

> Strahlung von Sendeanlagen und Gesundheit

*Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich.
Stand: Dezember 2012*



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

> Strahlung von Sendeanlagen und Gesundheit

*Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich.
Stand: Dezember 2012*

*Résumé de cette publication: www.bafu.admin.ch/uw-1323-f
Riassunto della presente pubblicazione: www.bafu.admin.ch/uw-1323-i
Summary of this publication: www.bafu.admin.ch/uw-1323-e*

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

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

Autoren

Dr. med. Kerstin Hug, Prof. Dr. phil. nat. Martin Rösli,
Schweizerisches Tropen- und Public Health Institut, Assoziiertes
Institut der Universität Basel, Basel

Begleitung BAFU

Dr. phil. nat. Jürg Baumann, Gilberte Tinguely, Dr. sc. ETH Zürich

Zitiervorschlag

Hug K., Rösli M. 2013: Strahlung von Sendeanlagen und Gesundheit.
Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich.
Stand: Dezember 2012. Umwelt-Wissen Nr. 1323. Bundesamt für
Umwelt, Bern. 72 S.

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfoto

BAFU/E. Ammon, AURA

Download PDF

www.bafu.admin.ch/uw-1323-d

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

© BAFU 2013

> Inhalt

Abstracts	5
Vorwort	7
Zusammenfassung	8
1 Ziel und Aufbau des Berichts	13
2 Methodik	14
2.1 Literatursuche und Einschlusskriterien	14
2.2 Vorgehen bei der Bewertung der Evidenz	15
3 Auswirkungen auf den Menschen	16
3.1 Struktur des Ergebnisteils	16
3.2 Expositionsvergleich: Ortsfeste Sendeanlagen versus körpernah betriebene Geräte	17
3.3 Ausgangslage: Evidenz bis September 2006	19
3.4 Physiologische Wirkungen	20
3.4.1 Hormonsystem	20
3.4.2 Gehirnphysiologie (Hirnströme, Durchblutung) und Verhalten	25
3.4.3 Kognitive Funktionen	26
3.4.4 Herz-/Kreislauffunktionen, Thermoregulation, Hautdurchblutung	29
3.5 Wirkungen auf das Befinden	31
3.5.1 Elektrosensitivität (= Feldwahrnehmung)	31
3.5.2 Unspezifische Symptome, elektromagnetische Hypersensibilität	33
3.5.3 Schlaf (Architektur und Qualität)	45
3.6 Kanzerogene Wirkungen	50
3.6.1 Gentoxizität	50
3.6.2 Krebsrisiko: bisheriger Kenntnisstand	51
3.6.3 Krebsrisiko bei Kindern: neue Studien	52
3.6.4 Krebsrisiko bei Erwachsenen: neue Studien	58
3.7 Nichtkanzerogene Wirkungen	63
3.7.1 Fertilität und Auswirkungen auf die Nachkommen	63
Anhang	64
Literatur	65
Verzeichnisse	69

> Abstracts

This report updates the assessment of the health effects of high-frequency radiation based on newly published studies on human beings in the period from October 2006 to December 2012. It takes account of experimental field studies, epidemiological studies of population groups in their everyday environment and experimental studies with short-term exposure under controlled conditions in the laboratory, in which the influence of high-frequency radiation from fixed facilities such as broadcasting transmitters and mobile telephone base stations was studied. In the past six years, approximately 50 studies on this topic were published. Generally speaking, exposure to high-frequency radiation from fixed transmitters is pleasingly low, and at this exposure level no harmful effects on health have been scientifically established to date. In view of this, there is no call for a modification of the ambient limit values specified in the Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation (ONIR). With respect to the non-thermal effects of high-frequency radiation, there are still many gaps in scientific knowledge. In particular, there are almost no methodologically sound long-term observations. It is therefore not possible to make a reliable assessment of any potential long-term risks at this time, and consequently caution is called for, especially with regard to long-term exposure to high-frequency radiation.

Keywords:

non-ionising radiation,
high-frequency radiation,
low dose range, non-thermal,
health, risk assessment,
transmitters

Der vorliegende Synthesebericht enthält die aktualisierte Bewertung der gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter Strahlung, gestützt auf die von Oktober 2006 bis Dezember 2012 neu publizierten Humanstudien. Berücksichtigt wurden experimentelle Feldstudien, epidemiologische Untersuchungen von Bevölkerungsgruppen in ihrer Alltagsumgebung sowie experimentelle Studien mit Kurzzeitexpositionen unter kontrollierten Bedingungen im Labor, in welchen der Einfluss hochfrequenter Strahlung von ortsfesten Sendeanlagen wie Rundfunksender oder Mobilfunkbasisstationen untersucht wurde. Dazu wurden in den letzten sechs Jahren ca. 50 Studien veröffentlicht. Die Expositionen durch ortsfeste Sendeanlagen sind generell erfreulich niedrig, und bei diesem Belastungsniveau wurden bisher keine gesundheitlichen Auswirkungen wissenschaftlich nachgewiesen. Eine Anpassung der Immissionsgrenzwerte der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung ist daher nicht erforderlich. Bezüglich nichtthermischer Wirkungen hochfrequenter Strahlung sind die Kenntnisse aber weiterhin sehr lückenhaft. Es fehlen insbesondere methodisch ausgereifte Langzeitbeobachtungen praktisch vollständig. Eine verlässliche Aussage über allfällige Langzeitrisiken ist deshalb zurzeit nicht möglich, und ein vorsorglicher Umgang mit hochfrequenter Strahlung, vor allem bei langfristiger Einwirkung, angezeigt.

Stichwörter:

nichtionisierende Strahlung,
hochfrequente Strahlung,
Niedrigdosisbereich,
nichtthermisch, Gesundheit,
Risikobewertung, Sendeanlage

Le présent rapport de synthèse met à jour l'évaluation des impacts sanitaires du rayonnement de haute fréquence en se référant aux études sur l'homme publiées entre octobre 2006 et décembre 2012. Il s'appuie sur des études expérimentales de terrain, des études épidémiologiques de populations dans leur environnement quotidien et des études expérimentales dans des conditions contrôlées en laboratoire avec des expositions de courte durée qui ont analysé l'influence du rayonnement de haute fréquence de stations émettrices fixes, telles que les émetteurs radio ou les stations de base de téléphonie mobile. Les six dernières années, quelque 50 études ont été publiées dans ce domaine. Le niveau d'exposition aux installations émettrices fixes est en général bas, ce qui est réjouissant, et à ce niveau, aucun impact sanitaire n'a pu être mis en évidence scientifiquement jusqu'à présent. Par conséquent, adapter les valeurs limites d'immission de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant n'est pas nécessaire. Concernant les effets athermiques du rayonnement de haute fréquence, les connaissances demeurent très lacunaires, et les observations sur le long terme reposant sur une méthode solide, notamment, sont presque inexistantes. Il n'est pas possible pour l'heure de faire une évaluation fiable des éventuels risques sur le long terme, et il convient de maintenir l'application du principe de précaution en matière de rayonnement de haute fréquence, en particulier pour l'exposition sur le long terme.

Nel presente rapporto di sintesi vengono aggiornate le valutazioni delle ripercussioni sulla salute delle radiazioni ad alta frequenza in base ai nuovi studi sull'uomo pubblicati tra ottobre 2006 e dicembre 2012. Sono stati presi in considerazione studi sperimentali sul campo, indagini epidemiologiche su gruppi di popolazione nel loro ambiente di vita quotidiano e studi sperimentali su esposizioni di breve durata in condizioni di laboratorio controllate, nei quali l'analisi si è concentrata sull'influenza delle radiazioni ad alta frequenza degli impianti di trasmissione fissi (es. trasmettitori radiofonici e stazioni di base per la telefonia cellulare). Su questo aspetto, negli ultimi sei anni, sono stati pubblicati circa 50 studi. In generale, le esposizioni agli impianti di trasmissione fissi sono fortunatamente basse e con un tale livello di esposizione, dal punto di vista scientifico, non sono state finora accertate ripercussioni sulla salute. Pertanto non vi è alcuna necessità di adeguare i valori limite d'immissione fissati dall'ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti. Per quanto concerne gli effetti non termici delle radiazioni ad alta frequenza, le conoscenze sono tuttora molto lacunose e, in particolare, mancano praticamente del tutto osservazioni di lungo periodo basate su una metodologia matura. Allo stato attuale, non è pertanto possibile pronunciarsi in modo attendibile sull'esistenza o l'assenza di rischi di lungo periodo. Nell'ambito delle radiazioni ad alta frequenza, si impone un approccio orientato alla prevenzione, soprattutto in caso di esposizione prolungata.

Mots-clés:

rayonnement non ionisant,
rayonnement de haute fréquence,
faible intensité, athermique,
santé, évaluation des risques,
installation émettrice

Parole chiave:

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

> Vorwort

Das Umweltschutzgesetz verpflichtet den Bundesrat, Wirkungsorientierte Immissionsgrenzwerte für nichtionisierende Strahlung, oft auch als Elektromog bezeichnet, festzulegen. Diese Grenzwerte sollen gewährleisten, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Menschen, Tiere, Pflanzen und deren Lebensräume nicht gefährdet werden und die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich gestört wird. Dieser Verpflichtung ist der Bundesrat im Jahr 1999 mit dem Erlass der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) nachgekommen.

Die wissenschaftliche Forschung auf diesem Gebiet geht weiter, und es werden laufend neue Ergebnisse publiziert. Der Bundesrat und das Bundesgericht haben dem BAFU als Umweltbehörde des Bundes die Aufgabe übertragen, die Ergebnisse dieser Forschung zu verfolgen und dem Bundesrat bei Bedarf eine Anpassung der Immissionsgrenzwerte der NISV zu beantragen.

Mit dem vorliegenden Synthesebericht kommt das BAFU diesem Auftrag für die von Mobilfunk-, Rundfunk- und anderen ortsfesten Antennen ausgehende Strahlung nach. Der Bericht schliesst an zwei Berichte aus den Jahren 2003 und 2007 an und verarbeitet die wissenschaftliche Literatur über Untersuchungen am Menschen im Zeitraum von Oktober 2006 bis Dezember 2012.

Die gute Nachricht aus dieser Synthese: Die Belastung der Bevölkerung durch die Strahlung von Sendeantennen ist niedrig, und es wurden keine Gesundheitsrisiken festgestellt, die eine Anpassung der Immissionsgrenzwerte erfordern würden. Die ernüchternde Erkenntnis: Über allfällige Langzeitwirkungen wissen wir fast nichts, weil solche noch nicht oder mit unzulänglichen Methoden untersucht wurden. Damit ist eine abschliessende Aussage zum gesundheitlichen Langzeitrisiko nach wie vor nicht möglich. Im Sinne der Vorsorge sollte die Langzeitbelastung deshalb unter den Immissionsgrenzwerten bleiben.

Gérard Poffet
Vizedirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Zusammenfassung

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) hat in den letzten Jahren bereits in zwei umfassenden Syntheseberichten den wissenschaftlichen Kenntnisstand zu potenziellen Gesundheitsrisiken hochfrequenter nichtionisierender Strahlung (100 kHz bis 300 GHz) im Niedrigdosisbereich dargestellt und bewertet. Als Niedrigdosisbereich gelten dabei Intensitäten unterhalb der Immissionsgrenzwerte der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV). Die thermischen Wirkungen der Hochfrequenzstrahlung, die bei höheren Intensitäten auftreten, sind hinreichend bekannt und nicht Gegenstand der Berichte.

Die erste Beurteilung des wissenschaftlichen Kenntnisstands erfolgte im Bericht «Hochfrequente Strahlung und Gesundheit» (Umweltmaterialien Nr. 162), der Studien bis Ende 2002 umfasste (BUWAL 2003). Diese Beurteilung wurde im Juni 2007 auf Basis der Studien aktualisiert, die zwischen 2003 und September 2006 erschienen waren (Umwelt-Wissen Nr. 0722, BAFU 2007). Beide Beurteilungen basierten insgesamt auf ca. 350 experimentellen und epidemiologischen Studien am Menschen.

Im vorliegenden Bericht werden nun die Ergebnisse der von Oktober 2006 bis Dezember 2012 neu publizierten Humanstudien zusammenfassend dargestellt und bewertet. Im Gegensatz zu den beiden früheren Übersichtsarbeiten, in denen auch Untersuchungen mit Mobiltelefonen als Strahlungsquelle berücksichtigt wurden, beschränkt sich der vorliegende Bericht auftragsgemäss auf Studien, in denen die Hochfrequenzbelastung durch ortsfeste Sendeanlagen wie Rundfunksender oder Mobilfunkbasisstationen untersucht wurde. Zu dieser Exposition wurden in den letzten sechs Jahren ca. 50 Studien veröffentlicht. Dabei handelt es sich um experimentelle Feldstudien, epidemiologische Untersuchungen von Bevölkerungsgruppen in ihrer Alltagsumgebung und um experimentelle Studien zu Kurzzeitexpositionen unter kontrollierten Bedingungen im Labor.

Wie in den früheren Berichten wird die Evidenz für oder gegen einen Effekt anhand aller Studienresultate gesamthaft beurteilt. Die Studien wurden von der Dokumentationsstelle ELMAR am Schweizerischen Tropen- und Public Health-Institut Basel systematisch zusammengetragen und bewertet. Weitere Details zu den einzelnen Untersuchungen sind in der öffentlich zugänglichen Datenbank ELMAR zu finden (<http://elmar.swisstph.ch>).

Resultate zu Auswirkungen der Hochfrequenzbelastung durch ortsfeste Sendeanlagen

Die individuelle Belastung des Menschen im Alltag, wie sie in der Umgebung von Rundfunksendern oder Mobilfunkbasisstationen entsteht, kann in epidemiologischen Studien erst seit ca. 2007 zufriedenstellend erfasst werden. Davor standen noch keine entsprechenden Messgeräte und Ausbreitungsmodelle zur Verfügung. Dadurch hat sich die Qualität der Studien teilweise deutlich verbessert, gleichwohl bestehen immer noch

grosse Unterschiede in der methodischen Qualität der Studien. Einige Fragestellungen wurden bisher auch noch kaum untersucht.

Die meisten neuen Studien zur Belastung durch ortsfeste Sendeanlagen betrafen das Auftreten von Schlafstörungen und von unspezifischen Symptomen wie Kopfschmerzen, Schwindel oder Übelkeit. Bezüglich **Schlafstörungen** hatte es in mehreren Untersuchungen um einen Kurzwellen-Radiosender Hinweise darauf gegeben, dass solche Emissionen die Schlafqualität der Anwohner beeinträchtigen könnten. Daher war dieser Zusammenhang im letzten Bericht als möglich bewertet worden. Seither sind zu dieser Fragestellung zwei Feldinterventionsstudien aus Österreich und Deutschland publiziert worden. Ausserdem wurden die Resultate der Schweizer Qualifex-Studie veröffentlicht. Diese umfasste als bisher einzige Untersuchung neben einer Querschnittsanalyse auch eine Folgeuntersuchung nach einem Jahr, und die individuelle Hochfrequenzbelastung wurde sowohl gemessen als auch mit einem Ausbreitungsmodell berechnet. Ausserdem standen für die Beurteilung der Schlafqualität sowohl Teilnehmerangaben als auch objektive Messdaten zum Bewegungsverhalten im Schlaf zur Verfügung. Alle drei neuen Studien sind aussagekräftiger als die früheren, weil darauf geachtet wurde, dass die Teilnehmer ihren Expositionsstatus nicht kannten. Dies war in der Studie in der Umgebung eines grossen Kurzwellensenders nicht der Fall. Die Ergebnisse der neuen Studien zeigen keine Beeinträchtigung der Schlafqualität durch Hochfrequenzfelder von Sendeanlagen. Es wurden auch keine Hinweise darauf gefunden, dass Personen mit elektromagnetischer Hypersensibilität anders auf die Belastung reagieren als die restliche Bevölkerung. Allerdings lässt sich diese Frage noch nicht abschliessend beantworten, weil bisher nicht genügend Personen über einen längeren Zeitraum untersucht wurden. Zudem waren die real vorkommenden Expositionsunterschiede in den neuen Studien deutlich geringer als in der Studie um den Kurzwellensender. Auch ist es nicht auszuschliessen, dass Kurzwellen andere Effekte verursachen als die heutigen hochfrequenten elektromagnetischen Felder, die hauptsächlich vom Mobilfunk, von Schnurlostelefonen und WLAN ausgehen.

In Bezug auf die Frage, ob und wie die Hochfrequenzstrahlung von Sendeanlagen das **Wohlbefinden** beeinträchtigt und **unspezifische Beschwerden** verursacht, hatten für den letzten Bericht nur einzelne Studienresultate vorgelegen. Diese Frage stand in den letzten Jahren im Fokus der Forschung, und es wurden inzwischen sechs experimentelle und elf epidemiologische Studien durchgeführt. In den experimentellen Studien zeigten sich nur vereinzelt Auswirkungen der kurzfristigen Ganzkörperbelastung auf das Befinden, die kein einheitliches Muster ergaben. Bei den epidemiologischen Studien fällt auf, dass in den Studien mit präziserer Expositionsabschätzung keine Beeinträchtigung des Wohlbefindens durch die Hochfrequenzbelastung beobachtet wurde. Untersuchungen mit einfacher Expositionsabschätzung wiesen dagegen eher auf Zusammenhänge hin. In ihrer Aussagekraft eingeschränkt sind vor allem Studien in der Umgebung von einzelnen grossen Sendeanlagen, weil die Teilnehmenden ihren Expositionsstatus im Allgemeinen kennen. Experimentelle Studien haben gezeigt, dass die Kenntnis des Expositionsstatus die Wahrnehmung und die Schilderung unspezifischer Beschwerden beeinflusst. Dagegen sind verblindete Studien, in denen die individuelle Hochfrequenzbelastung gemessen oder modelliert wird, weniger fehleranfällig. Allerdings war das Expositions-niveau in allen bisherigen Studien niedrig und die Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen waren gering. Der Beobachtungszeitraum

war zudem auf maximal ein Jahr beschränkt. Für diese niedrigen Belastungen zeichnet sich ab, dass sie das Wohlbefinden von Menschen nicht beeinträchtigen. Eine abschliessende Beurteilung ist aber noch nicht möglich, weil Langzeitbeobachtungen fehlen.

Die Frage, ob schwache hochfrequente Felder von ortsfesten Sendeanlagen wahrgenommen werden können, wurde in fünf neuen experimentellen Studien untersucht. Wie in den früheren Studien waren die Probanden im Durchschnitt nicht in der Lage, die An- oder Abwesenheit der Felder zuverlässig zu erkennen.

Zum Risiko von **Krebserkrankungen** bei Anwohnern in der Umgebung von Rundfunksendern oder Mobilfunkbasisstationen liegen vier neue Studien an Kindern und sechs neue Studien an Erwachsenen vor. Die neuen Studien zum **Leukämierisiko bei Kindern** umfassen grössere Kollektive und verwenden bessere Methoden zur individuellen Expositionsabschätzung als frühere Studien. Sie weisen – im Gegensatz zu einigen älteren Studien – nicht auf Assoziationen zwischen der Belastung durch Sendeanlagen und dem Kinderleukämierisiko hin. Durch die hohe Aussagekraft der neuen Studien wird die Evidenz für diesen Zusammenhang, der im letzten Bericht noch als möglich beurteilt worden war, abgeschwächt. Allerdings war auch in diesen Studien das Expositionsniveau niedrig und die Modellierung der Immissionen von Mobilfunkbasisstationen mit Unsicherheiten behaftet. Daher erlauben die Resultate keine Rückschlüsse bezüglich potenzieller Risiken bei Expositionen oberhalb von 3 V/m.

Auch bezüglich des **Hirntumorrisikos bei Kindern** gibt es in den neuen Studien keine Hinweise auf Zusammenhänge mit der Hochfrequenzbelastung durch ortsfeste Sendeanlagen. Es liegen aber weniger Daten vor als für das Leukämierisiko, sodass die Evidenzbeurteilung weniger robust ist.

Von den neuen Studien zum **Krebsrisiko bei Erwachsenen** betrafen vier die Exposition durch Mobilfunkbasisstationen und zwei die Belastung durch Militär- oder Rundfunksender. Im Gegensatz zu den Untersuchungen an Kindern weisen auch die neuen Studien zum Krebsrisiko bei Erwachsenen gravierende methodische Probleme auf. Dazu gehören Unklarheiten bei der Auswahl des Untersuchungsgebiets, kleine Fallzahlen, mangelhafte Expositionsbestimmung und die fehlende Berücksichtigung von zusätzlichen Einflussfaktoren. Eine weitere Schwäche ist, dass die Kollektive der meisten Studien sehr heterogen waren, sie umfassten teilweise Kinder und Erwachsene gemeinsam. Dies ist angesichts der Bedeutung des Alters als wichtigster Risikofaktor für Krebserkrankungen nicht sinnvoll. Wegen dieser methodischen Mängel erfüllt keine der neuen Arbeiten die grundlegenden Anforderungen an eine wissenschaftliche Studie. Eine fundierte Beurteilung der Evidenz für oder gegen einen Zusammenhang der Exposition mit dem Krebsrisiko bei Erwachsenen ist daher weiterhin nicht möglich.

Auswirkungen hochfrequenter Felder auf **physiologische Parameter** wurden bisher überwiegend im Zusammenhang mit der Mobiltelefonbenutzung untersucht. Zur schwächeren Ganzkörperbelastung durch ortsfeste Sendeanlagen liegen weiterhin nur einzelne Resultate vor. Insbesondere zu Auswirkungen auf die **Hirnströme** gibt es nur eine ältere Studie. Offenbar war es für die meisten Forschungsgruppen prioritär, die

bestehenden Hinweise auf Veränderungen der Hirnströme bei starker lokaler Exposition des Kopfes durch ein Mobiltelefon zu überprüfen. Angesichts der spärlichen Daten zur Ganzkörperexposition sind allfällige Auswirkungen der Emissionen von ortsfesten Sendeanlagen zum jetzigen Zeitpunkt nicht beurteilbar. Auch die **kognitiven Funktionen** wie Lernprozesse oder Reaktionsgeschwindigkeiten wurden bisher überwiegend im Zusammenhang mit Mobiltelefonexposition untersucht. Die wenigen früheren Studien zur Ganzkörperbelastung hatten widersprüchliche Resultate ergeben. In den vier neuen Experimenten wurden keine kurzfristigen Auswirkungen auf kognitive Funktionen beobachtet. Damit nimmt die Stärke der Evidenz tendenziell ab. Allerdings liegen bisher keine Studien zu Auswirkungen der langfristigen Exposition vor.

Das **Herz Kreislaufsystem** wurde in drei neuen experimentellen Studien untersucht. Diese Studien zeigten übereinstimmend keine Auswirkungen der kurzfristigen Ganzkörperbelastung auf die Herzfrequenz oder die Durchblutung. Damit bestätigten sie die Ergebnisse früherer Studien und lassen kurzfristige Effekte unwahrscheinlich erscheinen. Zur langfristigen Belastung liegen ebenfalls noch keine Untersuchungen vor.

Auswirkungen der Exposition auf die **Fruchtbarkeit**, auf Fehl- oder Frühgeburtsraten sowie angeborene Missbildungen wurden ebenfalls sehr selten untersucht. Die einzige neue Studie in der Umgebung einer Militärantenne ist wegen methodischer Mängel nicht aussagekräftig. Auch Veränderungen des **Hormonhaushalts** sind wegen der dürftigen Datenlage und der methodischen Mängel der bisher vorliegenden Studien weiterhin nicht beurteilbar.

Schlussfolgerungen

Obwohl sich die Datenlage zu Auswirkungen der Ganzkörperexposition durch ortsfeste Sendeanlagen des Rund- oder Mobilfunks seit dem letzten Bericht vor allem durch die Einführung von Ausbreitungsmodellierungen und Messgeräten zur Erfassung der individuellen Belastung verbessert hat, erlauben die Unsicherheiten in der Interpretation der Resultate und die bestehenden Wissenslücken noch keine abschliessende Beurteilung.

Die epidemiologischen Studien zeigen, dass die Ganzkörperbelastung durch Hochfrequenzfelder von ortsfesten Sendeanlagen in unserer heutigen Umwelt niedrig ist. In den epidemiologischen Studien wurden nur vereinzelt Expositionen oberhalb von 0.5 V/m gemessen. Bis zu diesem Belastungsniveau weisen die Ergebnisse der bisherigen Studien an Menschen nicht auf Veränderungen der physiologischen Parameter oder Auswirkungen auf das Wohlbefinden respektive die Gesundheit hin. Aussagen über höhere Expositionsniveaus, zum Beispiel im Bereich der Anlage- oder der Immissionsgrenzwerte der NISV, lassen sich aus diesen Studien aber nicht ableiten.

