch W., Spät D., Kuster N. 2004: High Peak SAR Exposure Unit with Tight Exposure and Environmental Control for In Vitro Experiments at 1800 MHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*: 52 (8), 2057–2066.
- Schuderer J., Spät D., Samaras T., Oesch W., Kuster N. 2004: In Vitro Exposure Systems for RF Exposures at 900 MHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*: 52 (8), 2067–2075.
- Sienkiewicz Z J., Blackwell R. P., Haylock R. G., Saunders R. D., Cobb B. L. 2000: Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice. *Bioelectromagnetics*, 21(3): 151–8.
- Speit G., Schütz P., Hoffmann H. 2007: Genotoxic effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) in cultured mammalian cells are not independently reproducible. *Mutat Res.*: 626 (1–2), 42–47.
- Stronati L., Testa A., Moquet J., Edwards A., Cordelli E., Villani P., Marino C., Fresegna A.M. 2006: 935 MHz cellular phone radiation. An in vitro study of genotoxicity in human lymphocytes. *Int J Radiation Biol*: 82: 339–346.
- Vijayalaxmi, Pickard W.F., Bisht K.S., Leal B.Z., Meltz M.L., Roti Roti J.L., Straube W.L., Moros E.G. 2001: Cytogenetic studies in human blood lymphocytes exposed in vitro to radiofrequency radiation at a cellular telephone frequency (835.62 MHz, FDMA). *Radiat. Res.*: 155, 113–121.
- Wang B., Lai H. 2000: Acute exposure to pulsed 2450-MHz microwaves affects water-maze performance of rats. *Bioelectromagnetics*: 21, 52–6.
- WHO 1993: *Electromagnetic Fields (300Hz – 300 GHz)*. Geneva, World Health Organization, Environmental Health Criteria 137.