In experimentellen Studien wurden höhere Belastungen bis maximal 10 V/m untersucht. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf akute Wirkungen. Die Stärke von experimentellen Untersuchungen liegt darin, dass Störfaktoren durch die Randomisierung und die doppelblinde Durchführung weitgehend ausgeschlossen werden können. Allerdings lag die Expositionsdauer in den meisten Fällen unter einer Stunde, sodass

von diesen Ergebnissen keine Aussagen über langfristige Belastungen abgeleitet werden können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass keine neuen gesicherten gesundheitlichen Effekte der Hochfrequenzbelastung durch Sendeanlagen im Dosisbereich unterhalb der von der ICNIRP empfohlenen Grenzwerte und damit auch unterhalb der Immissionsgrenzwerte der NISV beobachtet wurden. Daher ist der Schutz vor Akutwirkungen aus wissenschaftlicher Sicht nach wie vor gewährleistet.

Jedoch weisen die epidemiologischen Studien insbesondere bezüglich kanzerogener Auswirkungen teilweise gravierende methodische Schwächen auf, und es gibt bisher keine Langzeitstudien zu Auswirkungen auf den Schlaf und das Befinden. Bei dieser lückenhaften Datenlage bedeutet das Fehlen eines Nachweises gesundheitlicher Risiken nicht automatisch, dass es keine Auswirkungen gibt. Aus wissenschaftlicher Sicht ist daher der vorsorgeorientierte Ansatz im Umgang mit der nichtionisierenden Strahlung weiterhin angezeigt. Insbesondere bezüglich eventueller Langzeiteffekte besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Zudem ist davon auszugehen, dass sich die Belastung in Zukunft durch die rasche Entwicklung der drahtlosen Kommunikationstechnik verändern und weiter ansteigen wird.

1 > Ziel und Aufbau des Berichts

Seit der Einführung und flächendeckenden Verbreitung des Mobilfunks in den 1990er-Jahren wird die Frage nach allfälligen Risiken schwacher elektromagnetischer Felder (EMF) im Hochfrequenzbereich intensiv untersucht. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU; vormals BUWAL) wurde der wissenschaftliche Kenntnisstand zu potenziellen Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung auf die Gesundheit bisher in zwei umfassenden Syntheseberichten dargelegt und bewertet. Die erste Beurteilung erfolgte im Bericht «Hochfrequente Strahlung und Gesundheit» (Umweltmaterialien Nr. 162, im Folgenden: UM 162), der wissenschaftliche Studien bis Ende 2002 umfasste (BUWAL 2003). Dieser Bericht wurde im Juni 2007 auf der Grundlage der Studien von 2003 bis September 2006 aktualisiert (Umwelt-Wissen Nr. 0722, BAFU 2007).

In der vorliegenden Arbeit werden nun die Resultate von Studien zusammengefasst, die zwischen Oktober 2006 und Dezember 2012 erschienen sind und in denen die Hochfrequenzbelastung durch ortsfeste Sendeanlagen wie Rundfunksender oder Mobilfunkbasisstationen untersucht wurde. Das Ziel dieses Syntheseberichts ist eine aktualisierte Beurteilung des wissenschaftlichen Kenntnisstands.

Im Zentrum steht dabei die Frage, ob die von der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) empfohlenen Grenzwerte (ICNIRP 1998) und die auf dieser Empfehlung basierenden Immissionsgrenzwerte 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.

Eine Darstellung der physikalischen Grundlagen und der technischen Anwendungen der Hochfrequenzstrahlung sowie der verschiedenen Techniken der Mobilkommunikation sind im 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.

Im Methodik-Kapitel wird das Vorgehen bei der Literatursuche und -bewertung beschrieben. Die folgenden Kapitel enthalten kurze Zusammenfassungen der wissenschaftlichen Studien, die zwischen Oktober 2006 und Dezember 2012 publiziert wurden, in Text- und Tabellenform. Studien, in denen mehrere Zielgrößen untersucht wurden, erscheinen in mehreren Kapiteln. Die Beschreibung des Studiendesigns und der methodischen Aspekte erfolgt dann jeweils bei der ersten Erwähnung der Studie.

2 > Methodik

2.1 Literatursuche und Einschlusskriterien

Die systematische Suche nach wissenschaftlichen Publikationen, die zwischen Oktober 2006 und Dezember 2012 veröffentlicht worden waren, erfolgte in den allgemeinen Literaturdatenbanken PubMed (www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed), ISI Web of Knowledge (<http://apps.webofknowledge.com>), EMBASE (www.embase.com) sowie in den auf elektromagnetische Felder spezialisierten Datenbanken des Schweizerischen Tropen- und Public Health-Instituts (<http://elmar.swisstph.ch>) und der Universität Aachen (www.emf-portal.org). Dabei wurden unter anderem folgende Stichworte einzeln oder in Kombination verwendet (auf Englisch oder Deutsch): hochfrequente elektromagnetische Felder, Radiofrequenz, Basisstation, Mobilfunkantenne, Sendeanlage, Radiosender, Radar, Ätiologie, gesundheitliche Auswirkungen, epidemiologische Studie, Fragebogen, experimentelle Studie und Vergleichsstudie.

Die Literaturrecherche wurde Ende Dezember 2012 abgeschlossen. Die Recherche wurde mit der Suchfunktion «related articles» sowie anhand von Übersichtsarbeiten und Expertenberichten ergänzt. Als Publikationsdatum galt jeweils die erste Veröffentlichung des Artikels. Bei einigen Fachzeitschriften erscheint die Online-Publikation bereits Wochen oder Monate vor der Druckversion des Artikels. Diese Studien wurden in den Bericht aufgenommen. Falls der Artikel bis zur Fertigstellung des Berichts auch gedruckt wurde, wird diese Referenz angegeben (Publikationsjahr ist dann eventuell 2013).

Der Bericht umfasst 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 ausschliesslich um Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften, die einen Peer-Review-Prozess durchlaufen haben.

Für den Synthesebericht berücksichtigt wurden Studien zur Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz. Die meisten Studien betrafen Mobilfunkbasisstationen und Rundfunksender, die zu einer Ganzkörperbelastung der Menschen in ihrer Umgebung führen.

Sowohl experimentelle Studien an Menschen als auch rein beobachtende, epidemiologische Studien wurden in den Bericht aufgenommen. Als Hintergrundinformation dienten Studien zu technischen und methodischen Aspekten der EMF-Forschung, unter anderem zum Messverfahren, zu Auswertungsmethoden oder zum Studiendesign.

In experimentellen Studien werden die Teilnehmenden unter kontrollierten Bedingungen einer realen Befeldung und/oder einer Scheinexposition ausgesetzt. Dabei sind in diesem Bericht nur Studien berücksichtigt, in denen eine Ganzkörperexposition appli-

ziert wurde, wie sie durch ortsfeste Sendeanlagen verursacht werden kann. Die Höhe und Zeitdauer der Exposition ist darauf ausgelegt, unmittelbare biologische Reaktionen zu untersuchen. Aus ethischen Gründen werden in experimentellen Studien keine gravierenden Auswirkungen auf die Gesundheit untersucht. Zielgrößen können neben Veränderungen von physiologischen Parametern auch unspezifische Symptome im Zusammenhang mit der Exposition sein. Aus diesen Veränderungen kann häufig nicht auf ein Krankheitsrisiko geschlossen werden.

In epidemiologischen Studien werden unter Alltagsbedingungen Auswirkungen von Umweltbelastungen auf die Gesundheit untersucht. Die Ergebnisse erlauben eine Beurteilung der realen Situation, insbesondere auch Veränderungen bei längeren Expositionsdauern im Bereich von Monaten und Jahren. Ein Nachteil ist jedoch, dass sich das Ausmass der Hochfrequenzexposition nur mit beträchtlichem Aufwand präzise genug erfassen lässt und dass die Studienteilnehmer immer einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt sind. Daher ist es oft schwierig, die beobachteten Veränderungen der Gesundheit einem bestimmten Expositionsfaktor zuzuordnen. Zudem besteht bei epidemiologischen Studien die Gefahr der Verzerrung durch systematische Fehler in der Methodik, zum Beispiel bei der Rekrutierung der Teilnehmenden.

Für den vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt wurden Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzbelastung durch Mobiltelefone oder andere Geräte, die nahe am Körper betrieben werden, sowie Untersuchungen ohne Quantifizierung der Exposition. Ebenfalls ausgeschlossen waren arbeitsmedizinische Studien, Erfahrungsberichte, Fallbeschreibungen, hypothetische Abhandlungen sowie Arbeiten, die nur als Leserbriefe oder Kongressbeiträge in Form von Referaten, Postern oder Abstracts veröffentlicht wurden. Auch Studien, die nur in osteuropäischen oder asiatischen Sprachen publiziert wurden, konnten nicht berücksichtigt werden. Ebenfalls nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts waren Untersuchungen zu therapeutischen oder telemedizinischen Anwendungen von hochfrequenten Feldern, zu Interferenzerscheinungen mit elektrischen Geräten oder zur Risikowahrnehmung im Zusammenhang mit der Belastung durch nichtionisierende Strahlung.

2.2 Vorgehen bei der Bewertung der Evidenz

Wie bereits in den früheren Berichten wird die **Evidenz** für oder gegen gesundheitliche Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung auf der Basis aller zum jeweiligen Effekt verfügbaren Studien bewertet. Dabei werden die Studien zuerst einzeln zusammengefasst und hinsichtlich ihrer methodischen Qualität beurteilt. Bei der Gesamtbewertung der vorhandenen Studien werden die Argumente für bzw. gegen einen ursächlichen Zusammenhang zwischen Exposition und Effekt in qualitativer Weise dargestellt.

3 > Auswirkungen auf den Menschen

3.1 Struktur des Ergebnisteils

In diesem Kapitel werden die Studien zusammengefasst, die zwischen Oktober 2006 und Dezember 2012 publiziert wurden. Die Darstellung enthält jeweils eine kurze Einführung in die Thematik und eine Zusammenfassung der bisherigen Evidenz. Anschliessend werden die Ergebnisse der neuen Studien zur Exposition durch ortsfeste Sendeanlagen so vorgestellt, wie sie von den Autoren präsentiert wurden. Einige Studien untersuchten mehrere gesundheitliche Auswirkungen und sind deshalb in mehreren Unterkapiteln zu finden. Die methodischen Aspekte der Studie werden dann nur bei der ersten Erwähnung erläutert.

In den Tabellen werden die Ergebnisse den Kategorien «signifikante Assoziation» und «keine oder nicht signifikante Assoziation» zugeordnet. Die Tabellen enthalten folgende Informationen, falls diese aus den Publikationen zu entnehmen waren:

- > **Expositionsquelle**
Es wird angegeben, von welcher Art der Sendeanlage die Exposition stammt.
- > **Dauer der Exposition**
U: unmittelbar (max. 1 Stunde); K: kurz (bis maximal 3 Tage); M: Mittel (3 bis 30 Tage); L: Lang (>1 Monat). In Querschnittstudien wird meistens die momentane Expositionssituation (z. B. am Wohnort) erhoben. Dabei geht man davon aus, dass die Befragten auch längerfristig so exponiert waren. Aus diesem Grund wird die Exposition bei Querschnittstudien 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. Geschätzte Werte sind kursiv gedruckt und mit ~ gekennzeichnet. Anhand der Einheiten ist ersichtlich, um welches Expositions-mass es sich handelt. Angaben in W/kg sind SAR₁₀-Werte, V/m sind elektrische Feldstärken, A/m sind magnetische Feldstärken, W/m² sind Leistungsflussdichten.
- > **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 ein statistisch nicht signifikanter Zusammenhang beobachtet wurde.

- > Bei epidemiologischen Studien zur Untersuchung von Krebs oder anderen Erkrankungen wird das relative Risiko (RR) mit seinem Vertrauensintervall quantifiziert. Diese Angaben sind in der Tabelle enthalten. In der Epidemiologie werden verschieden Risikomasse verwendet, die in erster Näherung vergleichbar sind und die Bedeutung eines relativen Risikos haben, zum Beispiel standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), standardisierte Mortalitätsverhältnisse (SMR), Odds Ratios (OR) oder Hazard Ratios (HR).
- > Besondere Beobachtungen zu den Studien werden in der Spalte «Bemerkungen» notiert.

Am Schluss jedes Unterkapitels wird die vorliegende Evidenz für den jeweiligen Effekt gesamthaft beurteilt. Diese Bewertung schliesst auch die Erkenntnisse aus früheren Studien ein.

3.2

Expositionsvergleich:

Ortsfeste Sendeanlagen versus körpernah betriebene Geräte

Im Alltag gibt es eine Vielzahl von Quellen hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung. Die dadurch für den Menschen entstehenden Belastungen lassen sich nicht direkt miteinander vergleichen. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen Geräten, die körpernah betrieben werden (z. B. Mobil- und Schnurlostelefone), und Strahlungsquellen, die körperfern operieren (z. B. Mobilfunkbasisstationen, Radio- und Fernsehsender). Gemäss der physikalischen Definition liegt die Grenze zwischen Nah- und Fernfeldbedingungen bei Hochfrequenzfeldern im Bereich von einer Wellenlänge, d. h. zum Beispiel bei 1 GHz bei ungefähr 30 cm. Im vorliegenden Bericht sind auftragsgemäss nur Studien aufgeführt, in denen Fernfeldexpositionen untersucht wurden.

Zum Vergleich der Exposition durch Nah- und Fernfeldquellen gibt es erst wenige systematische Untersuchungen. Erwiesen ist, dass körpernahbetriebene Geräte unter alltäglichen Bedingungen zu deutlich stärkeren lokalen Belastungen führen als ortsfeste Sendeanlagen. Der maximal auftretende momentane Energieeintrag durch ein Mobiltelefon am Kopf ist etwa 1000 bis 100 000 Mal stärker als derjenige durch die üblichen Fernfeldquellen (Lauer et al. 2013). Die Expositionsdauer ist bei körpernah betriebenen Geräten jedoch im Allgemeinen weniger lang, und sie nimmt mit zunehmender Distanz vom Gerät sehr stark ab. Fernfeldquellen exponieren den ganzen Körper gleichmässiger, und die Expositionsdauer kann deutlich länger sein. Um diese Belastungsarten zu vergleichen, stellt sich die Frage nach dem biologisch relevanten Expositionsmass. Da dieses für allfällige nicht-thermische Wirkungen unbekannt ist, bietet sich als Vergleichsmass in erster Linie die kumulative Exposition, also die Dosis an; und zwar sowohl bezogen auf den ganzen Körper als auch auf bestimmte Organe, die für Auswirkungen auf die Gesundheit besonders relevant sein könnten.

Ein solcher Vergleich wurde im Rahmen der Qualifex-Studie durchgeführt, die Teil des Schweizerischen Nationalen Forschungsprogramms NFP 57 war (Lauer et al. 2013). Dabei wurden Daten von 166 Personen aus dem Raum Basel verwendet, die zwischen April 2007 und Februar 2008 eine Woche lang ein Messgerät für Hochfre-

quenzfelder bei sich getragen hatten. Aus diesen frequenzspezifischen Messungen liess sich die Fernfeldbelastung abschätzen. Sie betrug im Durchschnitt 0.21 V/m. Zusätzlich wurden die Daten zur Mobil- und Schnurlostelefonbenutzung von mehr als 1300 Studienteilnehmenden ausgewertet. Gemäss objektiver Daten der Mobilfunkbetreiber betrug die mittlere Gesprächsdauer in diesem Kollektiv 26 Minuten pro Woche. Die Verwendung von Schnurlostelefonen wurde von den Teilnehmenden selbst angegeben, die durchschnittliche Gesprächsdauer lag bei 62 Minuten pro Woche. Anhand dosimetrischer Modelle wurde die kumulative Dosis für eine durchschnittlich exponierte Person bezogen auf spezifische Organe oder auf den ganzen Körper berechnet. Da die Sendeleistung von GSM-Mobiltelefonen im alltäglichen Gebrauch im Durchschnitt rund 100 bis 500 Mal höher ist als diejenige von UMTS-Telefonen (Persson et al. 2011, Gati et al. 2009), wurden für diese beiden Systeme separate Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass eine Person entweder nur auf dem GSM- oder nur auf dem UMTS-Netz telefoniert hatte.

In Tabelle 1 sind solche Expositionsvergleiche für den ganzen Körper und für einige ausgewählte Organe aufgeführt. Es ist erkennbar, dass das GSM-Telefon bei durchschnittlicher Benutzung den Hauptbeitrag zur gesamten Hochfrequenzbelastung liefert. Besonders gross ist der Beitrag zur Exposition des Kopfes. Für das Gehirn und andere Strukturen im Kopf tragen Fernfeldquellen nur 2 bis 3 % der kumulativen Exposition bei. Zur Ganzkörperbelastung tragen Fernfeldquellen bei Benutzern von GSM-Telefonen rund 20 % bei. Dagegen ist der Beitrag des Mobiltelefons zur Ganzkörperbelastung bei durchschnittlichen Benutzern von UMTS-Telefonen gering, und der Hauptbeitrag kommt zu etwa gleichen Teilen von Schnurlostelefonen und Fernfeldquellen. Für das Gehirn und andere Strukturen im Kopf dominiert bei durchschnittlichen UMTS-Benutzern die Exposition durch Schnurlostelefone, und Fernfeldquellen machen weniger als 20 % aus, während sie in kopffernen Körperregionen dominieren.

Tab. 1 > Vergleich der kumulativen Expositions-dosis (absorbierte Energie) während 24 Stunden durch Nah- und Fernfeldquellen bei durchschnittlicher Fernfeldbelastung, Handy- und Schnurlostelefonbenutzung

Resultate für durchschnittliche Teilnehmer der Qualifex-Studie im Jahr 2007
(adaptiert nach Lauer et al. 2013).

Organ	GSM-Nutzer (900 MHz)	UMTS-Nutzer	DECT- Schnurlos- telefone	Fernfeld- quellen	Anteil Fernfeld- belastung bei GSM-Nutzung*	Anteil Fernfeld- belastung bei UMTS-Nutzung*
Ganzkörper	111 mJ/kg	0.7 mJ/kg	27 mJ/kg	35 mJ/kg	20.2 %	55.8 %
Gehirn (graue Substanz)	1 002 mJ/kg	5 mJ/kg	197 mJ/kg	42 mJ/kg	3.4 %	17.2 %
Hypothalamus	1 109 mJ/kg	5 mJ/kg	187 mJ/kg	27 mJ/kg	2.0 %	12.3 %
Nervengewebe	23 mJ/kg	0.09 mJ/kg	4 mJ/kg	7 mJ/kg	20.6 %	63.1 %
Rotes Knochenmark	46 mJ/kg	0.2 mJ/kg	9 mJ/kg	20 mJ/kg	26.7 %	68.5 %
Hoden	0.7 mJ/kg	0.001 mJ/kg	0.03 mJ/kg	76 mJ/kg	99.0 %	100.0 %

* Separate Berechnung unter der Annahme einer ausschliesslichen GSM- oder UMTS-Nutzung.

Aus diesen Abschätzungen lässt sich schliessen, dass die Exposition des Kopfes, sowohl kurzfristig als auch über die Zeit kumuliert, vor allem durch Mobil- und Schnurlostelefone bedingt ist. Für die Langzeitexposition anderer Organe hingegen sind auch Fernfeldquellen relevant.

Diese Abschätzungen basieren auf einer Reihe von Annahmen und beinhalten grosse Unsicherheiten. Zudem stellt sich die Frage, inwiefern die Expositionsdaten aus den Jahren 2007 und 2008 noch die gegenwärtige Mobiltelefonbenutzung widerspiegeln. Beispielsweise dürfte heutzutage die Internetnutzung mit Smartphones expositionsrelevant sein, die damals noch kaum eine Rolle spielte. Ausserdem ist unklar, ob die kumulative Dosis das richtige biologische Expositionsmass ist. Möglicherweise sind Spitzenbelastungen relevant, die hauptsächlich durch körpernah betriebene Geräte verursacht werden. Auf der anderen Seite wurde auch spekuliert, dass der Körper auf Expositionen während der Nacht, die hauptsächlich von Fernfeldquellen stammen, sensibler reagieren könnte.

3.3 Ausgangslage: Evidenz bis September 2006

Die beiden früheren Syntheseberichte zur Hochfrequenzstrahlung basierten auf ungefähr 350 Studien am Menschen, die bis September 2006 publiziert worden waren (UM 162 und UW 0722). Der weitaus grösste Teil der Studien betraf die Exposition durch Mobiltelefone. Zur Fernfeldbelastung, wie sie in der Umgebung von Rundfunksendern oder Mobilfunkbasisstationen entsteht, gab es bis 2006 noch wenige Studien. Ein Grund dafür war, dass noch keine Messgeräte zur Erfassung der individuellen Hochfrequenzbelastung durch Sendeanlagen zur Verfügung standen. Solche Geräte, auch «Exposimeter» genannt, kamen erst in den darauf folgenden Jahren auf den Markt und konnten dann auch für epidemiologische Studien eingesetzt werden.

Daher bezog sich die Beurteilung des wissenschaftlichen Kenntnisstands im Bericht UW 0722 hauptsächlich auf die Belastung durch Mobiltelefone, also auf die Nahfeldexposition (BAFU 2007). Hinsichtlich der Fernfeldexposition durch Sendeanlagen wurde keine gesundheitliche Auswirkung als «wahrscheinlich» eingestuft.

Es gab zwei Effekte, die als «möglich» bezeichnet wurden, das heisst, es hatten sich vereinzelt Hinweise für einen Zusammenhang ergeben: Zum einen bestanden Hinweise auf einen Anstieg des Risikos für Tumoren des blutbildenden und lymphatischen Systems (z.B. Leukämien und Lymphome) in der Umgebung von stark sendenden Rundfunksendern. Zum anderen wurde – basierend auf einer Studie mit mehreren Auswertungen – als möglich bewertet, dass die Emissionen von starken Kurzwellen-Radiosendern die Schlafqualität der Anwohner beeinträchtigen können.

Aufgrund der geringen Anzahl an Studien zur Exposition durch Sendeanlagen war die Evidenz im Bericht UW 0722 für mehrere Zielgrössen nicht beurteilbar. Dazu gehörten Auswirkungen auf Herzkreislauffunktionen oder den Hormonhaushalt sowie das Auftreten von unspezifischen Beschwerden bei Anwohnern in der Umgebung von Rundfunksendern oder Mobilfunkbasisstationen.

Auch die Datenlage insgesamt wurde zum damaligen Zeitpunkt als sehr lückenhaft beurteilt. Insbesondere fehlten Langzeitstudien an Menschen, und es lag nur eine einzige Studie zu Auswirkungen auf die Gesundheit der Anwohner in der Umgebung von Basisstationen vor, die wissenschaftlichen Ansprüchen genügte. Daher liess sich nicht beurteilen, ob die in der Schweiz geltenden Grenzwerte auch vor potenziellen

Langzeitschäden genügend Schutz boten. Dies galt auch für Expositionen im Bereich der Anlagegrenzwerte der NISV. Daher wurde neben der Beibehaltung des vorsorgeorientierten Ansatzes auch die Durchführung von grösseren Bevölkerungsstudien mit individueller Expositionsmessung empfohlen.

Nach der Veröffentlichung des Berichts UW 0722 wurden in mehreren Ländern grosse Forschungsprogramme durchgeführt. Eines davon war das Nationale Forschungsprogramm «Nichtionisierende Strahlung – Umwelt und Gesundheit» (NFP 57) in der Schweiz. Im Rahmen dieses Programms wurden verschiedene experimentelle und epidemiologische Studien, aber auch Untersuchungen zur Expositionsmessung und zur Risikowahrnehmung realisiert. Die Ergebnisse dieser Studien sind im vorliegenden Bericht enthalten, soweit sie die Hochfrequenzexposition durch Sendeanlagen betrafen und die Publikationen die Einschlusskriterien erfüllten. Umfassende Informationen zum NFP 57 mit der Auflistung aller Projekte und Publikationen sind zu finden unter: www.nfp57.ch

3.4 Physiologische Wirkungen

3.4.1 Hormonsystem

Zu Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf den Hormonstoffwechsel gibt es insgesamt nur wenige Studien. Bei dieser Frage standen die niederfrequenten Magnetfelder im Vordergrund der Forschung. Wie in den beiden früheren Syntheseberichten erwähnt, betrafen die wenigen Studien zur hochfrequenten Exposition den Melatoninstoffwechsel, aber auch die Schilddrüsenhormone (Trijodthyronin und Thyroxin) sowie die Stresshormone Kortison, Adrenalin und Noradrenalin. Die Ergebnisse der Studien waren nicht einheitlich, und ihre Vergleichbarkeit war durch Unterschiede im Studiendesign und in der Expositionsart eingeschränkt.

Aus den Studien, die für den Bericht UW 0722 vorlagen, ergaben sich am ehesten Hinweise auf eine supprimierende Wirkung der Hochfrequenzexposition auf die Melatoninausschüttung. Die Datenlage zu Auswirkungen auf die Schilddrüsenhormone oder andere Hormone war noch spärlicher als zum Melatonin. Eine Beurteilung der Evidenz war daher nicht möglich, und es wurden grössere Studien zum Melatoninstoffwechsel empfohlen.

Die meisten der bis dahin vorliegenden Studien hatten die Hochfrequenzbelastung durch Mobiltelefone betroffen, nur in einer Arbeit war eine ortsfeste Sendeanlage untersucht worden. Diese Studie bei Anwohnern in der Umgebung des Kurzwellen-Radiosenders Schwarzenburg hatte zunächst keinen Zusammenhang zwischen Exposition und Melatoninproduktion gezeigt (Altpeter et al. 1995). Einige Jahre später hatte in der so genannten «Shut-down-Studie», in der 54 Anwohner kurz vor und nach der endgültigen Abschaltung des Radiosenders im März 1998 untersucht worden waren, nach dem Expositionsende ein tendenzieller Anstieg der Melatoninausschüttung bei Personen mit schlechtem Schlaf bestanden (Altpeter et al. 2006). Diese Beobachtung

Einführung

ist kompatibel mit einer supprimierenden Wirkung der Hochfrequenzexposition, so lange der Sender in Betrieb war.

Seit dem Bericht UW 0722 sind drei epidemiologische und eine experimentelle Studie zu Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder von Sendeanlagen auf den Hormonhaushalt publiziert worden.

In einer Querschnittsstudie wurde der Östrogen- und der Melatoninstoffwechsel von Frauen untersucht, die in Denver im US-Bundesstaat Colorado in der Nähe von Radio- und Fernsehsendern wohnten (Clark et al. 2007). Die Hochfrequenzexposition (0.1 bis 3000 MHz) wurde im Freien und in mehreren Zimmern der Wohnungen gemessen und daraus ein Durchschnittswert für die ganze Wohnung berechnet. Zusätzlich berücksichtigt wurde die mittlere Entfernung der Wohnung von den 15 wichtigsten Rundfunksendern, der Anteil sichtbarer Sendeanlagen und die Höhenlage des Gebäudes (über dem Meeresspiegel). Die Gesamtpopulation der Studie bestand aus 576 Häusern und 1375 Personen, die zwischen September 2002 und Dezember 2003 in der Studienregion wohnten. Aus dieser Population wurden 280 Männer und Frauen zufällig ausgewählt, die in 161 Häusern mit unterschiedlicher Exposition wohnten (Alter: >8 Jahre, Teilnahmerate: 64%). Für die Auswertung zum Hormonhaushalt standen Daten von 56 prä- und 27 postmenopausalen Frauen zur Verfügung. Der Untersuchungszeitraum umfasste 2.5 Tage. Von allen Teilnehmerinnen wurden während der ersten und letzten Nacht Urinproben gesammelt und auf Melatonin- und Östrogenstoffwechselprodukte untersucht. Die Probandinnen wurden in Expositionsquartile eingeteilt. Die Mittelwerte der Leistungsflussdichte in den Quartilen lagen bei 0.04, 0.2, 0.4 und 1.4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Das entspricht 0.4, 0.9, 1.2 und 2.3 V/m. Beim Vergleich zwischen den Quartilen wurden zusätzliche Einflussfaktoren berücksichtigt, je nach Auswertung gehörten dazu die Einnahme von Anti-Baby-Pillen, Stadium des Menstruationszyklus, Ernährungsverhalten, Rauchen und Body Mass Index. Für prämenopausale Frauen (n=56) ergaben sich keine statistisch signifikanten Zusammenhänge zwischen der Hochfrequenzexposition und der Hormonausschüttung. Das galt sowohl für den Östrogenmetaboliten (E1G) als auch für das Melatoninabbauprodukt (6-OHMS). In der Gruppe der postmenopausalen Frauen (n=27) war die Östrogenkonzentration im obersten Expositionsquartil ($>1.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) statistisch signifikant höher als im untersten Quartil ($0.04 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $p=0.02$). Am deutlichsten war der Zusammenhang in der Subgruppe der Frauen mit niedrigem Melatoninspiegel (n=14). Für die Melatoninproduktion war auch bei postmenopausalen Frauen kein Zusammenhang mit der Exposition zu beobachten. [Wegen des Querschnittsdesigns der Studie lässt sich nicht beurteilen, ob die Unterschiede in der Östrogenkonzentration bei postmenopausalen Frauen erst nach der Hochfrequenzbelastung bestanden oder bereits vorher. Ebenfalls unklar ist die klinische Relevanz der beobachteten Unterschiede. Zudem befanden sich bei einer Gesamtzahl von 27 postmenopausalen Frauen nur jeweils 6 bis 7 Frauen in den einzelnen Expositionsquartilen, die genaue Anzahl ist nicht angegeben. Dadurch war es nur sehr beschränkt möglich, Störgrößen in der Analyse zu berücksichtigen.]

Resultate

Die Publikation von Augner et al. 2010 bezieht sich auf eine Feldinterventionsstudie, deren Resultate zu unspezifischen Beschwerden bereits in einer früheren Publikation veröffentlicht wurden (Augner et al. 2009, siehe Kapitel 3.4). Neben diesen Symptomen wurden auch die Speicherkonzentrationen von Alpha-Amylase, Immunglobulin A

(IgA) und Kortison als Marker für Stressreaktionen untersucht. Die 57 Teilnehmer befanden sich in einem Gebäude, an dessen Aussenwand eine Mobilfunkbasisstation (GSM 900 MHz) angebracht war. Wie aus der früheren Veröffentlichung hervorgeht, bezeichneten sich 8 Probanden (14.3%) als hypersensibel. Die Mauer des Versuchsraums war bis auf eine Teilfläche mit einem Abschirmanstrich auf Kohlenstoffbasis gestrichen. Durch das Anbringen von Schirmvorhängen bzw. Scheinabschirmung vor diesem «Immissionsfenster» wurde die Exposition der Probanden variiert. Die Teilnehmer wurden zufällig einem von drei Expositionsszenarien zugeordnet. Jedes Szenario bestand aus fünf Expositionsphasen à 50 Minuten, die sich in ihrer Intensität unterschieden: niedrig («L»; Median: 0.044 V/m), mittel («M»; Median: 0.241 V/m) und hoch («H»; Median: 0.895 V/m). In den ersten beiden Szenarien (HM und MH) bestand die erste, dritte und fünfte Sitzung aus niedriger Exposition. In Szenario HM (n=22) war die Intensität in der zweiten Sitzung hoch und in der vierten Sitzung mittel, in Szenario MH (n=26) umgekehrt. Im dritten Szenario LL (n=9) erfolgten die ersten vier Sitzungen unter maximaler Abschirmung mit niedriger Exposition, nur die fünfte unter voller Befeldung. Während jeder Expositionsphase wurden drei Speichelproben entnommen, jeweils nach 10, 25 und 45 Minuten. Als Vergleich dienten die Mittelwerte jedes Teilnehmers während der ersten Expositionsphase bei maximaler Abschirmung. Die Analysen ergaben keinen statistisch signifikanten Einfluss des Expositions-szenarios auf die Konzentrationen der drei Parameter. Eine zusätzliche Auswertung der einzelnen Expositionsphasen zeigte in der Phase mit der stärksten Exposition einen signifikanten Anstieg der Kortisonkonzentration bei Personen im Szenario 3 (n=9, p=0.002), aber nicht in den Szenarien 1 (n=22) und 2 (n=29).

Buchner et al. 2011 berichten über eine Kohortenstudie, in der die Neurotransmitter Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin bei Bewohnern eines Dorfes in Niederbayern vor und nach Errichtung einer Mobilfunkbasisstation untersucht wurden. Im Frühling 2004 wurde auf der dem Dorf gegenüberliegenden Talseite ein kombinierter GSM-Mobilfunksender (D1- und D2-System, 900 MHz) mit jeweils 2 Antennengruppen errichtet (Höhe: 7.9 m). Von den 2000 Einwohnern des Dorfes nahmen 60 Personen an der Studie teil (29 Erwachsene und 31 Kinder). Die Mobilfunkbelastung wurde an der Aussenseite der Häuser gemessen. Die Auswertungen basierten auf Spitzenwerten der Leistungsflussdichte, der Durchschnitt lag bei 76.9 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (0.17 V/m). [Ob es sich dabei um zeitliche oder örtliche Spitzenwerte handelte, ist in der Publikation nicht angegeben]. Es wurden drei Exposisionskategorien mit den Trennpunkten 60 und 100 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (0.15 und 0.19 V/m) gebildet. Die Bestimmung der Neurotransmitter-Konzentrationen im Urin erfolgte vor Installation der Mobilfunksendeanlage im Januar 2004 und nach der Inbetriebnahme im Juli 2004 sowie im Januar 2005 und im Juli 2005. Der Vergleich der medianen Messwerte ergab, dass Adrenalin und Noradrenalin im Juli 2004 in den beiden oberen Belastungskategorien höher waren als vor Errichtung der Sendeanlage. Bis Juli 2005 gingen die Werte wieder ungefähr auf Ausgangsniveau zurück. In der Referenzgruppe (<60 $\mu\text{W}/\text{m}^2$) war der Anstieg geringer. Der Anstieg von Adrenalin und Noradrenalin in den ersten Monaten war bezogen auf das Gesamtkollektiv statistisch signifikant (p<0.002). Zwischen den drei Expositionsgruppen bestanden aber gemäss den Medianwerten und Konfidenzintervallen in den Tabellen keine signifikanten Unterschiede. Die Dopaminwerte verhielten sich gegenläufig: im Juli 2004 waren sie in allen drei Exposisionskategorien signifikant niedriger als zu Beginn der Studie, danach wurden wieder höhere Werte gemessen. Zwischen den

Expositionsgruppen bestanden erneut keine signifikanten Unterschiede. Die Autoren sehen in den Resultaten Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der Hochfrequenzbelastung und dem Verlauf der Neurotransmitter-Konzentrationen. [Diese Schlussfolgerung ist nicht nachvollziehbar, weil die signifikanten Unterschiede das Gesamtkollektiv betrafen und sich auf die vier Messzeitpunkte bezogen. Zwischen den Expositions-kategorien bestanden dagegen zu keinem Zeitpunkt statistisch signifikante Unterschiede in den Hormonkonzentrationen, wie die in den Tabellen angegebenen Konfidenzintervalle der Medianwerte zeigen. Diese Konzentrationen variierten auch innerhalb der Gruppen beträchtlich, und es handelte sich um sehr heterogene Gruppen, die sich aus Erwachsenen und Kindern zusammensetzten. In der Referenzgruppe lag der Anteil der Kinder unter 10 Jahren nur bei 37 %, in den anderen beiden Gruppen dagegen bei ca. 60 %. Ob sich unter den Teilnehmern Mitglieder derselben Familie befanden, wurde nicht berücksichtigt. Unklar ist, wie sich die Exposition der einzelnen Teilnehmer durch das Einschalten der Basisstation veränderte und wie die Trennpunkte der Expositions-kategorien festgelegt wurden. Da die drei Gruppen nicht gleich gross waren, handelte es sich offenbar nicht um Terzile der Expositionsverteilung. Zudem war die Belastung im ganzen Kollektiv niedrig, und die Unterschiede zwischen den Kategorien gering.]

In einer ägyptischen Studie wurden mehrere Hormone im Blut von 34 Personen untersucht, die in unterschiedlicher Entfernung von einer Mobilfunkbasisstation wohnten (Eskander et al. 2012). Jeweils 17 Personen im Alter von 14 bis 22 Jahren und im Alter von 25 bis 60 Jahren wurden für die Studie ausgewählt. Einige Teilnehmer lebten in Entfernungen von 20 bis 100 m, die anderen in Distanzen von 100 bis 500 m (genaue Zahlen nicht angegeben). Weitere 10 Personen pro Altersgruppe wohnten mehr als 500 m von einer Basisstation entfernt und dienten als Kontrollen. Bezüglich der Basisstation geht aus der Publikation lediglich hervor, dass es sich um ein GSM-Signal (950 MHz) handelte. Die Bestimmung der Hormonkonzentrationen erfolgte nach einem, drei und sechs Jahren und umfasste die Hormone ACTH (=Adrenokortikotropes Hormon), Kortison, die Schilddrüsenhormone T3 und T4 sowie Prolaktin, Progesteron (nur bei Frauen) und Testosteron (nur bei Männern). Die Vergleiche der durchschnittlichen Hormonkonzentrationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten zwischen den verschiedenen Expositionsgruppen und den Kontrollpersonen ergaben zahlreiche statistisch signifikante Unterschiede ($p < 0.01$). Unter anderem waren die ACTH- und Kortisonspiegel sowie die Schilddrüsenhormone (T3, T4) der Basisstationsanwohner nach 6 Jahren signifikant niedriger als in der Kontrollgruppe. Für Progesteron bestanden keine statistisch signifikanten Unterschiede. Bei den Männern war das Testosteron in den exponierten Gruppen zum letzten Messzeitpunkt signifikant niedriger als in der jeweiligen Kontrollgruppe. [In der Publikation fehlen entscheidende Informationen, insbesondere zur Auswahl und zur Zusammensetzung der beiden Probandengruppen. Weder die Anzahl von Frauen und Männern ist erwähnt, noch das Durchschnittsalter. Auch die Grösse der beiden exponierten Gruppen ist unklar. Ausserdem fehlen Angaben zu Vorerkrankungen der Probanden und anderen Einflussfaktoren auf den Hormonhaushalt, z. B. Schwangerschaft, Menstruationszyklus oder Medikamenteneinnahme. Auch in der statistischen Auswertung wurden offenbar keinerlei zusätzliche Einflussfaktoren berücksichtigt. Ebenfalls unklar ist, ob sich das Ausmass der Basisstationsexposition während der 6 Jahre verändert hat. Zudem sagt die geschätzte Distanz bis zur nächsten Basisstation nichts über die tatsächliche Hochfrequenzbelastung am Wohnort aus

(Baliatsas et al. 2011, Frei et al. 2010). Ebenfalls fraglich ist, ob Altersgruppen von 14 bis 22 und 25 bis 60 Jahren in Bezug auf den Hormonhaushalt sinnvoll sind. Insgesamt lassen sich aus dieser Untersuchung keine Schlussfolgerungen bezüglich Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf die Hormonproduktion ableiten. Daher werden die Ergebnisse nicht in die Tabelle aufgenommen.]

Die Hinweise auf eine Verminderung der Melatoninausschüttung durch Hochfrequenzexposition, die in Bericht UW 0722 bestanden, werden durch die einzige neue Studie zum Zusammenhang zwischen Basisstationsexposition und Melatoninstoffwechsel nicht bestätigt. Bei der Assoziation bezüglich des Östrogens in der Untergruppe der postmenopausalen Frauen in derselben Studie handelt es sich bisher um einen Einzelbefund. In der experimentellen Studie bestand nur in einer Subgruppenanalyse eine Differenz bezüglich des Kortisons. Die Feldstudie aus Bayern ergab einen Anstieg des Adrenalin- und Noradrenalinspiegels und eine Abnahme der Dopaminwerte nach der Inbetriebnahme einer Mobilfunkbasisstation, aber keine Unterschiede zwischen den Expositionskategorien. Insgesamt sind die bisher vorliegenden Studien, die auf kleinen Stichproben basieren und teilweise erhebliche methodische Mängel aufweisen, für die Evidenzbewertung wenig aussagekräftig.

Bewertung

Tab. 2 > Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf das Hormonsystem

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Clark et al. 2007	Radio- und TV-Sender	L	55 bis 687	Wohnungsmittelwert: 1.4 vs. 0.04 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (2.3 vs. 0.4 V/m)		+ Östrogen bei postmenopausalen Frauen (17.2 vs. 8.4 ng/ml)	Östrogen bei prämenopausalen Frauen Melatonin bei prä- und postmenopausalen Frauen
Augner et al. 2010	Mobilfunkbasisstation, Abstand ca. 6 m, Downlink-Signal, Mikrozeile (Durchmesser: 50 cm)	K	GSM 900	3 Expositionsszenarien mit jeweils fünf Expositionsphasen à 50 Minuten mit verschiedener Intensität (Median): 0.04, 0.24, 0.9 V/m	0.3	+ Kortison im Speichel in Szenario 3 in der Phase mit hoher Exposition (n=9)	Alpha-Amylase, Immunglobulin A, Kortison im Speichel in den Szenarien 1 (n=22) und 2 (n=26)
Buchner et al. 2011	Mobilfunkbasisstation mit jeweils 2 Antennengruppen (D1 und D2)	L	GSM 900	Durchschnitt im Gesamtkollektiv: 76.9 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (0.17 V/m), Referenzgruppe: <60 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (0.15 V/m), mittlere Kategorie: 60–100 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (0.15–0.19 V/m), obere Kategorie: >100 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (0.19 V/m)		In den ersten 6 Monaten nach Einschaltung der Sendeanlage im Gesamtkollektiv (p-Werte <0.005): + Adrenalin und Noradrenalin - Dopamin	Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Expositionskategorien: Adrenalin, Noradrenalin, Dopamin

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16; L=Langzeit, K=Kurzzeit, übrige Abkürzungen siehe Glossar

3.4.2 Gehirnphysiologie (Hirnströme, Durchblutung) und Verhalten

Mithilfe der Elektroenzephalographie (EEG) werden Potenzialdifferenzen am Kopf registriert, deren Zeitlauf als Indikator für die Aktivität des Gehirns dient. Untersucht wird meist der Frequenzbereich von etwa 0 bis 50 Hz. Man unterscheidet zwischen den Deltawellen (δ : 1 bis 4 Hz), den Thetawellen (θ : 5 bis 8 Hz), den Alphawellen (α : 8 bis 11 Hz), den Sigmaxwellen (σ : 12–15 Hz), den Betawellen (β : 16 bis 27 Hz) und den Gammawellen (γ : 27 bis 50 Hz). Diesen Frequenzbändern lassen sich unterschiedliche Vigilanzzustände zuordnen. Beispielsweise sind Deltawellen charakteristisch für den Tiefschlaf und Alphawellen für den wachen, entspannten Zustand.

Die meisten im Bericht UW 0722 erfassten Studien hatten die Mobiltelefonexposition untersucht. Sie hatten wiederholt Hinweise auf eine Beeinflussung des spontanen EEGs im Bereich des Alpha-Bands (8 bis 13 Hz) ergeben, vereinzelt auch Veränderungen des Beta-Bands (13 bis 27 Hz). Daher war die Evidenz für Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf das Spontan-EEG in Ruhe oder Schlaf als «wahrscheinlich» beurteilt worden. Veränderungen der Durchblutung oder des Stoffwechsels im Gehirn waren noch nicht beurteilbar gewesen.

Zur Ganzkörperbelastung durch Hochfrequenzfelder einer ortsfesten Sendeanlage hatte bis 2006 nur eine Studie vorgelegen (Hinrichs et al. 2005). Darin waren 13 Probanden unter Doppelblindbedingungen über Nacht einer GSM-Antenne in 1.5 m Entfernung (Feldstärke: 30 V/m) ausgesetzt worden. Die Auswertung der EEG-Aufzeichnungen hatte keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Exposition und Scheinexposition ergeben.

In den letzten Jahren sind keine neuen Studien zu Auswirkungen der Ganzkörperexposition auf die Hirnströme erschienen. Das deutet darauf hin, dass es für die meisten Forschungsgruppen prioritär war, die Resultate der Studien mit starker Exposition des Kopfes durch Mobiltelefone zu überprüfen, bevor sie Auswirkungen der wesentlich niedrigeren Ganzkörperexposition untersuchten.

In einer neuen Studie wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen der Hochfrequenzexposition im Alltag und Verhaltensauffälligkeiten bei Kindern bestand (Thomas et al. 2010). An dieser Querschnittsstudie beteiligten sich 1484 Kinder (8 bis 12 J.) und 1508 Jugendliche (13 bis 17 J.) in Bayern, die Teilnahmerate lag bei 52 %. Mithilfe eines tragbaren Messgeräts wurden 24-Stunden-Messungen der Hochfrequenzfelder durchgeführt, die die Frequenzbereiche GSM 900, GSM 1800, UMTS 2100, DECT und WLAN umfassten. Die Evaluation des Verhaltens basierte auf dem «Strength and Difficulties»-Fragebogen. Die Auswertungen zeigten für Kinder keinen Zusammenhang zwischen der Hochfrequenzexposition und Verhaltensauffälligkeiten. Jugendliche im obersten Belastungsquartil hatten ein statistisch signifikant höheres Risiko für Verhaltensauffälligkeiten als Jugendliche in der untersten Expositionskategorie (OR: 2.2, 95 %-CI: 1.1–4.5). Dieses Resultat war hauptsächlich auf Unterschiede in den Subskalen «Schwierigkeiten im Benehmen» (OR: 3.7, 95 %-CI: 1.6–8.4) und «Hyperaktivität» (OR: 2.1, 95 %-CI: 0.9–4.8) zurückzuführen. [Die Aussagekraft der Studie ist eingeschränkt, da sich die Reihenfolge des Auftretens der Exposition und der Verhaltensprobleme in einer solchen Querschnittsstudie nicht beurteilen lässt. Ausserdem

Resultate

beeinflusst auch die Benutzung des eigenen Mobiltelefons die 24-Stunden-Belastung, und es ist unklar, wie stark die Gesamtexposition mit der Mobiltelefonbenutzung korreliert (vgl. Frei et al. 2010).]

Da keine neuen Studien zu Auswirkungen der Fernfeldbelastung auf die Hirnströme oder andere Gehirnparameter vorliegen, lassen sich allfällige Zusammenhänge weiterhin nicht beurteilen. Auch zu Auswirkungen auf das Verhalten von Kindern und Jugendlichen gibt es sonst nur Studien zur Mobiltelefonexposition (z. B. Divan et al. 2008, Guxens et al. 2013). Daher ist auch zu dieser Zielgrösse noch keine Beurteilung möglich.

Bewertung

Tab. 3 > Studie zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf das Verhalten

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Thomas et al. 2010	Alle Hochfrequenzquellen im Alltag	L	GSM 900, GSM 1800, UMTS 2100, DECT, WLAN	Oberstes vs. unterstes Quartil (in % vom ICNIRP-Referenzwert); Kinder: 0.20 % vs. 0.15 % Jugendliche: 0.21 % vs. 0.15 %	+ Verhaltensauffälligkeiten bei Jugendlichen	Verhaltensauffälligkeiten bei Kindern

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16; L=Langzeit, übrige Abkürzungen siehe Glossar

3.4.3 Kognitive Funktionen

Die ersten Studien, in denen Auswirkungen der Mobiltelefonexposition auf die Gehirnleistung untersucht worden waren, hatten ziemlich einheitlich eine Verkürzung der Reaktionszeiten ergeben. Die Ergebnisse der nächsten Untersuchungen in den Jahren 2003 bis 2006 waren jedoch weniger einheitlich: In einigen Studien waren längere Reaktionszeiten beobachtet worden, in mehreren anderen hatten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Exposition und Scheinexposition gezeigt. Daher war die Evidenz für kurzfristige Effekte der Mobiltelefonexposition auf die kognitiven Funktionen im Bericht UW 0722 gegenüber der Einschätzung in UM 162 von «wahrscheinlich» auf «möglich» zurückgestuft worden.

Zur Ganzkörperbelastung unter Fernfeldbedingungen hatten bis September 2006 zwei experimentelle und zwei epidemiologische Studien vorgelegen. Die so genannte TNO-Studie hatte bei UMTS-ähnlicher Exposition in einem von dreissig Tests einen signifikanten Unterschied ergeben (Zwamborn et al. 2003). In einer erweiterten Replikationsstudie waren unter dem gleichen und einem zehnfach stärkeren UMTS-ähnlichen Signal keine statistisch signifikanten Veränderungen zu beobachten gewesen (Regel et al. 2006). Auch eine österreichische Bevölkerungsstudie in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen hatte wenig Hinweise auf einen Expositionseffekt ergeben (Hutter et al. 2006). In einer ägyptischen Studie hatte die exponierte Gruppe in 3 von 10 Tests bessere Resultate erzielt als die Kontrollgruppe und in einem schlechtere. Allerdings war der tatsächliche Expositionsstatus der Teilnehmer wegen fehlender Angaben unklar (Abdel-Rassoul et al. 2007).

In den meisten Studien zu kognitiven Funktionen werden Lernprozesse untersucht. Dafür gibt es eine Vielzahl von Tests, die entweder das deklarative Lernen (Faktenwissen) oder das prozedurale Lernen (Fertigkeiten) testen. Zudem kann es sich um visuelles oder auditives Lernen handeln, und die Tests können das Arbeits- oder das Kurzzeitgedächtnis betreffen. Je nach Test sind unterschiedliche Hirnregionen in den Lernprozess involviert. Durch diese Vielzahl von Tests lassen sich die Ergebnisse der verschiedenen Studien schlecht vergleichen. Zudem wird die Leistungsfähigkeit des Gehirns von der Tageszeit, von Schlafdefiziten, vom Gesundheitszustand sowie von der Einnahme von Medikamenten oder Drogen beeinflusst.

Seit dem Bericht UW 0722 sind vier neue Studien erschienen, in denen Auswirkungen der Hochfrequenzexposition von Sendeanlagen auf kognitive Funktionen untersucht wurden.

An der randomisierten, doppelt verblindeten Crossover-Studie von Riddervold et al. 2008 nahmen 40 Erwachsene (25 bis 40 Jahre) und 40 Jugendliche (15 bis 16 Jahre) teil. Die Exposition bestand aus einem basisstationsähnlichen UMTS-Signal (2140 MHz) einer Laborantenne im Abstand von 2.8 Metern. Die elektrische Feldstärke variierte zwischen 0.9 und 2.2 V/m. Ausgewertet wurden zwei Expositionsphasen, die jeweils 45 Minuten dauerten und aus einem UMTS-modulierten Signal mit allen Kontrollkanälen sowie Scheinexposition bestanden. Die kognitiven Leistungstests fingen fünf Minuten nach dem Expositionsbeginn an. Verwendet wurde eine Testbatterie zur einfachen und komplexen Reaktionszeit, zur visuellen Prozessverarbeitung, zum visuellen Gedächtnis und zur prozeduralen Lernfähigkeit. Als primäre Zielgrösse diente der Gesamtpunktwert im «Trail Making Test B» (TMB), der verschiedene kognitive Funktionsbereiche abdeckt (psychomotorische Geschwindigkeit, Aufmerksamkeit und Exekutivfunktion). Die separate Auswertung der erzielten Punktwerte bei Jugendlichen und bei Erwachsenen ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der UMTS-Exposition und der Scheinexposition. Der geometrische Mittelwert war bei realer Exposition in der Gruppe der Erwachsenen um -3.2 % (95 %-CI: -9.2 % bis +2.9 %) niedriger als bei Scheinexposition und bei Jugendlichen um +5.5 % (95 %-CI: -1.1 % bis +12.2 %) höher. Die Fehlerhäufigkeit war weder bei Erwachsenen noch bei Jugendlichen signifikant mit der Exposition assoziiert.

Resultate

Furubayashi et al. 2009 untersuchten bei 11 Frauen mit und 43 Frauen ohne mobiltelefonbezogene Beschwerden in einer Doppelblindstudie die Reaktionsgeschwindigkeit. Es gab 4 Expositionsbedingungen: kontinuierlich, intermittierend (5 Minuten an, 5 Minuten aus), Scheinexposition mit Lärm und Scheinexposition ohne Lärm. Alle Teilnehmerinnen durchliefen die vier Expositionen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen, so dass an beiden Tagen zwei Expositionssitzungen à 30 Min. im Abstand von mindestens 2 Stunden stattfanden. Es wurde eine Hornantenne mit einer Höhe von 1.15 m verwendet, die sich im Abstand von 3 m links hinter den Testpersonen befand. Die Exposition bestand aus einem Downlink-Signal (W-CDMA) mit einer Frequenz von 2.14 GHz. Vor und nach jeder Expositionsbedingung führten die Probanden einen Wahlreaktionstest («precued choice reaction time task», PCRT) durch, den sie am Tag vor der Testung geübt hatten. Die Auswertungen zeigten keine expositionsabhängige Veränderung der Reaktionszeiten. [Die Reihenfolge der Testbedingungen wurde bei der Auswertung berücksichtigt. Unklar ist, ob die Tests für alle Probandinnen zur

gleichen Tageszeit stattfanden und ob tageszeitabhängige Schwankungen in Betracht gezogen wurden.]

Eine doppelt verblindete Crossover-Studie aus Grossbritannien betraf die Auswirkungen von GSM- und UMTS-Basisstationssignalen (Eltiti et al. 2009). An der Untersuchung nahmen 44 Personen mit EHS und 115 Kontrollpersonen teil. Alle Probanden absolvierten vier Sitzungen (Basisuntersuchung, GSM, UMTS, Scheinexposition), jeweils ungefähr zur gleichen Tageszeit. Die Laborantenne befand sich 5 m von den Probanden entfernt. Die Testung der Hirnleistung erfolgte während der Exposition resp. Scheinexposition. Sie umfasste Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis (Kopfrechnen), zu Aufmerksamkeit und Verarbeitungsgeschwindigkeit (Zahlen-Symbol-Test, «digit symbol substitution») sowie zum Kurzzeitgedächtnis (Wiedergeben von Zahlenreihen, «forward digit span»). Wegen des Altersunterschieds zwischen den beiden Teilnehmergruppen wurde der Vergleich auf 44 EHS- und 44 Kontrollpersonen mit jeweils passendem Alter beschränkt. Die statistischen Auswertungen ergaben keine signifikanten Expositionseffekte, wenn die Resultate für multiple Testung korrigiert wurden (Signifikanzniveau: 0.017). Ohne diese Korrektur war die kognitive Leistung der EHS-Personen im Test zum Kurzzeitgedächtnis bei GSM- und bei UMTS-Exposition schlechter als bei Scheinexposition ($p=0.019$ respektive 0.030). In der zusätzlichen Analyse innerhalb der gesamten Kontrollgruppe ($n=115$) zeigten sich für keinen der drei Tests Auswirkungen der Exposition auf die Hirnleistungen ($p>0.18$). [Die Aussagekraft der Studie ist dadurch eingeschränkt, dass die Expositionsreihenfolge innerhalb des Kollektivs nicht ganz ausgeglichen war. Der Grund dafür war, dass die ursprünglich angestrebte Anzahl von 264 Teilnehmern nicht erreicht wurde. In der statistischen Auswertung wurde dies jedoch berücksichtigt.]

Das Mobilfunksystem TETRA («Terrestrial Trunked Radio»), das für Polizei- und Notfalldienste verwendet wird, war Gegenstand der randomisierten Crossover-Studie von Wallace et al. 2012. Den ersten Teil bildete eine offene Provokationsstudie, an der anschliessenden Doppelblindstudie nahmen 48 Personen mit EHS und 132 Kontrollpersonen teil. Während der 50-minütigen Exposition durch eine TETRA-Antenne (420 MHz, ca. 2 V/m) im Abstand von ungefähr 5 Metern respektive während der Scheinexposition wurden Auswirkungen der TETRA-Exposition auf Kreislaufparameter bei mentaler Anstrengung untersucht. Die Studie umfasste einen Test zum Kurzzeitgedächtnis (Backward digit span test, Bspan) und einen Test zum Arbeitsgedächtnis (Operation span, OSPAN). Für den Bspan-Test lagen Ergebnisse von 36 EHS- und 107 Kontrollpersonen vor, für den OSPAN-Test von 43 EHS- und 125 Kontrollpersonen. In beiden Tests zeigten sich keine statistisch signifikanten expositionsabhängigen Unterschiede, weder bei EHS-Personen noch bei Kontrollpersonen ($p>0.1$). Die Ergebnisse bezüglich Herz-/Kreislaufparametern sind in Kapitel 3.4.4 dargestellt.

In diesen vier Studien zur Ganzkörperexposition wurden keine kurzfristigen Auswirkungen der Hochfrequenzsignale auf die kognitiven Funktionen beobachtet. Zumindest für diese Expositionsform schwächen die neuen Ergebnisse die Evidenz also weiter ab. Allerdings lassen sich die Studien schlecht vergleichen, weil unterschiedliche Tests verwendet wurden, und die Kontrolle für Störfaktoren war teilweise unzureichend, z. B. bezüglich Expositionsreihenfolge, Tageszeitschwankungen oder Medikamenteneinnahme. Zu langfristigen Auswirkungen liegen keine Studienresultate vor.

Bewertung

Tab. 4 > Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf kognitive Funktionen

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Eltiti et al. 2009	Laborantenne im Abstand von 5 m	U	Basisstationsähnliche Signale: a) UMTS 2020 b) GSM 900 und 1800 kombiniert	0.01 W/m ² je 0.005 W/m ²			Arbeitsgedächtnis, Aufmerksamkeit, Kurzzeitgedächtnis
Riddervold et al. 2008	Laborantenne	U	UMTS, 2140	0.9–2.2 V/m			Leistungen im TMB-Test (psychomotorische Geschwindigkeit, Aufmerksamkeit und Umsetzung) und Reaktionsgeschwindigkeit bei Erwachsenen und Jugendlichen
Furubayashi et al. 2009	Laborantenne im Abstand von 3 m	U	W-CDMA Downlink-Signal, 2140	10 V/m, 0.265 W/m ²	0.0078		Reaktionsgeschwindigkeit in einem Wahlreaktionstest
Wallace et al. 2012	Laborantenne im Abstand von ca. 5 m	U	TETRA-Signal, 420	0.01 W/m ² , 2 V/m	Ganzkörper-SAR: ca. 0.019		Arbeitsgedächtnis, Kurzzeitgedächtnis

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16; U=unmittelbar, übrige Abkürzungen siehe Glossar

3.4.4 Herz-/Kreislauffunktionen, Thermoregulation, Hautdurchblutung

Die bis September 2006 vorliegenden Studien hatten kaum Hinweise auf einen kurzfristigen Einfluss der Hochfrequenzexposition auf die autonome Regulierung des Kreislaufsystems im Wachzustand ergeben. Dagegen waren Veränderungen der Pulsrate und der Herzfrequenzvariabilität während der Einschlafphase zum damaligen Zeitpunkt nicht auszuschliessen gewesen. In den meisten Studien war die Exposition gegenüber Mobiltelefonen untersucht worden, zur Ganzkörperbelastung waren nur einzelne Resultate zu Rundfunksendern oder Radarsystemen vorhanden gewesen.

Neue Ergebnisse zu dieser Fragestellung liegen aus den in Kapitel 3.4.3 erwähnten drei Studien zur kognitiven Leistung vor. Untersucht wurden verschiedene Parameter des Herzkreislaufsystems, unter anderem Blutvolumenpuls, Herzfrequenz und Leitfähigkeit der Haut.

Die experimentelle Doppelblindstudie von Furubayashi et al. 2009 beinhaltete Messungen der Temperatur der Hautoberfläche, der Herzfrequenz und des lokalen Blutflusses bei 11 Frauen mit und 43 Frauen ohne mobiltelefonbezogene Beschwerden während vier Expositionsbedingungen. Aus den Messwerten für die Parameter des autonomen Nervensystems wurden Durchschnittswerte für drei Phasen berechnet: 0 bis 5, 12 bis 17 und 25 bis 30 Minuten nach Beginn der Exposition. Als Referenz dienten die Mittelwerte jeder Testperson in den letzten drei Minuten vor dem Experiment. Die Auswertungen ergaben keinen Einfluss der Ganzkörperexposition auf Herzfrequenz, Hauttemperatur oder Blutfluss.

Resultate

An der doppelt verblindeten Crossover-Studie von Eltiti et al. nahmen 44 Personen mit EHS und 115 Kontrollpersonen teil. Die Messung von Blutvolumenpuls, Herzfrequenz und Leitfähigkeit der Haut erfolgte während der Exposition resp. Scheinexposition in

vier Sitzungen (Basisuntersuchung, GSM, UMTS, Scheinexposition). Die Messwerte für die ganze Expositionsphase sind in Eltiti et al. 2007 publiziert, die Resultate während der kognitiven Testung in Eltiti et al. 2009. Die Auswertungen ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen, weder für die gesamte Expositionszeit (Signifikanzniveau: 0.05), noch während der kognitiven Testung (p -Werte >0.22). [Die Aussagekraft der Studie ist dadurch eingeschränkt, dass die Reihenfolge der Expositionen nicht ausgeglichen war. Der Grund dafür war, dass die ursprünglich angestrebte Anzahl von 264 Teilnehmern nicht erreicht wurde. In der statistischen Auswertung wurde dies jedoch berücksichtigt.]

Auch die Ergebnisse der Doppelblindstudie von Wallace et al. wurden in zwei Publikationen veröffentlicht. Die erste Arbeit betrifft die Herzkreislaufparameter während der 50-minütigen Ganzkörperexposition durch eine TETRA-Antenne (420 MHz, ca. 2 V/m, Wallace et al. 2010). Die zweite Publikation enthält die Auswertungen während der kognitiven Tests (Wallace et al. 2012). An der Studie nahmen 48 Personen mit EHS und 132 Kontrollpersonen teil, gemessen wurden die Herzfrequenz, der Blutvolumenpuls und die Hautleitfähigkeit. In der ersten Analyse zeigte sich, dass Personen mit EHS generell eine höhere Herzfrequenz hatten als Personen ohne EHS (Mittelwert: 77 resp. 73 Schläge pro Minute, $p=0.019$). Im Zusammenhang mit der Exposition wurden jedoch keine Unterschiede beobachtet (Wallace et al. 2010). Auch während der mentalen Anstrengung in zwei Tests zum Kurzzeit- und zum Arbeitsgedächtnis traten keine expositionsabhängigen Veränderungen der Kreislaufparameter auf (Wallace et al. 2012, $p>0.06$ bei einem korrigierten Signifikanzniveau von 0.008 wegen multipler Testung).

Die neuen Studien zeigten übereinstimmend keine kurzfristigen Auswirkungen der Ganzkörperexposition auf die autonome Regulierung des Herzkreislaufsystems. Damit bestätigten sie die früheren Resultate und machen kurzfristige Einflüsse der Hochfrequenzbelastung durch Sendeanlagen unwahrscheinlich. Zur Untersuchung von langfristigen Expositionen liegen keine Studien vor.

Bewertung

Tab. 5 > Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf Herz-/Kreislauffunktionen

Studie	Expositions- quelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Furubayashi et al. 2009	Laborantenne im Abstand von 3 m	U	W-CDMA Downlink- Signal, 2140	10 V/m, 0.265 W/m ²	0.019		Herzfrequenz, Hauttemperatur, Blutfluss
Eltiti et al. 2007a	Laborantenne im Abstand von 5 m	U	Basisstationsähnli- che Signale: a) UMTS 2020 b) GSM 900 und 1800 kombiniert	0.01 W/m ² jeweils 0.005 W/m ²			Herzfrequenz, Blutvolumenpuls, Leitfähigkeit der Haut während der ganzen Expositionsphase
Eltiti et al. 2009	Laborantenne im Abstand von 5 m	U	Basisstationsähnli- che Signale: a) UMTS 2020 b) GSM 900 und 1800 kombiniert	0.01 W/m ² jeweils 0.005 W/m ²			Herzfrequenz, Blutvolumenpuls und Hautleitfähigkeit während der kognitiven Testung
Wallace et al. 2010	Laborantenne Im Abstand von ca. 5 m	U	TETRA-Signal, 420	0.01 W/m ² , 2 V/m	Ganzkörper- SAR: ca. 0.0003		Herzfrequenz, Hautleitfähigkeit, Blutvolumenpuls
Wallace et al. 2012	Laborantenne Im Abstand von ca. 5 m	U	TETRA-Signal, 420	0.01 W/m ² , 2 V/m	Ganzkörper- SAR: ca. 0.0003		Herzfrequenz, Hautleitfähigkeit, Blutvolumenpuls

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16; U=unmittelbar, übrige Abkürzungen siehe Glossar

3.5 Wirkungen auf das Befinden

Zum Thema «Elektromagnetische Hypersensibilität» existiert ein separater Übersichtsbericht (Umwelt-Wissen Nr. 1218, BAFU 2012), der im Juni 2012 publiziert wurde und Studien bis Ende 2011 beinhaltet. Darin wurde evaluiert, ob hoch- oder niederfrequente elektromagnetische Felder das Befinden von Personen mit selbstberichteter Hypersensibilität beeinflussen. Dieser Bericht enthielt auch Studien zur Hochfrequenzexposition durch Sendeanlagen, beschränkte sich aber auf Untersuchungen, an denen Personen mit selbstberichteter elektromagnetischer Hypersensibilität (EHS) teilgenommen hatten. Daher sind einige Studien, die im Folgenden zusammengefasst und bewertet werden, auch bereits in diesem Bericht zur EHS aufgeführt. Das folgende Kapitel enthält aber zusätzlich auch diejenigen neuen Studien, die nur an Personen ohne EHS durchgeführt wurden.

3.5.1 Elektrosensitivität (= Feldwahrnehmung)

Als elektrosensitiv werden Personen bezeichnet, die schwache elektromagnetische Felder bewusst wahrnehmen können. Für Personen, die gesundheitliche Beschwerden auf elektromagnetische Strahlung zurückführen, wird dagegen der Begriff EHS verwendet. Dabei handelt es sich um zwei unabhängige Phänomene: Personen mit elektromagnetischer Hypersensibilität berichten nicht unbedingt eine überdurchschnittliche Fähigkeit zur Feldwahrnehmung und umgekehrt.

Einführung

Die Provokationsstudien im Bericht UW 0722 hatten gezeigt, dass auch Personen, die ihre Beschwerden elektromagnetischen Feldern zuschrieben, diese Felder in einer Testsituation im Allgemeinen nicht wahrnehmen konnten. Das galt für mobiltelefon- und basisstationsähnliche Signale. Aufgrund früherer Studien hatte sich aber nicht ausschliessen lassen, dass einzelne Personen hochfrequente Strahlung mit einer Feldstärke im Bereich der Anlagegrenzwerte wahrnehmen konnten. Allerdings hatten keine Studien mit wiederholter Testung von bestimmten Probanden mit hohen Trefferquoten vorgelegen. Hier war erheblicher Forschungsbedarf festgestellt worden.

Seit der Publikation von UW 0722 liegen fünf neue Resultate vor zur Frage, ob hochfrequente elektromagnetische Strahlung von ortsfesten Sendeanlagen wahrgenommen werden kann.

In der erwähnten Studie von Eltiti et al. 2007 unterschied sich die Wahrnehmungsfähigkeit in der EHS- und in der Nicht-EHS-Gruppe nicht signifikant von der Zufallswahrscheinlichkeit.

Resultate

Furubayashi et al. 2009 berichten für die Feldwahrnehmung in der Gruppe mit mobiltelefonbezogenen Beschwerden eine Trefferquote von 52 %, für die Gruppe ohne Beschwerden von 49 %. Die Trefferquote setzte sich aus richtig-positiven und richtig-negativen Antworten zusammen. Sie unterschied sich nicht signifikant von der Ratewahrscheinlichkeit, und der Unterschied zwischen den Gruppen war statistisch nicht signifikant ($p=0.105$).

Die Teilnehmer der Studie von Wallace et al. 2010 beurteilten die Wahrnehmung des basisstationsähnlichen TETRA-Signals oder der Scheinexposition während vier 5-minütigen und zwei 50-minütigen Expositionsdurchgängen. Die Trefferquote bezüglich An- oder Abwesenheit des Feldes war in beiden Gruppen nicht höher als die Ratewahrscheinlichkeit.

Auch in der dänischen Studie von Riddervold et al. 2008 wurden die 40 Erwachsenen und 40 Jugendlichen am Ende der Befeldung und nach der Scheinexposition nach ihrer Einschätzung gefragt. Im Anschluss an die tatsächliche Exposition antworteten 35 von 80 Personen mit ja, nach der Scheinexposition waren es 31 Personen. Dieser Unterschied war nicht statistisch signifikant (p -Wert nicht gegeben).

Heinrich et al. 2007 untersuchten in einer Feldinterventionsstudie 95 Personen (darunter 67 Männer und 28 Frauen), die im Hauptgebäude des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz in Augsburg arbeiteten (Teilnahmerate ca. 32 %). Auf dem Dach des Gebäudes befand sich eine UMTS-Mobilfunkbasisstation, die vom Netzbetreiber vor der Inbetriebnahme drei Monate lang zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt wurde (2167.1 MHz, Sendeleistung ca. 20 W). Der Neigungswinkel der Hauptstrahlrichtung (Downtilt) wurde für das Experiment auf 8° eingestellt, um eine stärkere Befeldung der darunterliegenden Büroräume zu gewährleisten. Die Studie wurde unter Doppelblindbedingungen durchgeführt: Der Betriebszustand der Basisstation wurde per Computer gesteuert, und eine Software stellte sicher, dass kein UMTS-Mobiltelefon mit der Basisstation Kontakt aufnehmen konnte. Zusätzlich wurde die Basisstation vom Stromzähler des Gebäudes getrennt. In den drei Studienmonaten war

die Basisstation an gleich vielen Tagen an- bzw. abgeschaltet, und der Betriebszustand blieb jeweils ein, zwei oder drei Tage nacheinander gleich (6 verschiedene Versuchsbedingungen). Die Messung der UMTS-Exposition in den Büros bei eingeschalteter Sendeanlage ergab 0.05 bis 0.53 V/m, der Mittelwert betrug 0.1 V/m (SD: 0.09 V/m). Neben der Befragung zum Befinden wurden die Angestellten jeweils am Abend auch nach dem vermuteten Betriebszustand gefragt. An den Tagen, an denen die Mobilfunkbasisstation tatsächlich in Betrieb war, hielten 33 % der Probanden sie für angeschaltet. An den Tagen, an denen die Basisstation nicht in Betrieb war, schätzten 30 % der Untersuchungsteilnehmer sie sei angeschaltet gewesen. Im Mittel schätzte jede Person den Zustand der Anlage an 50 % der Tage richtig ein. Die Person mit der besten Einschätzung erreichte eine Trefferquote von 69 %, die Person mit der schlechtesten Einschätzung eine Quote von 27 %. Diese Einschätzungen sind mit einer reinen Ratewahrscheinlichkeit kompatibel.

Auch in den neueren Studien zur Ganzkörperexposition waren die Probanden im Durchschnitt nicht in der Lage, die An- oder Abwesenheit des Feldes zuverlässig zu erkennen. Es gibt nur eine Studie mit wiederholter Testung einzelner Personen, und diese deutete bei einem Kollektiv von 95 Personen nicht darauf hin, dass eine der Versuchspersonen die Exposition zuverlässig identifizieren konnte. Allerdings war die in dieser Studie applizierte Feldstärke gering.

Bewertung

3.5.2 Unspezifische Symptome, elektromagnetische Hypersensibilität

Die experimentellen Studien, die im Bericht UW 0722 ausgewertet worden waren, hatten keinen Beleg dafür geliefert, dass kurzfristige Belastungen durch ein Mobiltelefon zu mehr Beschwerden führten als eine Scheinbelastung, auch nicht bei Personen, die sich selbst als hypersensibel bezeichneten.

Einführung

In einigen epidemiologischen Studien war die Häufigkeit unspezifischer Symptome mit dem Ausmass der Mobiltelefonbenutzung assoziiert gewesen. Daher war dieser Zusammenhang als «wahrscheinlich» beurteilt worden. Es hatte aber nicht ausgeschlossen werden können, dass andere Faktoren als die Hochfrequenzexposition zur Entstehung der beobachteten Zusammenhänge beigetragen hatten, zum Beispiel Unterschiede im Lebensstil oder im Umgang mit Stress.

In Bezug auf die Belastung durch Sendeanlagen war die Datenlage dürftig gewesen. Die zunächst beobachteten Effekte der experimentellen Exposition durch basisstationsähnliche UMTS-Strahlung hatten sich in einer Replikationsstudie nicht bestätigen lassen. Zum Auftreten von unspezifischen Symptomen bei Anwohnern in der Umgebung von Basisstationen hatte bis September 2006 nur eine Studie vorgelegen, die wissenschaftlichen Qualitätskriterien entsprach. Eine Beurteilung der Evidenz war deshalb nicht möglich gewesen.

Seit dem Bericht UW 0722 sind 6 experimentelle und 11 epidemiologische Studien erschienen, in denen Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von Sendeanlagen auf das Wohlbefinden und unspezifische Symptome untersucht wurden.

Experimentelle Resultate

Die Publikation von Eltiti et al. 2007 enthält Resultate einer Doppelblindstudie, in der sowohl ein GSM- als auch ein UMTS-Signal eingesetzt wurde. In den Gesamtauswertungen zu 6 Parametern des Befindens und 57 Beschwerden auf einer Symptomskala bestanden weder für Personen mit EHS noch für Personen ohne EMF-bezogene Beschwerden statistisch signifikante Unterschiede im Zusammenhang mit der Exposition, nachdem die Resultate für multiple Testung korrigiert worden waren. Nur in der EHS-Gruppe war ein Gefühl der Erregung oder Wachheit («arousal») während der UMTS-Exposition signifikant stärker als bei Scheinexposition ($p < 0.001$). Wie die Autoren anmerken, war die Reihenfolge der Expositionsbedingungen nicht ausgeglichen: Bei einem grösseren Teil der EHS-Personen hatte die UMTS-Exposition in der ersten Sitzung stattgefunden (45.5 % gegenüber 28.9 % in der Kontrollgruppe). Der beobachtete Unterschied im Befinden könnte teilweise darauf zurückzuführen sein, obwohl dies wohl nicht den kompletten beobachteten Effekt erklären kann (vgl. Kommentar von Rösli et al. 2008).

In der ebenfalls oben beschriebenen Feldinterventionsstudie von Heinrich et al. 2007 wurde bei 95 Personen, die in einem Gebäude mit einer UMTS Mobilfunkbasisstation arbeiteten, jeweils morgens und abends an 70 Arbeitstagen eine Befragung zum Befinden durchgeführt. Der Online-Fragebogen umfasste 21 Symptome, die auf einer Skala von 1 bis 5 quantifiziert wurden. Analysiert wurde die Beschwerdenscore-Differenz zwischen der Morgen- und der Abendbefragung sowie der abendliche Gesamtwert der Beschwerden. Neben der tatsächlichen UMTS-Exposition (Basisstation ein oder aus) wurden auch die kumulierte Exposition (Basisstation ein bis drei Tage an- bzw. ausgeschaltet) und die subjektiv empfundene Exposition (von Probanden eingeschätzter Betriebszustand) erfasst. Generell nahmen die Beschwerden im Verlauf eines Arbeitstages nur wenig zu. Auch die Unterschiede zwischen den Differenzen im Beschwerdenscore waren gering. Weder für die tatsächliche, noch für die kumulierte Exposition zeigten sich statistisch signifikante expositionsabhängige Unterschiede im abendlichen Gesamtbeschwerdenscore ($p = 0.166$ resp. 0.102). Auch die Differenz zwischen morgens und abends hing nicht signifikant mit diesen beiden Expositionsparametern zusammen ($p = 0.080$ resp. 0.422). Dagegen war das Ausmass der Beschwerden mit der subjektiv empfundenen Exposition statistisch signifikant assoziiert (jeweils $p < 0.0001$ für den Gesamtscore und die Differenz). Es bestand aber kein Zusammenhang zwischen der subjektiv empfundenen Belastung und dem tatsächlichen Betriebszustand der Basisstation. [In der Publikation fehlen Angaben zur statistischen Power der Studie sowie zum absoluten Ausmass der Beschwerden bei den Teilnehmern vor und nach der Exposition. Die Beschwerdenscore-Differenzen zwischen morgens und abends erscheinen auch sehr gering, bei den meisten Probanden scheint sich das Befinden kaum geändert zu haben.]

In der bereits erwähnten randomisierten Crossover-Studie von Riddervold et al. 2008 mit 40 Erwachsenen (25 bis 40 Jahre) und 40 Jugendlichen (15 bis 16 Jahre) beurteilten die Probanden das Ausmass von 11 unspezifischen Symptomen auf einer visuellen Analogskala vor und nach jeder Expositionsphase. Als primäre Zielgrössen dienten Kopfschmerzen und Konzentrationsschwierigkeiten. Die Auswertungen ergaben bei UMTS-Exposition eine statistisch signifikant stärkere Zunahme der Konzentrationsschwierigkeiten bei Erwachsenen ($p = 0.048$), aber nicht bei Jugendlichen ($p = 0.86$). Für Kopfschmerzen zeigte sich ein expositionsabhängiger Anstieg, wenn die Daten von

Jugendlichen und Erwachsenen gemeinsam analysiert wurden ($p=0.027$). Gemäss den Autoren scheinen die beobachteten Unterschiede aber dadurch zustande gekommen zu sein, dass die Beschwerdenscores vor der Scheinexposition höher waren als vor der UMTS-Exposition. Im Anschluss an die beiden Bedingungen wurden dann ähnlich hohe Werte gemessen. Das bedeutet, dass sich für die UMTS-Bedingung im Vergleich zur Scheinbedingung eine grössere Differenz ergab, die möglicherweise auf zufällige Schwankungen der Beschwerdenscores vor dem Experiment zurückzuführen ist.

Wie bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben, untersuchten Augner et al. 2009 in ihrer Feldstudie 57 Personen in einem Gebäude, an dessen Aussenwand sich eine Mobilfunkbasisstation (GSM 900 MHz) befand. Als hypersensibel bezeichneten sich 8 Probanden (14,3%). Kurz vor der Exposition sowie drei Minuten vor dem Ende bewerteten die Teilnehmer auf einer Fünf-Punkte-Skala das Zutreffen von 24 Adjektiven, die sich auf drei Parameter des Wohlbefindens bezogen: gute Stimmung, Wachheit und Gelassenheit. Die Auswertungen zeigten für die Parameter «gute Stimmung» und «Wachheit» keine Unterschiede zwischen den Expositionsszenarien (0.044 V/m, 0.241 V/m, 0.895 V/m). Dagegen waren die Probanden in den beiden Szenarien mit höherer Exposition gelassener als Testpersonen im Szenario mit der niedrigsten Exposition. Diese Unterschiede waren statistisch signifikant ($p=0.042$ bzw. 0.030). Im Verlauf des niedrigsten Expositionsszenarios nahm die Gelassenheit stärker ab als in den beiden anderen Szenarien ($p=0.002$ bzw. 0.009). Personen, die gesundheitliche Auswirkungen der elektromagnetischen Felder befürchteten, reagierten nicht anders auf die Exposition als Personen ohne Besorgnis.

Auch in der bereits erwähnten Crossover-Studie von Furubayashi et al. 2009 füllten die Teilnehmerinnen einen Fragebogen aus, der 65 Parameter zu 6 Stimmungslagen beinhaltete: Spannung/Angst, Depression, Wut/Ablehnung, Lebenskraft, Müdigkeit und Verwirrtheit. Zusätzlich wurden sie im Abstand von 5 Minuten nach ihrem Befinden gefragt. Die 11 Probandinnen mit mobiltelefonbezogenen Beschwerden wiesen generell eine schlechtere Stimmungslage auf als die Personen ohne Beschwerden. Alle Teilnehmerinnen hatten nach den 4 Expositionsphasen (kontinuierlich, intermittierend, Scheinexposition mit oder ohne Lärm) statistisch signifikant höhere Punktwerte für Müdigkeit und Verwirrtheit und geringere Werte für Lebenskraft. Die Auswertungen der statistisch signifikanten Interaktionen in der Varianzanalyse ergaben, dass die Veränderungen in der Stimmungslage nicht von der Exposition abhängig waren, sondern von der Reihenfolge der Tests. Auch die Angaben der Probandinnen während der Exposition zeigten keinen signifikanten Einfluss der EMF-Expositionen auf das Befinden ($p=0.859$). Bei Lärmexposition stieg das Unbehagen statistisch signifikant an ($p=0.002$).

In der Studie von Wallace et al. 2010 (vgl. Kap. 3.4.4) zur Ganzkörperexposition gegenüber einem TETRA-Signal beurteilten die Teilnehmer ebenfalls das Auftreten von unspezifischen Beschwerden während der vier 5-minütigen und zwei 50-minütigen Expositionsphasen durch eine Antenne im Abstand von ungefähr 5 Metern (420 MHz, ca. 2 V/m). Ausgewertet wurden die Angaben von 48 Personen mit EHS und 132 beschwerdefreien Personen zu 6 Parametern des Befindens: Angst, Anspannung, Erregung, Unbehagen, Müdigkeit und Entspannung sowie für eine Beschwerdeskala mit 57 Symptomen. Unter Doppelblindbedingungen zeigten sich für das Ausmass der 6

Parameter keine statistisch signifikanten Unterschiede, weder im Zusammenhang mit der Exposition, noch zwischen EHS- und Nicht-EHS-Personen, wenn die unterschiedlichen Ausgangswerte der beiden Gruppen berücksichtigt wurden. Bezüglich der umfassenden Symptomskala bestanden zwar signifikante Unterschiede zwischen Personen mit und ohne EHS, es waren aber ebenfalls keine Expositionseffekte zu beobachten.

Tab. 6 > Experimentelle Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf unspezifische Symptome

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	Max. SAR ₁₀ [W/kg]	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Eltiti et al. 2007	Laborantenne im Abstand von 5 m	U	Basisstations-ähnliche Signale: a) UMTS 2020 b) GSM 900 und 1800	0.01 W/m ² je 0.005 W/m ²		UMTS-Signal: + Erregung in EHS-Gruppe (p=0.001)	GSM- und UMTS-Signal in EHS- und Nicht-EHS-Gruppe: Angst, Anspannung, Mangel an Entspannung, Beschwerden insgesamt und Symptomscore; Aufregung bei UMTS-Signal in Nicht-EHS-Gruppe und bei GSM-Signal in beiden Gruppen (alle p-Werte >0.0025, Signifikanzniveau korrigiert für multiple Testung)
Heinrich et al. 2007	Mobilfunkbasisstation auf dem Dach des Bürogebäudes, in dem die Teilnehmer arbeiteten (Feldintervention)	K	UMTS 2167	0.1 V/m			Nicht signifikanter Anstieg der Beschwerden im Tagesverlauf bei eingeschalteter Basisstation (p=0.08), keine Assoziation mit der kumulativen Exposition (p=0.42)
Ridder-vold et al. 2008	Laborantenne	U	UMTS 2140	0.9–2.2 V/m		+ Kopfschmerzen (Erwachsene und Jugendliche kombiniert) + Konzentrations-schwierigkeiten (Erwachsene)	Konzentrationsschwierigkeiten (Jugendliche)
Furubayashi et al. 2009	Laborantenne im Abstand von 3 m	U	W-CDMA Downlink, 2140	10 V/m, 0.265 W/m ²	0.019		Anspannung/Angst, Depression, Wut/Ablehnung, Energie, Müdigkeit, Verwirrung, Unbehagen
Augner et al. 2010	Mobilfunkbasisstation, Abstand ca. 6 m, Downlink-Signal, Mikrozeile (Durchmesser: 50 cm)	K	GSM 900	3 Expositionsszenarien mit jeweils fünf Expositionsphasen à 50 Minuten mit verschiedener Intensität (Median, V/m): 0.044, 0.241, 0.895	0.3	+ Gelassenheit	Gute Stimmung, Wachheit
Wallace et al. 2012	Laborantenne im Abstand von ca. 5 m	U	TETRA-Signal, 420	0.01 W/m ² , 2 V/m	Ganzkörper-SAR: ca. 0.0003		Angst, Anspannung, Aufregung, Unbehagen, Müdigkeit, Entspannung; Beschwerdeskala mit 57 Symptomen

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16; U=unmittelbar, K=Kurzzeit, übrige Abkürzungen siehe Glossar

Die Publikation von Theml 2007 beschreibt eine Nachuntersuchung zu einer Befragung, die im Jahr 2001 bei Anwohnern in der Umgebung eines Kurz- und Mittelwellensenders in Oberlaindern (Bayern) durchgeführt worden war (Frentzel-Beyme 2002). Es ging um die Frage, ob sich die im Jahr 2001 als erhöht erfassten Beschwerden der Anwohner nach der Stilllegung des erwähnten Rundfunksenders im Jahr 2003 verändert hatten. An der ersten Befragung hatten 150 Anwohner teilgenommen, davon beteiligten sich 44 Personen auch an der Nachuntersuchung im Frühling 2007. Von 1994 bis 2003 war an diesem Ort ein Rundfunksender betrieben worden. Er hatte aus einem Mittelwellensender (Frequenz: 1593 kHz, Sendeleistung: 100 kW) und vier Kurzwellensendern (5.985 und 15.385 MHz, jeweils bis 250 kW) bestanden. Der Abstand zu den Häusern in den untersuchten Ortsteilen betrug 200 bis 1500 m. Die Nachuntersuchung fand im Frühling 2007 statt. Anhand der «Von-Zerssen-Beschwerdeskala» wurden 24 körperliche und psychische Beschwerden abgefragt. Ein Zusatzfragebogen betraf fünf weitere Beschwerden: Ohrensausen, Nachtschweiss, Muskelzucken, Zucken der Augenlider und Sehstörungen. In der Befragung von 2001 hatten 23 der 44 Personen (52.3 %) mit zweimaliger Teilnahme eine erhöhte Beschwerdenausprägung angegeben. Im Jahr 2007 traf das auf 3 der 44 Personen (6.8 %) zu, 36 Teilnehmer (81.8 %) hatten eine unauffällige Beschwerdenausprägung. Verglichen mit einer bevölkerungsrepräsentativen Stichprobe waren die Gesamtbeschwerden der Studienteilnehmer im Jahr 2001 überdurchschnittlich hoch, im Jahr 2007 lagen sie im Normbereich. Auch die einzelnen Beschwerden entsprachen in der zweiten Befragung den Erwartungswerten aus der Bevölkerungsstichprobe. [Die Hochfrequenzbelastung wurde weder gemessen, noch mit anderen Methoden abgeschätzt. Daher lässt sich nicht beurteilen, ob bzw. in welchem Ausmass die Exposition nach der Abschaltung des Senders zurückgegangen war. Eine weitere Limitierung ist die geringe Beteiligung an der zweiten Befragung (44 von 150 Personen, also circa 29 %). Von den übrigen 106 Teilnehmern waren 8 verstorben und 35 umgezogen, über die restlichen 63 Nichtteilnehmer liegen keine Informationen vor. Die Repräsentativität dieser Stichprobe für das Gesamtkollektiv ist unklar. In der ersten Befragung war der Anteil der Personen mit erhöhten Beschwerden in der Gruppe der 44 Personen ähnlich hoch wie im Gesamtkollektiv (52.3 vs. 47.3 %). Falls jedoch die Motivation zur Studienteilnahme bei denjenigen Personen besonders hoch war, die ihre Beschwerden auf das Vorhandensein der Sendeanlage zurückführten, würde ein Selektionsbias entstehen. Gerade für diese Personen wäre dann auch von einem Placeboeffekt nach der Abschaltung auszugehen.]

Als Reaktion auf eine öffentliche Diskussion um eine Kurzwellenantenne (Frequenz: 17.6 MHz) zu militärischen Zwecken führten Preece et al. 2007 eine Querschnittsstudie in drei Dörfern auf Zypern durch. Neben den unspezifischen Beschwerden evaluierten sie auch die Sterblichkeit und die Häufigkeit von angeborenen Fehlbildungen in der Bevölkerung (vgl. Kapitel 3.6.4 und 3.7.1). Die Dörfer waren unterschiedlich weit von der Sendeanlage entfernt, die Sendeleistung betrug 100 kW. Wiederholte Messungen der Hochfrequenzbelastung an zentralen Stellen der Dörfer über zwei Jahre ergaben für das am stärksten exponierte Dorf einen Durchschnittswert von 0.57 V/m (davon 0.11 V/m von der Militärantenne), für das Dorf mit mittlerer Belastung einen Durchschnittswert von 0.46 V/m (0.04 V/m von der Militärantenne) und für das am wenigsten exponierte Dorf einen Mittelwert von weniger als 0.01 V/m. Zur Erfassung der Symptommhäufigkeit wurden an alle Haushalte Fragebögen für Erwachsene und Kinder verteilt. Insgesamt beteiligten sich 1870 Personen an der Befragung (Teilnahmerate:

87 %). Als Hauptzielgrößen definiert wurden Migräne, Kopfschmerzen, Schwindel und Depression. Für alle vier Zielgrößen ergaben die Auswertungen in den beiden exponierten Orten statistisch signifikant höhere Odds Ratios als im dritten Dorf. Ebenfalls häufiger angegeben wurden Atembeschwerden, Asthma und Herzprobleme. [In der Publikation fehlen entscheidende Informationen zur Vergleichbarkeit der Bewohner in den drei Ortschaften. Nicht berücksichtigt wurde die Familienzugehörigkeit oder ob mehrere Teilnehmer im selben Haushalt lebten. Zudem ist eine selektive Beteiligung von Personen mit EMF-bezogenen Beschwerden nicht auszuschliessen, weil der Studie eine öffentliche Debatte über die Militärantenne vorausgegangen war (Selektionsbias).]

Die Teilnehmer der Querschnittsstudie von Thomas et al. 2008a wurden aus den Einwohnerregistern von vier bayerischen Städten zufällig ausgewählt. Die Teilnahme-rate lag bei 30 %, zur Auswertung gelangten Daten von 329 Personen zwischen 18 und 65 Jahren. Die Messung der Mobilfunkexposition über 24 Stunden erfolgte mit einem Personendosimeter, das die Teilnehmer am Oberarm trugen. Die Messungen umfassten die Frequenzbereiche GSM 900, GSM 1800, UMTS 2100 (jeweils Uplink und Downlink), DECT (1880 bis 1900 MHz) und WLAN (2400 bis 2485 MHz). Die durchschnittliche Feldstärke im Tagesverlauf wurde für jeden Frequenzbereich einzeln berechnet und quadriert. Aus diesen Mittelwerten wurde eine Summe gebildet, und die Quadratwurzel dieser Summe ergab die Gesamtexposition, ausgedrückt als Prozentsatz des ICNIRP-Referenzwertes. Am Mittag und am Abend des Messtages trugen die Teilnehmer allfällige akute Symptome in ein Tagebuch ein. Zusätzlich wurden in einem Interview chronische Beschwerden in den letzten sechs Monaten erfragt: Kopfschmerzen, neurologische Symptome (z.B. Tinnitus), Herz-Kreislaufbeschwerden (z.B. Herzrasen), Konzentrationsprobleme, Schlafstörungen und Müdigkeit. Die durchschnittliche Hochfrequenzbelastung variierte zwischen 0.13 und 0.58 % des ICNIRP-Referenzwertes. Bei Personen im obersten Expositionsquartil (0.21 bis 0.58 %) war keines der chronischen Symptome stärker vertreten als im untersten (<0.15 %). Auch für die akuten Beschwerden bestand kein Zusammenhang mit der Hochfrequenzbelastung in den vorhergehenden Stunden. [Mit dem persönlichen Messgerät werden neben Fernfeldexpositionen auch allfällige Emissionen des eigenen Mobiltelefons gemessen. Insofern ist unklar, wie gut die gemessenen Expositionen die Belastung durch ortsfeste Sendeanlagen repräsentieren. Falls die Mobiltelefonbenutzung positiv oder negativ mit dem Auftreten von Symptomen korreliert ist, würde dies die Analysen beeinflussen. Zumindest in einer Schweizer Messstudie wurde jedoch gezeigt, dass die Ergebnisse der persönlichen Messung nur wenig von der eigenen Telefonbenutzung beeinflusst werden (Frei et al. 2010).]

In einer weiteren Querschnittsstudie evaluierte dieselbe Forschungsgruppe aus Deutschland Zusammenhänge zwischen der individuellen Hochfrequenzbelastung und der Häufigkeit von unspezifischen Beschwerden bei Kindern und Jugendlichen (Thomas et al. 2008b). Die Kinder (8 bis 12 J.) und Jugendlichen (13 bis 17 J.) wurden aus den Einwohnerregistern von vier bayerischen Städten zufällig ausgewählt. Die Teilnahme-rate lag bei 52 %, zur Auswertung gelangten die Daten von 1484 Kindern und 1508 Jugendlichen. Wie in der Studie an Erwachsenen dauerte die Hochfrequenzmessung 24 Stunden und erfolgte mit einem Personendosimeter (ESM-140, Maschek Electronics), das tagsüber am Oberarm getragen wurde. Erfasst wurden die Frequenz-

bereiche: GSM 900, GSM 1800, UMTS 2100, DECT 1880 bis 1900 MHz und WLAN 2400 bis 2480 MHz. Auch in dieser Studie war das Mass für die individuelle Hochfrequenzbelastung die Quadratwurzel der Summe aller Durchschnittswerte in den Frequenzbereichen, ausgedrückt als Prozentsatz des ICNIRP-Referenzwerts. Die mediane Belastung lag für Kinder bei 0.18 % des ICNIRP-Referenzwerts und für Jugendliche bei 0.19 %. Der Maximalwert betrug 0.92 %. Während der Messung machten die Kinder und Jugendlichen in einem Tagebuch zweimal täglich Angaben zum Auftreten von Symptomen (mittags und abends). Zusätzlich erfolgten persönliche Interviews zu chronischen Beschwerden in den letzten 6 Monaten. Erfasst wurden die Symptome: Kopfschmerzen, Nervosität, Gereiztheit, Schwindel, Müdigkeit, Konzentrationsstörungen (nur akut) sowie Angst und Schlafstörungen (nur chronisch). In den statistischen Auswertungen wurden zahlreiche Einflussfaktoren berücksichtigt. Bezüglich der chronischen Beschwerden zeigten sich keine Zusammenhänge mit der Exposition, nur bei Kindern im dritten Quartil bestand ein vermindertes Risiko für Schlafstörungen (OR=0.63, 95 %-CI: 0.41–0.96) im Vergleich zu der am niedrigsten belasteten Gruppe (Heinrich et al. 2011). Diese Resultate bestätigten sich auch in einer Auswertung mit komplexeren statistischen Methoden (Kühnlein et al. 2009). Bezüglich der akuten Symptome führten die Autoren zahlreiche Analysen durch. Diese Auswertungen ergaben einige statistisch signifikante Resultate, aber keine einheitlichen Dosis-Wirkungsbeziehungen (Heinrich et al. 2010). Jugendliche, deren morgendliche Exposition im obersten Quartil lag, berichteten mittags über eine höhere Kopfschmerzintensität (OR=1.50, 95 %-CI: 1.03–2.19). Bei Jugendlichen, deren Belastung am Nachmittag im obersten Quartil lag, bestand vor dem Schlafengehen eine stärkere Gereiztheit (OR=1.79, 95 %-CI: 1.23–2.61), bei Kindern im selben Quartil ergab sich eine Assoziation mit dem Auftreten von Konzentrationsschwierigkeiten (OR=1.55, 95 %-CI: 1.02–2.33). Wegen der fehlenden Übereinstimmung zwischen den beiden Untersuchungszeitpunkten und der grossen Anzahl statistischer Tests gehen die Autoren in der Publikation davon aus, dass die wenigen signifikanten Assoziationen auf Zufall zurückzuführen sind, nicht auf einen Kausalzusammenhang. [Mit dem persönlichen Messgerät werden neben Fernfeldexpositionen auch allfällige Emissionen des eigenen Mobiltelefons gemessen. Dies kann die Analysen beeinflussen, wenn die Telefonbenutzung mit dem Auftreten von Verhaltensproblemen korreliert.]

Blettner et al. 2009 befragten 30 047 von insgesamt 51 444 Personen im Alter von 14 bis 69 Jahren im Rahmen einer repräsentativen, landesweiten Querschnittsstudie in Deutschland nach gesundheitlichen Beeinträchtigungen durch Mobilfunkbasisstationen (Teilnahmerate: 59 %). Sie verwendeten die Beschwerdeliste nach Frick, die 38 Symptome umfasst. Die erste Auswertung basierte auf der von den Teilnehmern selbst geschätzten Entfernung von der nächsten Basisstation (n=30 047). Für 29 805 Personen (99.2 %) konnte zusätzlich die geokodierte Distanz bis zur nächsten Basisstation ermittelt werden. Personen, die angaben, weniger als 500 m von einer Mobilfunkbasisstation entfernt zu wohnen, äusserten statistisch signifikant häufiger Bedenken wegen Mobilfunkbasisstationen (OR: 1.35, 95 %-CI: 1.25–1.45). Wenn die geokodierte Distanz verwendet wurde, bestand dagegen kein Unterschied zwischen Personen mit mehr oder weniger als 500 m Entfernung (OR: 1.00, 95 %-CI: 0.94–1.07). Die Auswertungen zum Ausmass der Beschwerden basierten auf Daten von 26 039 Personen (86.7 %), für die sowohl Angaben zur Symptomatik als auch zur geokodierten Distanz bis zur nächsten Basisstation vorlagen. In dieser Analyse erzielten Personen, die in der

Nähe von Sendeanlagen (<500 m) wohnten, um 0.34 (95 %-CI: 0.32–0.37) Einheiten höhere Punktwerte auf der Beschwerdeskala als die übrigen Teilnehmer. Der Mittelwert des Symptomscores lag in der Kategorie unter 500 m bei 51.43 Punkten, für die weiter entfernt Wohnenden bei 50.93 Punkten. Demnach bestand ein schwacher Zusammenhang zwischen berechneter Distanz und unspezifischen Beschwerden.

Für die zweite Phase dieser Querschnittsstudie kontaktierten die Autoren 4150 Teilnehmer aus 8 städtischen Regionen und baten sie um die Erlaubnis für Messungen der Hochfrequenzbelastung in ihren Wohnungen (Berg-Beckhoff et al. 2009). Insgesamt wurden bei 1500 Personen Expositionsmessungen durchgeführt. Berücksichtigt wurden die Frequenzbereiche GSM 900, GSM 1800, UMTS von Mobilfunkbasisstationen. Die Messungen erfolgten in den Schlafzimmern bei geschlossenen Fenstern an vier verschiedenen Stellen des Bettes und dauerten jeweils 5 Minuten. Für jede Person wurde aus insgesamt 280 Messwerten ein Mittelwert für die drei Downlink-Frequenzbereiche des Mobilfunks berechnet. Die Symptome wurden auf 5 Skalen erfasst (PSQI, HIT-6, von Zerssen-Skala, SF-36 zur körperlichen und zur geistigen Gesundheit). In die Endauswertung kamen die Daten von 1326 Personen. Als exponiert galten die obersten 10 % des Kollektivs, in dieser Gruppe lag die durchschnittliche Belastung über 0.1 V/m (0.029 mW/m²). Auf keiner der 5 Symptomskalen lagen die Punktwerte in der exponierten Gruppe über denjenigen der anderen Teilnehmer. Personen, die Symptome auf Mobilfunkbasisstationen zurückführten, berichteten über mehr Kopfschmerzen und sonstige Beschwerden als Teilnehmer ohne EMF-bezogene Beschwerden (vgl. auch Breckenkamp et al. 2010).

An einer kleineren Fragebogenerhebung beteiligten sich 251 Bewohner der bayerischen Stadt Selbitz (Eger et al. 2010). Die Expositionsabschätzung beruhte auf Punktmessungen. Als exponiert galten Personen mit Mittelwerten zwischen 0.7 V/m und 1.17 V/m, in der Referenzgruppe ausserhalb von 400 m lag der Durchschnittswert bei 0.18 V/m. Personen, die im Umkreis von weniger als 400 m von einer Basisstation wohnten, gaben häufiger an unter verschiedenen Beschwerden zu leiden als Kontrollpersonen, die weiter entfernt wohnten. Auch innerhalb des 400-m-Radius waren die Beschwerden bei Personen mit Distanzen unter 200 m häufiger als bei Anwohnern in 200 bis 400 m Entfernung. Mit 23 % war die Teilnahmerate in der Studie gering und korrelierte mit der Entfernung zur Basisstation: in der Kategorie mit der kleinsten Distanz lag sie bei 36 % und bei Anwohnern mit den grössten Entfernungen bei 14 %. [Aufgrund der unterschiedlichen Beteiligungsraten in den Expositions-kategorien ist von einem Selektionsbias auszugehen, der auch die Differenzen in der Symptommhäufigkeit erklären könnte. In der Publikation fehlen wesentliche Informationen zur Expositionsmessung, und es wurden keine potenziellen Störfaktoren berücksichtigt.]

In Holland führten Baliatsas et al. 2011 eine Querschnittsstudie durch. Von einer Zufallsstichprobe von 9502 Erwachsenen, die in 22 niederländischen Regionen mit verschiedenen Umweltcharakteristika wohnten, beteiligten sich 3611 Personen (37 %) an der Befragung. Die Teilnehmer beantworteten Fragen zu körperlichen Beschwerden, psychologischen Charakteristika und Umweltfaktoren. Als Mass für unspezifische Beschwerden diente die Somatisierungsskala des «Vierdimensionalen Symptom-Fragebogens» (4DSQ), die aus 16 Items mit Punktwerten zwischen 0 und 32 bestand. Die jeweilige Distanz bis zur nächsten Mobilfunkbasisstation wurde mittels Geogra-

phischem Informationssystem (GIS) berechnet. Insgesamt gaben 1197 Personen (34.2 %) an, in der Nähe einer Basisstation zu wohnen. Die gemessene Entfernung bis zur nächsten Basisstation lag im Durchschnitt bei 347 m. In der statistischen Auswertung wurden verschiedene Einflussfaktoren einschliesslich psychologischer Komponenten berücksichtigt. Sie ergab keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Entfernung von der nächsten Basisstation und dem Auftreten von Symptomen. Dagegen korrelierte die berichtete Nähe einer Basisstation mit stärkeren Beschwerden ($p < 0.05$). [Die Aussagekraft der Studie wird dadurch eingeschränkt, dass es sich um eine Querschnittsanalyse handelte und die Umfrage im Jahr 2006 stattfand, die Daten zu den Mobilfunkbasisstationen aber aus dem Jahr 2008 stammten. Dadurch könnte es zu Fehlklassifizierungen gekommen sein, die Personen mit und ohne Beschwerden wahrscheinlich gleichermassen betroffen hätte. Dies könnte zu einer Unterschätzung der Assoziation geführt haben. Zudem wurden keine Messungen vorgenommen. Die Entfernung von einer Basisstation sagt aber wenig über die tatsächliche Exposition eines Gebäudes aus (Frei et al. 2010).]

In der Schweiz evaluierte die Qualifex-Studie den Zusammenhang zwischen gesundheitlichen Beschwerden und der persönlichen EMF-Exposition im Frequenzbereich von 88 bis 2500 MHz (Rösli et al. 2010, Frei et al. 2012). Neben einer Querschnittsanalyse enthielt diese Studie auch eine Verlaufsbeobachtung über ein Jahr. Im Jahr 2008 wurde eine Zufallsstichprobe von 4000 Bewohnern der Region Basel im Alter von 30 bis 60 Jahren gezogen. An der Basiserhebung beteiligten sich insgesamt 1375 Personen (Teilnahmerate: 37 %). An der Folgerhebung ein Jahr später nahmen 1122 (82 %) von ihnen erneut teil. Die Abschätzung der Hochfrequenzbelastung am Wohnort durch ortsfeste Sendeanlagen basierte auf einem computergestützten räumlichen Ausbreitungsmodell (Bürgi et al. 2010). Ausserdem wurde ein Expositionsmodell entwickelt und validiert, in das zusätzlich Angaben der Teilnehmer einfließen, um die individuelle Hochfrequenzbelastung im Alltag abzuschätzen (Frei et al. 2009). Dabei wurden neben Mobil- und Rundfunksendern auch Basisstationen von Schnurlostelefonen, WLAN-Sender und die Mobiltelefone anderer Personen als Expositionsquellen berücksichtigt. Der Mittelwert der Hochfrequenzexposition durch Fernfeldquellen lag zu Beginn der Studie bei 0.21 V/m und ein Jahr später bei 0.22 V/m. Die durchschnittliche Belastung von Sendeanlagen betrug zu beiden Zeitpunkten 0.09 V/m. Die Querschnittsanalyse mit Daten von 1375 Teilnehmern ergab keine einheitliche Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen der Belastung insgesamt oder durch ortsfeste Sendeanlagen und dem Auftreten von Kopfschmerzen oder anderen Symptomen gemäss «Von-Zerssen-Skala (Frei et al. 2012). In der longitudinalen Auswertung nach einem Jahr war die Höhe der individuellen Hochfrequenzbelastung, wie sie zu Beginn der Studie bestanden hatte, ebenfalls nicht konsistent mit dem Auftreten von unspezifischen Beschwerden einschliesslich Kopfschmerzen und Tinnitus assoziiert (Frei et al. 2012). Auch die Zu- oder Abnahme der Exposition im Laufe des Jahres ging nicht mit einer entsprechenden Veränderung der Symptommhäufigkeit einher. Ein ähnliches Resultat ergab eine weitere Analyse an 130 Personen, die sich als elektromagnetisch hypersensibel bezeichneten oder zumindest EMF-bezogene Beschwerden angaben (Rösli et al. 2010). Angesichts der zahlreichen statistischen Tests und der fehlenden Übereinstimmung zwischen den wenigen beobachteten Assoziationen erschien es am wahrscheinlichsten, dass vereinzelte Assoziationen durch Zufall entstanden waren.

Für eine polnische Querschnittsstudie wählten Bortkiewicz et al. 2012 aus fünf Regionen der Stadt Łódź 195 Wohnungen aus, die 50 bis 500 m von einer Mobilfunkbasisstation entfernt waren. In diesen Wohnungen lebten insgesamt 1154 Personen. An der Studie nahmen 181 Männer und 319 Frauen teil. Sie wurden zu EMF-Expositionen im Beruf und in der Freizeit, zu ihren demographischen Charakteristika, zur allgemeinen Gesundheit und zum Auftreten von unspezifischen Beschwerden befragt. In den Gebäuden, die sich am nächsten an der Hauptstrahlrichtung (Azimut) der jeweiligen Basisstation befanden, wurde die elektrische Feldstärke in drei Punktmessungen im Abstand von 5 Minuten gemessen. Die Distanz zur Basisstation wurde anhand des Bebauungsplans der Siedlung ermittelt. Durchschnittswerte über 0.8 V/m wurden in 23 Wohnungen (12 %) gemessen, niedrigere Werte waren mit dem verwendeten Messgerät nicht feststellbar. Es bestand kein Zusammenhang zwischen der Distanz und der Höhe der elektrischen Felder. In den statistischen Auswertungen wurden Alter, Geschlecht und hoch- oder niederfrequente Expositionen in Beruf oder Freizeit berücksichtigt. Zwischen der Entfernung von einer Basisstation und der Häufigkeit von Kopfschmerzen wurde ein Zusammenhang beobachtet, am häufigsten trat dieses Symptom bei Anwohnern in Entfernungen zwischen 100 und 150 m auf ($p=0.013$). Gedächtnisprobleme wurden am häufigsten von Personen in Distanzen über 150 m berichtet ($p=0.004$). Die Resultate der Auswertungen zur elektrischen Feldstärke werden in der Publikation nicht präsentiert, aber die Autoren halten fest, dass sie diesbezüglich keine Assoziation mit der Häufigkeit von Beschwerden beobachtet haben. [Es bleibt unklar, warum die Ergebnisse zur gemessenen Exposition nicht angegeben sind, zumal offenbar Distanzabhängigkeiten gefunden wurden. Da sich ohne Messwerte oder zumindest entsprechende Angaben zur jeweiligen Basisstation nicht abschätzen lässt, in welcher Entfernung die höchsten Expositionen auftraten, sind die Resultate nicht aussagekräftig. Zudem wurden einige potenzielle Störfaktoren nicht berücksichtigt.]

Tab. 7 > Bevölkerungsstudien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf unspezifische Symptome

Studie	Expositionsquelle	Studientyp, Kollektiv	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität, Expositions-kategorien	Assoziation	Keine oder statistisch nicht signifikante Assoziation	Bemerkungen
Theml 2007	Mittelwellensender, 4 Kurzwellensender	Follow-up, 44 Anwohner einer bayerischen Kleinstadt	1.593, 5.985 bis 15.385	100 bis 250 kW	– Symptommhäufigkeit 4 Jahre nach Abschaltung der Sendeanlage		Keine Abschätzung oder Messung der Exposition, niedrige Teilnehmerate
Preece et al. 2007	Kurzwellensender (Militärantenne)	Querschnitt, ca. 1870 Erwachsene und Kinder aus 3 Dörfern auf Zypern	17.6	Elektrische Feldstärke insgesamt (und von Militärantenne) in Dorf 1: 0.57 V/m (0.11 V/m), in Dorf 2: 0.46 V/m (0.04 V/m), in Dorf 3: <0.01 V/m	+ Migräne, Kopfschmerzen, Schwindel, Depression		Vergleichbarkeit der Bevölkerungen in den drei Dörfern unklar
Thomas et al. 2008a	Mobilfunk generell	Querschnitt, 329 Erwachsene aus 4 Städten in Bayern	GSM 900, GSM 1800, UMTS 2100, DECT 1880–1900, WLAN 2400–2485	Individuelle Hochfrequenzbelastung (24-h-Messung aller Frequenzbereiche) in Prozent vom ICNIRP-Referenzwert, oberstes Quartil: 0.21 bis 0.58 %, Referenzkategorie: <0.15 %		Akute Symptome, chronische Symptome	Kleine Fallzahlen
Thomas et al. 2008b, Kühnlein et al. 2009, Heinrich et al. 2010, Heinrich et al. 2011	Mobilfunk generell	Querschnitt, 1484 Kinder und 1508 Jugendliche aus 4 Städten in Bayern	GSM 900, GSM 1800, UMTS 2100, DECT 1880–1900, WLAN 2400–2485	Individuelle Hochfrequenzbelastung (24-h-Messung aller Frequenzbereiche) in Prozent vom ICNIRP-Referenzwert; Quartil-Trennpunkte: bei Kindern: 0.15, 0.17, 0.20 %, bei Jugendlichen: 0.15, 0.17, 0.21 %	– Chronische Schlafstörungen bei Kindern im dritten Quartil (OR: 0.63, 95 %-CI: 0.41–0.96) Akute Symptome (4. Quartil): + Konzentrationsprobleme bei Kindern (OR: 1.55, 95 %-CI: 1.02–2.33) + Kopfschmerzen bei Jugendlichen (OR: 1.50, 95 %-CI: 1.03–2.19) + Gereiztheit bei Jugendlichen (OR: 1.79, 95 %-CI: 1.23–2.61)	6 chronische Symptome bei Kindern und Jugendlichen 17 akute Symptome bei Kindern, 16 akute Symptome bei Jugendlichen	
Blettner et al. 2009	Mobilfunkbasisstation	Querschnitt, 26 039 Personen (14–69 J.)	k. A.	Geokodierte Distanz: <500 m vs. >500 m	+ Frick-Symptomskala (0.34 Punkte, 95 %-CI: 0.32–0.37)		
Berg-Beckhoff et al. 2009	Mobilfunkbasisstation	Querschnitt, 1326 Personen (14–71 J.)	GSM 900, GSM 1800, UMTS	Mittelwert von 280 Messwerten pro Person (alle 3 Frequenzbereiche kombiniert); Trennpunkt der Kategorien: 0.1 V/m (90 %-Perzentile)		Punktwerte auf 5 Symptomskalen	

Studie	Expositionsquelle	Studientyp, Kollektiv	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität, Expositions-kategorien	Assoziation	Keine oder statistisch nicht signifikante Assoziation	Bemerkungen
Eger et al. 2010	Mobilfunkbasisstation	Querschnitt, 251 Bewohner einer bayerischen Stadt	940 und 1850	Stark exponiert: 0.7–1.17 V/m vs. schwach exponiert: 0.18 V/m	+ Schlafstörungen, depressive Symptome, zerebrale Symptome, Gelenkbeschwerden, Infekte, Hautveränderungen, Herz-/Kreislaufsymptome, Sehstörungen, Gleichgewichtsprobleme, Hormonveränderungen, Darmbeschwerden	Kopfschmerzen, Denkstörungen, Zahnschmerzen, Schwindel, Nasenbluten, Gewichtszunahme, Gewichtsabnahme, Einnässen	Selektionsbias wegen niedriger Teilnehmerate und Korrelation zwischen Beteiligungsrate und Distanz möglich
Baliatsas et al. 2011	Mobilfunkbasisstation	Querschnitt, 3611 Erwachsene aus 22 holländischen Regionen	GSM 900, GSM1800, UMTS	Geokodierte und selbst geschätzte Distanz bis zur nächsten Basisstation	+ Symptome bei selbst geschätzter Distanz ($p < 0.05$)	Symptome bei berechneter Distanz	Keine Messwerte vorhanden
Röösli et al. 2010, Frei et al. 2012	Hochfrequenzexposition insgesamt	Querschnitt, 1375 Personen (30–60 J., 58 % Frauen)	GSM 900, GSM 1800, UMTS, DECT, WLAN, TV/Radio	Trennpunkte für 3 Expositions-kategorien: 50 %- und 90 %-Perzentile	– Kopfschmerzen in der mittleren Kategorie der Fernfeldbelastung (-1.23 Punkte, 95 %-CI: -2.22 bis -0.24)	Symptome auf der «von-Zerssen-Skala» und Tinnitus, Expositions-Wirkungsbeziehung	
Röösli et al. 2010, Frei et al. 2012	Hochfrequenzexposition insgesamt	Kohorte, Follow-up nach einem Jahr, 1122 Personen (30–60 J., 60 % Frauen)	GSM 900, GSM 1800, UMTS, DECT, WLAN, TV/Radio	Trennpunkte für 3 Expositions-kategorien: 50 %- und 90 %-Perzentile	+ Kopfschmerzen in der mittleren Kategorie der Fernfeldbelastung (0.91 Punkte, 95 %-CI: 0.07–1.75)	Symptome auf der «von-Zerssen-Skala» und Tinnitus, Expositions-Wirkungsbeziehung	
Bortkiewicz et al. 2012	Mobilfunkbasisstation	Querschnitt, 500 Erwachsene aus 5 Regionen von Łódź	Sendeleistung: 8 bis 25 W	Distanz (berechnet): 50 bis 100 m 101 bis 150 m 151 bis 200 m 201 bis 500 m	Distanz 101 bis 150 m: + Kopfschmerzen ($p = 0.013$), + Hautveränderungen ($p = 0.006$) Distanzen <150 m: – Gedächtnisprobleme ($p = 0.004$)	Gesundheitszustand allgemein (selbstberichtet), depressive Stimmung, Müdigkeit, Kreislaufsymptome, Schlafstörungen, Schwindel, Konzentrationsprobleme, Sehstörungen, Übelkeit, Appetitverlust	Resultate der Expositions-messungen nicht aufgeführt

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16; Abkürzung siehe Glossar

Die Forschung zu möglichen Auswirkungen von Mobilfunkbasisstationen und Rundfunksendern war in den letzten Jahren auf unspezifische Symptome fokussiert, weil von der Allgemeinbevölkerung häufig solche Auswirkungen berichtet wurden (z. B. Röösli et al. 2004, Huss et al. 2006). Seit 2007 sind sechs experimentelle Studien erschienen (darunter zwei Feldstudien) und elf epidemiologische Untersuchungen. In den experimentellen Studien wurden nur vereinzelt Expositionseffekte beobachtet, die überdies kein konsistentes Muster zeigten und in einem Fall auch auf eine Verbesserung des Befindens hindeuteten. Möglicherweise sind diese Ergebnisse zumindest teilweise zufällig zustande gekommen.

Bei den epidemiologischen Studien fällt auf, dass in Studien mit aufwändiger Expositionsabschätzung keine Unterschiede zwischen Exponierten und Nichtexponierten

Bewertung (experimentelle und epidemiologische Studien)

bestanden. Dagegen wurden in Untersuchungen mit einfacher Expositionsabschätzung eher Auswirkungen beobachtet. Methodisch problematisch sind Studien in der Umgebung von einzelnen grossen Sendeanlagen, weil die Teilnehmenden in solchen Studien ihren Expositionsstatus im Allgemeinen kennen. Beispiele dafür sind die Abschaltung einer Sendeanlage wie in der Studie von Theml 2007 oder die öffentliche Diskussion im Vorfeld wie bei Preece et al. 2007. Es ist zu erwarten, dass die Kenntnis des Expositionsstatus die Wahrnehmung unspezifischer Beschwerden beeinflusst. Studien mit Messung oder Modellierung der individuellen Exposition durch alle relevanten Fernfeldquellen sind diesbezüglich weniger fehleranfällig. Wie zumindest in der Schweizer Qualifex-Studie gezeigt wurde, korreliert in diesem Fall die persönliche Expositionseinschätzung nicht mit der tatsächlichen Exposition (Frei et al. 2010). Daher kann die Symptomwahrnehmung in solchen Studien nicht von der Kenntnis des eigenen Expositionsstatus beeinflusst werden. Allerdings handelt es sich bei fast allen oben aufgeführten Studien um Querschnittsanalysen mit eingeschränkter Aussagekraft. Nur eine Studie beinhaltete eine Folgerhebung nach einem Jahr (Frei et al. 2012). Ausserdem waren die Expositionsunterschiede in allen Studien sehr gering. Für diese niedrigen Expositionen zeichnet sich aber ab, dass sie das Befinden nicht beeinträchtigen.

3.5.3 Schlaf (Architektur und Qualität)

Auswirkungen der Hochfrequenzexposition auf den Schlaf wurden teilweise in Laborstudien mit experimenteller Exposition und Auswertung des EEGs untersucht, teilweise aber auch in Befragungen zum Auftreten von Schlafstörungen in der Umgebung von Rundfunksendern oder bei Mobiltelefonbenutzern.

Einführung

Aufgrund der Studien bis September 2006 war es in UW 0722 als wahrscheinlich beurteilt worden, dass sich das Schlaf-EEG unter Mobiltelefonexposition veränderte. Die Art der Veränderungen war allerdings nicht einheitlich gewesen, zudem hatte die subjektive Bewertung der Schlafqualität keinen Zusammenhang mit der Hochfrequenzbelastung gezeigt. Zur gezielten Untersuchung von Schlafstörungen in der Umgebung eines Hochfrequenzsenders hatte nur eine Studie vorgelegen. Darin war in mehreren Auswertungen ein Zusammenhang zwischen der Exposition durch den stark emittierenden Kurzwellen-Radiosender Schwarzenburg und der Häufigkeit von berichteten Schlafstörungen beobachtet worden (Abelin et al. 2005, Altpeter et al. 2006). Deshalb war es, wie schon im Bericht UM 162, als möglich bewertet worden, dass die Emissionen solcher Kurzwellensender die Schlafqualität beeinträchtigen können.

Seit dem Bericht UW 0722 sind in 5 Studien Auswirkungen der Ganzkörperexposition auf den Schlaf evaluiert worden.

In einer österreichischen Feldinterventionsstudie wurden 43 EHS-Personen mit häufigen Schlafstörungen untersucht, die ihre Schlafstörungen auf die Hochfrequenzstrahlung von Rund- und Mobilfunksendeanlagen zurückführten (Leitgeb et al. 2008). Die Intervention bestand nicht aus einer experimentellen Exposition, sondern aus der Abschirmung der in den Schlafzimmern der Teilnehmer vorhandenen Hochfrequenzimmissionen. Alle Probanden absolvierten jeweils 3 Nächte mit Abschirmung, Scheinabschirmung und ohne Abschirmung. Die Beurteilung des Schlafs erfolgte mittels

Resultate

EEG- und EKG-Aufzeichnungen sowie gemäss Einschätzung der Probanden. Die gepoolte Auswertung der Schlafparameter aller Teilnehmer ergab keine statistisch signifikanten Effekte der Hochfrequenzexposition. Auch bezüglich subjektiver Schlafqualität, Aufwachqualität oder Schlaffeffizienz bestanden keine Unterschiede. In der probandenspezifischen Auswertung berichteten 3 Teilnehmer über eine Verbesserung ihrer Schlafqualität und -effizienz bei realer Abschirmung. Dagegen waren die Schlaflatenz-Zeiten von 4 Probanden bei echter Abschirmung, also ohne Hochfrequenzimmissionen, statistisch signifikant länger als bei Scheinabschirmung oder ohne Abschirmung.

Neben der Feldintervention beinhaltete die Studie von Leitgeb et al. 2008 auch eine Querschnittsauswertung zur Schlafqualität der 43 Teilnehmer mit EHS während der drei Studienächte ohne Abschirmung. Dabei ging es um Auswirkungen der Grundbelastung durch Hochfrequenzfelder in den Schlafzimmern der Probanden, nicht um die Effekte der experimentellen Abschirmung. In den meisten Wohnungen war die Hochfrequenzbelastung niedriger als 0,5 % des ICNIRP-Referenzwertes, der höchste Wert war 3,5 % (bei 1800 MHz: 2 V/m). Die Analysen ergaben keine Assoziation zwischen der Hochfrequenzbelastung und der Schlafqualität.

Danker-Hopfe et al. 2010 untersuchten in einer Feldinterventionsstudie in Deutschland 397 Personen, die in 10 Dörfern ohne Mobilfunkabdeckung und mit schwacher Exposition durch andere Hochfrequenzsender (TV/Radio) wohnten (Teilnahmerate: 16.9 %). Die experimentelle Exposition bestand aus einer Mobilfunkbasisstation mit zwei Sende-/Empfangsanlagen, die Signale vom Typ GSM 900 und GSM 1800 generierten. Die Basisstation wurde so aufgestellt, dass möglichst viele Teilnehmer in einem Umkreis von 500 Metern wohnten. Es wurde ein Testmodus verwendet, damit die Signale nicht auf Mobiltelefonen zu erkennen waren. Im Zeitraum von 2 Wochen wurden die Teilnehmer jeweils 5 Nächte exponiert und 5 Nächte scheinexponiert. Der Wechsel zwischen Exposition und Scheinexposition erfolgte pro Nacht, in randomisierter Reihenfolge und unter Doppelblindbedingungen. Untersucht wurde die objektive und subjektive Qualität des Schlafes in der eigenen Umgebung. Während jeweils 6 Nächten wurden polysomnographische Aufzeichnungen des Schlafes durchgeführt, ausserdem beantworteten die Teilnehmer am Anfang der Studie mehrere Fragebögen zu ihren Schlafverhalten. Zusätzlich führten sie jeden Morgen und jeden Abend Protokoll über die Aktivitäten während des Tages und ihre Schlafqualität. Als primäre Zielgrösse sowohl für die objektive, als auch für die subjektive Schlafqualität diente der Schlaffeffizienz-Index ($SEI = \text{Gesamtschlafzeit} / \text{Zeit im Bett} \times 100$). Die Auswertung der objektiven Schlafqualität basierte auf Daten von 335 Personen, für die subjektive Schlafqualität von 363 Personen. Der Schlaffeffizienz-Index unterschied sich weder in der objektiven, noch in der subjektiven Erfassung statistisch signifikant zwischen den beiden Expositionsarten ($p=0.4$ bzw. 0.8). Auch bei getrennter Auswertung der Personen mit und ohne Besorgnis wegen der Belastung durch elektromagnetische Felder bestanden keine expositionsabhängigen Unterschiede. Dasselbe galt für weitere 7 objektiv oder subjektiv erfasste Schlafparameter, unter anderem die Einschlafzeit und Dauer der Wachphasen in der Nacht. [Die Ergebnisse der Expositionsmessungen vor Beginn der Studie sind in der Publikation nicht aufgeführt. Ausserdem fehlen Angaben zur Sendeleistung der Basisstation respektive der experimentellen Exposition der Teilnehmer. Ebenfalls nicht erwähnt ist, ob die Teilnehmer Medikamente oder Drogen einnahmen.]

Auch in der bereits oben beschriebenen Qualifex-Studie wurde die subjektive Schlafqualität der Teilnehmer evaluiert (Mohler et al. 2010). Die Abschätzung der Hochfrequenzexposition durch Sendeanlagen des Mobil- und Rundfunks erfolgte mit Hilfe eines dreidimensionalen Ausbreitungsmodells. Für die Hochfrequenzbelastung während der Nacht wurde ein erweitertes Prädiktionsmodell entwickelt, das zusätzliche Faktoren enthielt, z. B. DECT-Basisstationen im Schlafzimmer. In der Querschnittsauswertung zum Schlaf beantworteten die Teilnehmer Fragen zu drei Themenbereichen: a) Schlafqualität und Gesundheitszustand, b) expositionsrelevante Verhaltensweisen und Informationen, c) soziodemographische Angaben und Lebensstilfaktoren. Die Schlafqualität wurde mit Hilfe von standardisierten Fragen aus der Schweizerischen Gesundheitsbefragung evaluiert und zu einem Qualitätsscore (SQS) zusammengefasst. Das Bestehen einer exzessiven Tagesschläfrigkeit wurde mittels «Epworth Sleepiness Scale» (ESS) erfasst. Verglichen wurden drei Expositionskategorien: <50. Perzentil, 50. bis 90. Perzentil, >90. Perzentil. Für die Auswertung der Tagesschläfrigkeit lagen Daten von 1129 Teilnehmern vor, für die Auswertung der Schlafqualität von 1163 Teilnehmern. Die Regressionsanalysen zeigten keine statistisch signifikanten Zusammenhänge zwischen der Hochfrequenzbelastung und der selbstberichteten Tagesschläfrigkeit oder Schlafqualität.

Für die Follow-up-Auswertungen der Qualifex-Studie wurden die Teilnehmer nach einem Jahr gebeten, den selben Fragebogen erneut auszufüllen (Mohler et al. 2012). Die Hochfrequenzexposition zum ersten Erhebungszeitpunkt wurde mit der Entwicklung der Schlafqualität bis zur Follow-up-Untersuchung nach einem Jahr in Beziehung gesetzt (Kohortenanalyse). Eine zusätzliche Analyse betraf die Frage, ob Expositionsveränderungen während des Jahres auch mit Veränderungen der Schlafqualität einhergingen (Veränderungsanalyse). Für diese Auswertungen standen Daten von 955 Personen zur Verfügung, das Durchschnittsalter lag bei 47 Jahren. Die Teilnahmerate lag für die erste Befragung bei 35 %, in der Follow-up-Untersuchung bei 82 %. Der Mittelwert der Hochfrequenzexposition zu Beginn der Studie betrug 0.21 V/m. Ausgewertet wurden jeweils 6 Expositionsparameter: selbstberichtete Mobiltelefonbenutzung, objektiv erfasste Daten zum Mobiltelefongebrauch, selbstberichtete Benutzung von Schnurlos-telefonen, Fernfeldexposition insgesamt und während der Nacht sowie durch ortsfeste Sendeanlagen. Für die Kohortenanalyse wurden 3 Expositionskategorien gebildet: unterhalb des Medians (Referenzgruppe), 50. bis 90. Perzentil und >90. Perzentil. In der Veränderungsanalyse wurden die jeweils 20 % der Teilnehmer mit dem grössten Anstieg oder der grössten Expositionsabnahme den übrigen 60 % mit geringeren oder keinen Veränderungen gegenübergestellt. Aus diesen Vergleichen resultierten 48 Regressionsanalysen zur Tagesschläfrigkeit und zu Schlafstörungen. Sechs von diesen Analysen ergaben statistisch signifikante Resultate. Es bestand kein einheitliches Muster, das auf eine geringere Schlafqualität bei stärkerer Hochfrequenzbelastung oder auf einen Zusammenhang mit Expositionsveränderungen innerhalb eines Jahres hinwies. Um die Schlafqualität auch objektiv zu messen, erhielten 120 Personen aus dieser Studie ein Gerät zur Bewegungsmessung (Actigraph), das sie zwei Wochen lang am Handgelenk trugen. Dabei wurde während einer Woche die EMF-Belastung im Schlafzimmer gemessen. In dieser Analyse bestanden keine statistisch signifikanten Assoziationen zwischen der gemessenen Exposition und der objektiv erfassten Schlafdauer oder Schlafeffizienz. Auch die Angaben der Teilnehmer zur Erholbarkeit des Schlafes korrelierten nicht mit der Exposition.

Die Resultate der neueren Studien weisen nicht auf Beeinträchtigungen der Schlafqualität durch Hochfrequenzfelder von Sendeanlagen hin. Bei den neuen Studien wurde insbesondere versucht, eine Verblindung gegenüber dem Expositionsstatus sicher zu stellen. Daher sind die Resultate aussagekräftiger als in früheren Studien. Eine abschliessende Bewertung wird allerdings durch die teilweise kleinen Kollektive und die kurze Beobachtungsdauer erschwert. Zudem waren die Expositionsunterschiede in den neuen Studien deutlich geringer als in einer früheren Studie in der Umgebung eines Kurzwellensenders, die auf Effekte hinwies. Es ist auch nicht auszuschliessen, dass Kurzwellen andere Effekte verursachen als die heutigen hochfrequenten elektromagnetischen Felder, die hauptsächlich vom Mobilfunk, von Schnurlostelefonen und W-LAN stammen. Auch bei der Erfassung der Schlafqualität besteht noch Verbesserungsbedarf, da die Schlaf- und Wachzeiten teilweise nicht genügend dokumentiert wurden und Informationen über den Gesundheitszustand sowie die Medikamenteneinnahme manchmal fehlten.

Bewertung

Tab. 8 > Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf den Schlaf

Studie	Exposition	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität, Expositionskategorien	Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation	Bemerkungen
Leitgeb et al. 2008	Abschirmung der Hochfrequenzexposition im Schlafzimmer	K	80–2500	Abschirmung, (<0.5 bis 3.5 % des ICNIRP-Referenzwertes)	Bei realer Abschirmung: + Schlafqualität und -effizienz bei 3 von 43 EHS-Personen + Latenzzeit in verschiedenen Schlafstadien bei 4 von 43 EHS-Personen (negativer Effekt der Abschirmung)	Subjektive Schlafqualität, Aufwachqualität und Schlaffeffizienz in der Gesamtauswertung und bei 34 Teilnehmern in der Einzelauswertung; objektive Schlafparameter in der Gesamtauswertung	Teilnehmer: Personen mit EHS und häufigen Schlafstörungen
Leitgeb et al. 2008	Hochfrequenzexposition insgesamt, Querschnittsanalyse	L	80–2500	<0.5 bis 3.5 % des ICNIRP-Referenzwertes		Schlafqualität	Teilnehmer: Personen mit EHS und häufigen Schlafstörungen
Danker-Hopfe et al. 2010	Mobilfunkbasisstation, Feldinterventionsstudie	K	GSM 900 GSM 1800	k.A.		Subjektive und objektive Schlaffeffizienz, Aufenthaltsdauer im Bett, Schlafdauer insgesamt, Schlaflatenz, nächtliches Aufwachen, Erholungsgefühl am Morgen	Angaben zur Exposition und zur Medikamenteneinnahme fehlen
Mohler et al. 2010	Hochfrequenzexposition von Sendeanlagen und Fernfeldbelastung insgesamt	L	GSM 900, GSM 1800, UMTS, DECT, WLAN, TV/Radio	3 Kategorien (V/m) (<Median, 50–90 %, >90 %): Fernfeldbelastung insgesamt: <0.18, 0.18–0.21, 0.21–0.33; von Sendeanlagen: <0.04, 0.04–0.12, 0.12–0.62; während der Nacht: <0.02, 0.02–0.09, 0.09–0.33		Selbstberichtete Schlafstörungen, exzessive Tages schläfrigkeit	
Mohler et al. 2012	Hochfrequenzexposition von Sendeanlagen und Fernfeldbelastung insgesamt	L	GSM 900, GSM 1800, UMTS, DECT, WLAN, TV/Radio	3 Kategorien (V/m) (<Median, 50–90 %, >90 %): Fernfeldbelastung insgesamt: <0.21, 0.21–0.25, 0.25–0.39; von Sendeanlagen: <0.061, 0.061–0.14, 0.14–0.73; während der Nacht: 0.00, 0.00–0.12, 0.14–0.39		Subjektive Schlafqualität, aktimetrisch gemessene Schlafdauer und Effizienz	

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16; EHS=Elektromagnetische Hypersensibilität, K=Kurzzeit, L=Langzeit, k. A.=keine Angaben, übrige Abkürzungen siehe Glossar

3.6 Kanzerogene Wirkungen

3.6.1 Gentoxizität

Als gentoxisch gilt ein Agens, wenn es direkt oder indirekt das Erbgut einer Zelle schädigt. Experimente zur Gentoxizität 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. Für den Bericht UW 0722 hatten insgesamt 6 Studien zu dieser Fragestellung vorgelegen. Bei allen hatten gravierende methodische Mängel bestanden, unter anderem bezüglich der Vergleichbarkeit von Exponierten und Nichtexponierten oder der Expositionsabschätzung. Daher war die Datenlage ungenügend gewesen, um zu beurteilen, ob hochfrequente Strahlung auf in vivo exponierte menschliche Zellen gentoxisch wirkt.

In der Zwischenzeit wurden nur in einer Studie gentoxische Effekte der Hochfrequenzstrahlung von Sendeanlagen am Menschen untersucht.

Die kleine türkische Querschnittsstudie umfasste 4 Frauen und 10 Männer (Durchschnittsalter: 28.4 Jahre), die in der obersten Etage von 10 Gebäuden wohnten, auf deren Dächern sich Mobilfunkbasisstationen befanden (Yildirim et al. 2010). Die Kontrollgruppe bildeten 5 Frauen und 9 Männer (Durchschnittsalter: 27.5 Jahre), deren Wohnungen grössere Entfernungen von einer Basisstation hatten. Die Blutentnahme fand für alle Teilnehmer zur gleichen Zeit statt. Ausgewertet wurde die Anzahl der Mikrokerne in den Blutzellen und ihr Anteil bezogen auf die Gesamtzahl der Zellen. Zusätzlich erfolgte eine Chromosomenanalyse, bei der 100 Chromosomen in Metaphase auf Schädigungen (Aberrationen) untersucht wurden. Die Häufigkeit von Mikrokernen lag in der exponierten Gruppe im Durchschnitt bei 8.96 ± 3.51 und in der Kontrollgruppe bei 6.97 ± 1.52 , der Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p=0.16$). Auch der Anteil der Chromosomen-Aberrationen in den Blutproben der beiden Personengruppen unterschied sich nicht signifikant ($p>0.07$). [Die Aussagekraft dieser Studie ist gering, weil nahezu keine Informationen über die tatsächliche Exposition der Personen in den beiden Gruppen vorlagen und auch sonst wesentliche Informationen fehlen.]

Resultat

Diese neue Studie erlaubt weiterhin keine Beurteilung der Frage, ob die Hochfrequenzbelastung durch Mobilfunkbasisstationen gentoxisch wirken kann.

Bewertung

Tab. 9 > Studie zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf in vivo exponierte Blutzellen

Studie	Expositionsquelle	Dauer	Signal, Frequenz [MHz]	Intensität	signifikante Assoziation	keine oder nicht signifikante Assoziation
Yildirim et al. 2010	Mobilfunkbasisstation auf dem Dach des Wohnhauses	L	k. A.	k. A.		Mikrokerne, Chromosomenaberrationen

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16; L=Langzeit, k. A.=keine Angaben

3.6.2 Krebsrisiko: bisheriger Kenntnisstand

Im Bericht UM 162 war ein Zusammenhang zwischen der Hochfrequenzexposition durch Rundfunksender und dem Leukämierisiko aufgrund der Resultate der frühen ökologischen Studien bis 2002 als möglich erachtet worden. In den darauf folgenden Jahren waren dann keine neuen Studien zu dieser Thematik erschienen, sodass im Bericht UW 0722 nur Studien zum Leukämierisiko bei Mobiltelefonbenutzern diskutiert werden konnten. Einige dieser Studien hatten auf ein erhöhtes Leukämierisiko bei Mobiltelefonbenutzern hingewiesen. Die Beurteilung der Evidenz war aber als unmöglich erachtet worden, weil an diesen Studien nur wenige Personen mit langjähriger Mobiltelefonbenutzung teilgenommen hatten. Daher war der Zusammenhang zwischen der Fernfeldexposition durch starke Rundfunksender und dem Leukämierisiko im Bericht UW 0722 wegen der früheren Resultate weiterhin als möglich erachtet worden.

Einführung

Zum Hirntumorrisiko bei Anwohnern in der Nähe von Fernseh- oder Radiosendern hatten bis zum Bericht UW 0722 ebenfalls nur einige ältere Studien vorgelegen. Dagegen war das Hirntumorrisiko bei Mobiltelefonbenutzern in zahlreichen Studien untersucht worden. Aufgrund der Ergebnisse dieser Studien war es als «möglich» beurteilt worden, dass die intensive, langjährige Benutzung, vor allem von analogen Mobiltelefonen, mit einem erhöhten Hirntumorrisiko einhergehen könnte. Allerdings hatten die Gesamtergebnisse der grossen multinationalen Fall-Kontrollstudie «Interphone» zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorgelegen. Diese Gesamtauswertung wurde erst im Jahr 2010 publiziert. Im Jahr 2011 nahm die IARC (International Agency for Research on Cancer) eine Gesamtbeurteilung der Evidenz vor und klassifizierte hochfrequente elektromagnetische Felder als «möglicherweise krebserregend» (Baan et al. 2011). Diese Bewertung beruhte auf einzelnen epidemiologischen Studien (u.a. Interphone), in denen ein erhöhtes Risiko für Gliome und Akustikusneurinome bei Personen mit intensiver Mobiltelefonbenutzung beobachtet worden war. In Bezug auf Fernfeldexpositionen durch Sendeanlagen bewertete die Arbeitsgruppe der IARC die vorhandene Evidenz als ungenügend, um eine Beurteilung vorzunehmen.

3.6.3 Krebsrisiko bei Kindern: neue Studien

Seit dem Bericht UW 0722 sind zwei Studien zum Krebsrisiko bei Kindern erschienen, in denen die Exposition durch Rundfunksender untersucht wurde, und zwei Studien zur Exposition durch Mobilfunkbasisstationen. Im Vordergrund standen bei beiden Studien die häufigsten bösartigen Erkrankungen im Kindesalter: Leukämien und Hirntumoren.

Eine südkoreanische Registerstudie aus dem Jahr 2004 hatte auf erhöhte Leukämierisiken bei Kindern und jüngeren Erwachsenen in der Umgebung von AM-Radiosendern hingewiesen (Park et al. 2004, vgl. UW 0722). Auch die Krebssterblichkeit insgesamt war in den Gebieten um die Sender höher gewesen, es hatte aber keine Assoziation mit der Sendeleistung der Radiosender bestanden. Aufgrund dieser Resultate führten die Autoren später eine registerbasierte Fall-Kontrollstudie zur Häufigkeit von Leukämien und Gehirntumoren bei Kindern durch (Ha et al. 2007). Untersucht wurden 1928 Kinder unter 15 Jahren, bei denen zwischen 1993 und 1999 eine Leukämie diagnostiziert worden war, und 956 Kinder, die an einem Hirntumor erkrankt waren. Die Daten der 3082 Kontrollkinder stammten aus dem Register des nationalen Krankenversicherungssystems. Sie wurden zufällig aus einer Gruppe von Patienten ausgewählt, die wegen Atemwegserkrankungen in Behandlung waren, und jeweils einem Krebspatienten mit gleichem Geschlecht, Alter und Diagnosejahr zugeordnet. Berücksichtigt wurden 31 AM-Radiosender in verschiedenen Regionen mit Sendeleistungen von mindestens 20 kW. Mithilfe eines geographischen Informationssystems wurde ein Simulationsprogramm entwickelt und die Exposition für jedes Kind berechnet. Für Kinder in Regionen im Umkreis von 2 km um einen Radiosender ergab sich verglichen mit Kindern aus Regionen, die über 20 km von einem Sender entfernt wohnten, ein knapp statistisch signifikant erhöhtes Leukämierisiko von 2.15 (95 %-CI: 1.00–4.67). Bei Kindern in Entfernungen von 2 bis 4 km war das Erkrankungsrisiko dagegen signifikant vermindert (OR: 0.66, 95 %-CI: 0.44–0.99), und es bestand keine lineare Expositions-Wirkungsbeziehung ($p=0.10$). Bezogen auf die errechneten Feldstärken waren in der Originalpublikation fehlerhafte Resultate angegeben, die nach einem Leserbrief (Schüz et al. 2008) in der Antwort von (Ha et al. 2008) korrigiert wurden. In den korrigierten Resultaten bestand in keinem Quartil der Gesamtexposition ein erhöhtes Leukämierisiko, weder für die lymphatische, noch für die myeloische Form. Die Auswertung der Spitzenbelastung, die im Originalartikel nicht aufgeführt war, und sich nur auf die Exposition des Senders mit dem höchsten Beitrag bezog, ergab für Kinder im höchsten Quartil eine signifikant erhöhte Odds Ratio von 1.40 (95 %-CI: 1.04–1.88) bezüglich lymphatischer Leukämie und eine signifikant erniedrigte Odds Ratio von 0.63 (95 %-CI: 0.41–0.97) für myeloische Leukämie. Für alle Leukämien zusammen war keine Assoziation zu beobachten (1.02, 95 %-CI: 0.81–1.29; p für Trend: 0.43). Die Autoren sehen in ihren Ergebnissen Hinweise auf einen kausalen Zusammenhang zwischen der Hochfrequenzexposition und Leukämie-Erkrankungen im Kindesalter. [Die Inkonsistenz der Resultate spricht gegen diese Schlussfolgerung. Die entgegengesetzten Risikoschätzer für die beiden Leukämietypen könnten durch regionale Unterschiede in der Krankheitsverteilung zustande gekommen sein. Zudem ist nicht nachvollziehbar, warum das Expositionsmass «maximale Spitzenbelastung durch einen einzelnen Radiosender» aussagekräftiger sein soll als die Gesamtbelastung durch alle Hochfrequenzsender. Falls ein Zusammenhang besteht, müsste sich dieser auch für die Gesamtbelastung zeigen.]

Resultate

Merzenich et al. 2008 evaluierten in einer Fall-Kontrollstudie das Leukämierisiko von Kindern in der Umgebung von Radio- und Fernsehsendern. Das Studiengebiet setzte sich aus 805 Ortschaften in der Umgebung der stärksten Radio- und Fernsehsender in den westdeutschen Bundesländern zusammen. In die Studie aufgenommen wurden Kinder unter 15 Jahren, die von 1984 bis 2003 im Deutschen Kinderkrebsregister wegen einer Leukämiediagnose erfasst worden waren und zum Zeitpunkt der Diagnose in einer Studienregion wohnten. Aus den Bevölkerungsregistern wurden für jeden Patienten drei Kontrollkinder mit entsprechendem Alter, Geschlecht und Wohnort gezogen. Es wurden 16 AM-Sender und 8 FM-/Fernsehsender ausgewählt. Die technischen Daten der Rundfunksender stammten von den Netzbetreibern, die kumulative durchschnittliche Feldstärke der Hochfrequenzstrahlung wurde mittels Ausbreitungsmodell und geographischem Informationssystem für alle Adressen berechnet. Eine Validierungsstudie ergab eine hohe Korrelation zwischen den berechneten Werten und der gemessenen Hochfrequenzbelastung (Schmiedel et al. 2009). Als stark exponiert galten Kinder, die ein Jahr vor der Diagnose zu den obersten 10 % der Expositionsverteilung gehörten. Diese Kategorisierung wurde gewählt, weil die Mehrheit der Teilnehmer nur Hintergrundbelastungen ausgesetzt war. Für die stärker exponierte Gruppe lag der Median der berechneten elektrischen Feldstärke (AM und FM/TV) zwischen 0.50 und 7.74 V/m. Sie wurde noch einmal unterteilt in die 90. bis 94. Perzentile (0.50 bis 0.70 V/m) und die 95. bis 100. Perzentile (0.70 bis 7.74 V/m). Als Referenzgruppe dienten jeweils Kinder mit Expositionen unterhalb der 90 %-Perzentile (<0.50 V/m). Vollständige Informationen lagen für 5848 Kontrollkinder und 1959 an Leukämie erkrankte Kinder vor, davon 1586 (81 %) mit lymphatischer Leukämie. Die Auswertungen ergaben für Kinder mit Hochfrequenzbelastungen oberhalb der 95 %-Perzentile kein höheres Leukämierisiko als in der Referenzgruppe (OR: 0.86, 95 %-CI: 0.67–1.11). Auch die Auswertung der Distanz zwischen Wohnung und Rundfunksender ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede für Kinder im Umkreis von 0 bis 2 km gegenüber Kindern aus 10 bis 15 km entfernten Wohngebieten. Das galt sowohl für das Leukämierisiko insgesamt (OR: 1.04, 95 %-CI: 0.65–1.67), als auch für die Subgruppe der lymphatischen Leukämien (OR: 1.31, 95 %-CI: 0.80–2.15). Auch separate Auswertungen für AM- und FM/TV-Sender ergaben ähnliche Resultate. [Da es sich um eine registerbasierte Studie handelte, lagen keine Informationen über zusätzliche Einflussfaktoren vor, die das Leukämierisiko beeinflussen könnten. Zusätzliche Details der Studienmethodik wurden in einer weiteren Publikation veröffentlicht (Merzenich et al. 2007).]

Elliott et al. 2010 führten die erste landesweite Bevölkerungsstudie zum Krebsrisiko von Kindern im Zusammenhang mit der Exposition der Mütter während der Schwangerschaft durch Mobilfunkbasisstationen durch. Diese Studie basierte auf Daten der nationalen britischen Geburten- und Krebsregister. Mit Hilfe eines geographischen Informationssystems und Daten für alle Mobilfunkbasisstationen (GSM 900 und 1800) in Grossbritannien wurde die Exposition der Studienteilnehmer am Wohnort ermittelt. Als Expositionsmasse dienten: a) Distanz zwischen dem Wohnort der Mutter zum Zeitpunkt der Geburt und der nächsten Mobilfunkbasisstation, b) Summe der Sendeleistung (in kW) aller Basisstationen im Umkreis von 700 m und c) Leistungsdichte (in dBm) aller Basisstationen im Umkreis von 1400 m gemäss Ausbreitungsmodell. Für alle drei Expositionsmasse wurden Durchschnittswerte über neun Schwangerschaftsmonate berechnet. Anhand der Registerdaten wurden 1926 Kinder identifiziert, bei

denen im Alter von 0 bis 4 Jahren eine Krebserkrankung diagnostiziert worden war. Für 1397 Kinder (73 %) lagen zusätzlich vollständige Informationen über die Adresse der Mutter während der Schwangerschaft vor. An Leukämie oder einem Non-Hodgkin-Lymphom waren 527 Kinder erkrankt und 251 an einem Hirntumor. Für jeden Patienten wurden vier Kontrollkinder mit passendem Geschlecht und Geburtsdatum aus dem nationalen Geburtenregister zufällig ausgewählt. Die Auswertungen ergaben keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Fall- und Kontrollgruppe bezüglich Entfernung bis zur nächsten Basisstation (1107 vs. 1073m, $p=0.31$), mittlerer Sendeleistung der Basisstationen (2.89 vs. 3.00 kW, $p=0.54$) oder modellierter Leistungsflussdichte (-30.3 vs. -29.7 dBm, $p=0.41$). [Es handelt sich um eine registerbasierte Studie, die keine aktive Mitwirkung der Studienteilnehmer erfordert. Dadurch liessen sich Selektions- und Informationsfehler vermeiden. Allerdings lagen keine individuellen Expositionsmessungen vor, und andere Hochfrequenzquellen als Basisstationen konnten nicht berücksichtigt werden. Ebenfalls nicht erfasst wurden die Expositionen der Kinder nach der Geburt sowie zusätzliche Einflussfaktoren.]

In einer Fall-Kontrollstudie aus Taiwan wurden ebenfalls Zusammenhänge zwischen der Exposition durch Mobilfunkbasisstationen und Krebsrisiken bei Kindern untersucht (Li et al. 2012). Rekrutiert wurden Kinder und Jugendliche bis 15 Jahre, bei denen zwischen 2003 und 2007 eine Tumorerkrankung diagnostiziert worden war. Zur Auswertung kamen Daten von 2606 Kindern, darunter 939 Leukämie- und 394 Hirntumorpatienten. Für jedes Kind wurden 30 Kontrollkinder mit passendem Geburtsjahr aus einem landesweiten Versicherungsregister zufällig ausgewählt. Die Analyse zur Leukämie umfasste 28170, diejenige zum Hirntumorrisiko 11820 Kontrollkinder. Vom «Taiwan National Communication Council» lagen technische Angaben zu 71185 Basisstationen vor, die zwischen 1998 und 2007 in Betrieb waren. Für alle Basisstationen wurde das Produkt aus Sendeleistung (W) und Betriebsdauer berechnet (Jahre) und durch die Fläche der jeweiligen Gemeinde geteilt (Watt-Jahren/km²). Dieses Belastungsmass galt als Schätzwert für die Exposition der Kinder und wurde für jeweils 5 Jahre vor dem Diagnosezeitpunkt ermittelt. Die Auswertungen ergaben bei Kindern, deren Hochfrequenzbelastung über dem Median lag, ein statistisch signifikant erhöhtes Krebsrisiko insgesamt (OR: 1.13, 95 %-CI: 1.01–1.28). Bezogen auf Leukämien war der Risikoanstieg statistisch nicht signifikant (1.23, 95 %-CI: 0.99–1.52), für Hirntumoren bestand keine Assoziation (1.14, 95 %-CI: 0.70–1.85). Die Einteilung in drei Expositionskategorien ergab keine Dosis-Wirkungsbeziehungen. [Die Hochfrequenzbelastung wurde nicht auf individuellem Niveau gemessen oder modelliert. Die Schätzwerte bezogen sich auf die Gemeinde, in der das Kind zum Zeitpunkt der Diagnose wohnte, und die Berechnungen wurden nicht validiert. Es ist zu erwarten, dass das verwendete Expositionsmass in erster Linie Urbanität repräsentiert, da in urbanen Gebieten mehr Sendeleistung installiert ist. Da die Analysen nicht für Urbanität kontrolliert wurden, ist die Interpretierbarkeit der Studie eingeschränkt. Eine Stärke der Studie ist das grosse Kollektiv. Andere Hochfrequenzquellen wurden nicht berücksichtigt, aber die Anzahl der Hochspannungsleitungen in der Gemeinde.]

Die neuen Studien zum Leukämierisiko bei Kindern mit grösseren Kollektiven und einer verbesserten Methodik zur Abschätzung der individuellen Exposition weisen nicht auf Assoziationen mit der Hochfrequenzbelastung durch Rundfunksender oder Mobilfunkbasisstationen hin. Vor allem in den beiden Rundfunksenderstudien scheint die Expositionsabschätzung von guter Qualität zu sein. Daher sind die Resultate dieser beiden Studien höher zu gewichten als alle bisherigen Studien zur Thematik. Beide Studien zeigen kein erhöhtes Leukämierisiko bei stärker exponierten Kindern. Die Abschätzung der durchschnittlichen Belastung durch Emissionen von Mobilfunkbasisstationen ist generell mit einer grösseren Unsicherheit verbunden, da die Exposition kleinräumig stark variiert. Daraus resultieren höhere Anforderungen an die Expositionsmodelle. Zusätzlich führt das Bewegungsverhalten der Kinder zu grösseren Fehlern in der Expositionsabschätzung, weil sie sich nicht ausschliesslich am Wohnort aufhalten. Insbesondere die taiwanesishe Studie ist aufgrund der groben Expositionsabschätzung nicht aussagekräftig. Insgesamt wird mit den neuen Studien die Evidenz für ein erhöhtes Kinderleukämierisiko gegenüber den früheren Studien in der Umgebung von Rundfunksendern abgeschwächt. Allerdings war das Expositionsniveau in allen Studien niedrig. Daher erlauben die Resultate keine Rückschlüsse bezüglich potenzieller Risiken bei Expositionen oberhalb von 3 V/m.

Auch bezüglich des Hirntumorrisikos bei Kindern haben die neuen Studien keine Hinweise auf einen Zusammenhang mit der Hochfrequenzbelastung durch ortsfeste Sendeanlagen ergeben. Es liegen aber weniger Daten vor als für Leukämie, so dass die Evidenzbeurteilung weniger robust ist.

Bewertung:

Krebsrisiko bei Kindern

Tab. 10 > Studien zum Leukämierisiko bei Kindern in der Umgebung von ortsfesten Sendeanlagen

Studie	Studientyp (Kollektiv)	Expositionsquelle (Signal, Frequenz)	Expositionskategorien	Alle Leukämien, OR (95 %-CI)	Akute lymphatische Leukämie, OR (95 %-CI)	Akute myeloische Leukämie, OR (95 %-CI)	Bemerkungen
Ha et al. 2007 und 2008	Registerbasierte Fall-Kontrollstudie (1928 Kinder mit Leukämie, 3082 Kontrollkinder)	31 AM-Rundfunksender, Sendeleistung: >20 kW	Distanz (km): 0 bis 2 >2 bis 4 >4 bis 6 >6 bis 8 >8 bis 10 >10 bis 20 >20 Quartile der Gesamtexposition (V/m): <0.52 0.52 bis <0.62 0.62 bis <0.92 ≥0.92	2.15 (1.00–4.67) 0.66 (0.44–0.99) 1.07 (0.77–1.49) 1.26 (0.96–1.65) 1.10 (0.85–1.41) 0.80 (0.65–0.99) Referenz Referenz 0.75 (0.58–0.97) 0.70 (0.55–0.90) 0.83 (0.63–1.10)	1.60 (0.96–3.72) 0.95 (0.56–1.61) 1.32 (0.87–1.99) 1.28 (0.91–1.81) 0.99 (0.72–1.36) 0.71 (0.54–0.93) Referenz Referenz 0.69 (0.50–0.96) 0.57 (0.41–0.78) 0.93 (0.67–1.29)	– 0.21 (0.13–0.71) 0.59 (0.30–1.17) 1.15 (0.68–1.96) 1.41 (0.86–2.29) 1.24 (0.81–1.89) Referenz Referenz 0.74 (0.46–1.18) 0.96 (0.62–1.49) 0.55 (0.33–0.93)	Korrigierte Resultate (Ha et al. 2008)
Merzenich et al. 2008	Fall-Kontroll-Studie (1959 Kinder mit Leukämie, 5848 Kontrollkinder)	Fernseh-/Radiosender: 16 AM und 8 FM/TV	Distanz (km): 0 bis <2 2 bis <6 6 bis <10 10 bis <15 >15 Gesamtexposition (V/m): <0.50 (90 %) 0.50 bis 0.70 (90–94 %) >0.70 bis 7.74 (95–100 %)	1.04 (0.65–1.67) 0.81 (0.66–0.99) 0.79 (0.67–0.93) Referenz 1.00 (0.88–1.14) Referenz 1.02 (0.80–1.31) 0.86 (0.67–1.11)	1.31 (0.80–2.15) 0.82 (0.66–1.03) 0.76 (0.63–0.91) Referenz 1.01 (0.87–1.16) Referenz 1.05 (0.79–1.38) 0.86 (0.65–1.15)	0.19 (0.02–1.47) 0.75 (0.45–1.24) 1.00 (0.68–1.47) Referenz 0.99 (0.72–1.37) Referenz 0.95 (0.55–1.65) 0.80 (0.42–1.50)	
Elliott et al. 2010	Fall-Kontroll-Studie (527 Kinder mit Leukämie oder Lymphom, 2108 Kontrollkinder)	Mobilfunkbasisstationen (GSM 900 und 1800)	Terzile der Distanz (m): ≥1071.8 612.1 bis 1071.7 <612 Terzile der Gesamtexposition (dBm): -70 bis -26.5 (<0.027 V/m) -26.5 bis -17.7 (0.027 bis 0.09) ≥-17.7 (≥0.09 V/m)	Leukämien und Lymphome: Referenz 0.99 (0.78–1.27) 1.05 (0.81–1.35) Referenz 1.16 (0.90–1.48) 1.03 (0.79–1.34)			Exposition der Mutter während der Schwangerschaft
Li et al. 2012	Fall-Kontrollstudie (939 Kinder mit Leukämie, 28 170 Kontrollkinder)	Mobilfunkbasisstationen (800 bis 900 oder 1800 bis 2200 MHz)	Durchschnittliche Exposition in der Gemeinde (Watt-Jahre/km²): <168.7 (<50 %) ≥168.7 (≥50 %) Terzile: <92.2 92.2 bis <392.9 ≥392.9	Referenz 1.23 (0.99–1.52) Referenz 0.85 (0.68–1.07) 0.82 (0.59–1.13)			Kein individuelles Expositionsmass

Detaillierte Erläuterungen zur Tabelle siehe S. 16, OR=Odds Ratio, übrige Abkürzungen siehe Glossar

Tab. 11 > Studien zum Hirntumorrisiko bei Kindern in der Umgebung von ortsfesten Sendeanlagen

Studie	Studientyp (Kollektiv)	Expositionsquelle (Signal, Frequenz)	Expositionskategorien	Hirntumoren, OR (95 %-CI)	Bemerkungen
Ha et al. 2007	Registerbasierte Fall-Kontrollstudie (956 Kinder mit Hirntumoren, 1020 Kontrollkinder)	31 AM Rundfunksender, Sendeleistung >20 kW	Distanz (km): 0 bis 2 >2 bis 4 >4 bis 6 >6 bis 8 >8 bis 10 >10 bis 20 >20 Quartile der Feldstärke (V/m): <0.52 0.52 bis <0.62 0.62 bis <0.92 ≥0.92	1.42 (0.38–5.28) 1.40 (0.77–2.56) 1.02 (0.66–1.57) 1.08 (0.73–1.59) 0.94 (0.67–1.33) 1.01 (0.77–1.34) Referenz Referenz 0.66 (0.47–0.92) 0.72 (0.51–1.01) 0.77 (0.54–1.10)	
Elliott et al. 2010	Fall-Kontrollstudie (251 Kinder mit Hirntumoren, 1004 Kontrollkinder)	Mobilfunkbasisstationen (GSM 900 und 1800)	Terzile der Distanz (m): ≥1071.8 612.1 bis 1071.7 <612 Terzile der Gesamtexposition (dBm): -70 bis -26.5 (<0.027 V/m) -26.5 bis -17.7 (0.027 bis 0.09) ≥-17.7 (≥0.09 V/m)	Referenz 0.95 (0.67–1.34) 0.95 (0.65–1.38) Referenz 0.97 (0.69–1.37) 0.76 (0.51–1.12)	Exposition der Mutter während der Schwangerschaft
Li et al. 2012	Fall-Kontrollstudie (394 Kinder mit Hirntumoren, 11 820 Kontrollkinder)	Mobilfunkbasisstationen (800 bis 900 oder 1800 bis 2200 MHz)	Durchschnittliche Exposition in der Gemeinde (Watt-Jahre/km²): <168.1 (<50 %) ≥168.1 (≥50 %) Terzile: <94.0 94.0 bis <392.9 ≥392.9	Referenz 1.14 (0.83–1.55) Referenz 1.03 (0.73–1.45) 1.14 (0.70–1.85)	Kein individuelles Expositionsmass

Detaillierte Erläuterungen zur Tabelle siehe S. 16, Abkürzungen siehe Glossar

3.6.4 Krebsrisiko bei Erwachsenen: neue Studien

In den letzten Jahren sind 6 epidemiologische Studien zu dieser Fragestellung erschienen. Vier Arbeiten betrafen die Hochfrequenzbelastung durch Mobilfunkbasisstationen, in den beiden anderen wurden Sendeanlagen des Militär- oder Rundfunks untersucht.

In der bereits in Kapitel 3.5.2 beschriebenen Querschnittsstudie zu einer Militärantenne auf Zypern evaluierten die Autoren neben der Häufigkeit unspezifischer Beschwerden auch die Sterblichkeitsraten in der Bevölkerung von drei unterschiedlich stark exponierten Dörfern (Preece et al. 2007). Die Mortalitätsdaten stammten von Registern, zusätzlich wurden Angaben der Dorfbewohner sowie Zählungen auf den Friedhöfen berücksichtigt. Die Anzahl der erfassten Krebstodesfälle war gering, und die drei Erfassungsmethoden ergaben unterschiedliche Zahlen. Daher waren keine aussagekräftigen Auswertungen möglich, es schienen aber keine deutlichen Unterschiede zwischen den Dörfern zu bestehen. [Da keine zuverlässigen Registerdaten vorlagen, kann die Vollständigkeit der Erfassung nicht beurteilt werden. Zudem ist unklar, ob die Bewohner der drei Dörfer bezüglich Alters- und Geschlechtsverteilung vergleichbar waren.]

Resultate

Eger et al. 2009 berichten über eine Pilotstudie zur Abklärung einer von Anwohnern beobachteten Häufung von Krebsfällen in der Umgebung einer Mobilfunkbasisstation in der deutschen Stadt Iserlohn. Die Basisstation befand sich auf einem Gebäudedach und war seit 1999 in Betrieb, untersucht wurde der Zeitraum von Januar 2000 bis Juni 2007. Zur Erfassung der Anzahl an Krebserkrankungen führten zwei Anwohnerinnen eine Tür-zu-Tür-Befragung in der Studienregion mit einem Radius von 400 m um die Mobilfunksendeanlage durch. Verglichen wurden die Krebserkrankungen von Januar 2000 bis Dezember 2004 (Zeitraum 1) mit denjenigen von Januar 2005 bis Juni 2007 (Zeitraum 2). Zudem wurde anhand von Registerdaten abgeschätzt, wie viele Erkrankungen pro Jahr zu erwarten waren. Insgesamt wurden 627 Personen ab 10 Jahren in 163 Häusern befragt. Zur Auswertung kamen die Daten von 575 Personen (265 Männer, 310 Frauen), die Erfassungsrate lag bei 50 %. Im Zeitraum 1 wurden 9 Krebserkrankungen gezählt, im Zeitraum 2 waren es 14 Fälle. Gemäss Krebsregisterdaten waren für den ersten Zeitraum 16.45 Erkrankungen zu erwarten, für den zweiten Zeitraum 9.8 Erkrankungen. Die Berechnungen ergaben ein Verhältnis der Erkrankungschancen (beobachtete Fälle zu erwartete Fälle) zwischen dem ersten und dem zweiten Zeitraum von 2.63 (95 %-CI: 1.14–6.10). Angaben zu demographischen Charakteristika und Risikofaktoren wie Rauchen, Alkoholkonsum und familiären Krebserkrankungen waren erhoben worden, konnten aber nicht ausgewertet werden, weil die Rücklaufquote der Fragebögen unter 10 % lag. [Eine Tür-zu-Tür-Befragung ist ungeeignet, um früher aufgetretene Krebsfälle zu erfassen, da die Erkrankten möglicherweise bereits verstorben sind und nicht erfasst werden, wenn keine Angehörigen mehr im Studiengebiet leben. Daher ist es nicht erstaunlich, dass im ersten Zeitraum weniger Erkrankungsfälle registriert wurden als theoretisch zu erwarten gewesen wären. Wegen der bereits vor Beginn der Studie bestehenden öffentlichen Diskussion und der niedrigen Beteiligungsrate von 50 % ist davon auszugehen, dass sich Personen mit Krebserkrankungen, die in der Studienregion wohnten, überproportional häufig an der Befragung beteiligten. Dadurch ist mit einer Verzerrung der Ergebnisse und einer Überschätzung der Anzahl Fälle zu rechnen (Selektionsbias), insbesondere im 2. Zeitraum.]

Aufgrund dieser methodischen Limitierungen ist der Vergleich der Erkrankungsrisiken im ersten und zweiten Zeitraum nicht aussagekräftig. Die Hochfrequenzbelastung der Anwohner wurde nicht berechnet oder modelliert, und es wurden keine etablierten Krebs-Risikofaktoren berücksichtigt.]

Eine französische Fall-Kontrollstudie evaluierte Zusammenhänge zwischen verschiedenen physikalischen oder chemischen Umweltfaktoren und dem Hirntumorrisiko bei Personen über 18 Jahren (Spinelli et al. 2010). Einer der potenziellen Einflussfaktoren war die Distanz zwischen Wohnadresse und nächster Mobilfunkbasisstation. Erfasst wurden alle Hirntumor-Neuerkrankungen, die im Jahr 2005 in den Kliniken von Marseille und Toulon diagnostiziert worden waren. Zur Verfügung standen Daten von 121 Patienten und 121 Kontrollpersonen mit passendem Alter und Geschlecht. In der Fallgruppe lag die Teilnahmerate bei 71.6%, für die Kontrollgruppe war sie nicht angegeben. Alle Teilnehmer wurden in persönlichen Interviews nach diversen Expositionen im Alltag (Beruf und Freizeit) gefragt. Weniger als 500 m von einer Mobilfunkbasisstation entfernt wohnten 19 Hirntumor-Patienten (15.6 %) und 33 Kontrollpersonen (27.3 %). Daraus ergab sich für Patienten eine statistisch signifikant verminderte Odds Ratio von 0.49 (95 %-CI: 0.62–0.92). [Die Distanz zwischen Basisstation und Wohnung wurde offenbar von den Teilnehmern selbst eingeschätzt, was erwiesenermaßen nicht aussagekräftig ist (Baliatsas et al. 2011). Ausserdem handelte es sich um eine explorative Studie ohne gezielte Hypothese, sodass das Resultat wenig aussagekräftig ist.]

Aus der brasilianischen Stadt «Belo Horizonte» liegt eine ökologische Studie zur Sterblichkeit an Tumorerkrankungen bei Anwohnern in der Umgebung von Mobilfunkbasisstationen vor (Dode et al. 2011). Analysiert wurden über 7000 Todesfälle bei Erwachsenen und Kindern (0 bis 99 Jahre), die zwischen 1996 und 2006 im Sterberegister der Stadt erfasst worden waren. Die kürzeste Entfernung von der Wohnadresse bis zur nächsten Basisstation wurde ebenfalls anhand von Registerdaten berechnet. Todesfälle an Krebserkrankungen, die bereits früher im Zusammenhang mit EMF-Expositionen untersucht worden waren, wurden 10 Umkreisen mit Radien von 100 bis 1000 m um eine Basisstation herum zugeordnet. Um die Mortalitätsraten für die einzelnen Radien zu berechnen, wurde die Anzahl der Todesfälle durch die jeweilige Bevölkerung unter Risiko geteilt. Ab dem zweiten Umkreis (bis 200 m) wurden die Todesfälle und die Bewohnerzahlen jeweils zur entsprechenden Anzahl in den vorhergehenden Kreisen dazugezählt. Für den kleinsten Umkreis (bis 100 m) ergab sich eine Sterberate von 43.4 Personen pro 10 000 Einwohner. In der Gesamtbevölkerung lag die Sterberate bei 32.1 Personen. Daraus errechnete sich ein Verhältnis der Sterberaten von 1.35 für den kleinsten Umkreis. Im zweiten Umkreis (0 bis 200 m) lag die Sterberate bei 40.2 Personen pro 10 000 Einwohner und das Ratenverhältnis bei 1.25. Mit zunehmendem Radius des Umkreises nahm das Verhältnis der Sterberaten weiter ab. Es wurden keine Tests vorgenommen, um die statistische Signifikanz dieser Unterschiede zu überprüfen. [Über die tatsächliche Hochfrequenzbelastung der einzelnen Personen lagen keine Informationen vor. Die Entfernung von einer Basisstation sagt wenig über die Exposition der Anwohner aus, weil die Ausbreitung der hochfrequenten Felder sehr inhomogen ist und von vielen Faktoren beeinflusst wird (Frei et al. 2010). Zudem wurden keine Faktoren berücksichtigt, die das Krebsrisiko nachgewiesenermaßen beeinflussen, beispielsweise Alter und Geschlecht. Ein weiteres Problem ist, dass die

Anzahl der Todesfälle in den kleineren Umkreisen um die Basisstationen herum auch in allen grösseren Umkreisen enthalten war. Der grösste Umkreis mit einem Radius von 1000 m umfasste 96 % der Einwohner von Belo Horizonte. Dementsprechend musste das Sterblichkeitsraten-Verhältnis in diesem grössten Umkreis bei 1 liegen. Offensichtlich hatten die Autoren keine Angaben zur geographischen Verteilung der Bevölkerung. Sie geben deshalb an, dass diese Verteilung für die Berechnung der Sterberaten abgeschätzt wurde. Wie das erfolgte, ist nicht beschrieben, obwohl es von entscheidender Bedeutung für die Interpretierbarkeit der Ergebnisse wäre. Falls die Bevölkerungsdichte in der Nähe von Mobilfunkbasisstationen höher war (z. B. weil Mobilfunkbasisstationen häufig auf hohen Gebäuden stehen), dies jedoch nicht berücksichtigt wurde, würden die Sterberaten in der Nähe von Mobilfunkbasisstationen automatisch überschätzt. Zudem unterscheiden sich städtischere Areale auch hinsichtlich Sozialstatus, Altersverteilung, medizinischer Versorgung usw. von entlegeneren Regionen. Diese Unterschiede wurden in der Analyse nicht berücksichtigt.]

In einem israelischen Dorf wurde eine interviewbasierte Fall-Kontrollstudie durchgeführt, weil sich die Bewohner wegen der Hochfrequenzbelastung durch Rund- und Mobilfunksender Sorgen machten (Atzmon et al. 2012). Evaluiert wurden verschiedene Einflussfaktoren und die Frage, ob bei den Anwohnern in der Nähe von Sendeanlagen häufiger Krebserkrankungen auftraten. Insgesamt nahmen 307 Personen an der Studie teil. In den Interviews gaben 47 Personen an, in der Vergangenheit eine Krebsdiagnose erhalten zu haben. Diese Diagnose wurde anhand von medizinischen Dokumenten verifiziert. Die Abschätzung der Belastung basierte auf der berechneten Distanz bis zur nächsten Sendeanlage (Formel: $1/\text{Distanz (in m)}^2$). Für dieses Schätzmass bestand keine Assoziation mit dem Krebsrisiko insgesamt (OR: 1.00, 95 %-CI: 0.99–1.02, n=47). Bezüglich Brustkrebs (n=10) ergab sich ein inverser Zusammenhang (OR: 0.84, 95 %-CI: 0.72–0.79). Für Darmkrebs (n=11) war die Assoziation dagegen leicht positiv (OR: 1.03, 95 %-CI: 1.01–1.05). [In der Publikation fehlen wesentliche Informationen zur Auswahl der Patienten und Kontrollpersonen sowie zu den Teilnahmeraten. Die Autoren merken zudem an, dass viele Basisstationen zum Zeitpunkt der Studie wegen der Anwohnerproteste bereits nicht mehr existierten. Auch das untersuchte Kollektiv war sehr klein, und die Expositionsabschätzung basierte lediglich auf der Distanz bis zur nächsten Sendeanlage.]

Das Ziel einer Studie von Stewart et al. 2012 war die Abklärung einer von den Anwohnern berichteten Häufung von Krebserkrankungen im Jahr 1997 in der Nähe einer Mobilfunkbasisstation im britischen Bezirk Sandwell. Anhand von Registerdaten und Anwohnerangaben wurden 19 Personen identifiziert, die zwischen 1974 und 2010 an Krebs erkrankt waren und in der fraglichen Strasse wohnten. Da es sich um verschiedene Krebsarten handelte, waren die Kriterien für einen Cluster nicht erfüllt. Zusätzlich lagen die Raten für Neuerkrankungen und Todesfälle im ganzen Bezirk vor (Zeiträume: 1993–1995, 1999–2001, 2001–2003 und 2002–2004). Diese Zahlen wurden mit denjenigen der Gesamtregion («West Midlands») verglichen. Wenn alle Krebserkrankungen gemeinsam (nach Ausschluss von Hautkrebs) ausgewertet wurden, war die Sterblichkeitsrate im Zeitraum zwischen 2001 und 2003 bei Frauen statistisch signifikant erhöht (SMR: 1.38, 95 % CI: 1.08–1.74), aber nicht bei Männern (SMR: 1.20, 95 % CI: 0.92–1.55). In keinem Untersuchungszeitraum wurden signifikante Unterschiede bezüglich Darm-, Brust- oder Prostatakrebs beobachtet. Für weissen Hautkrebs

(ohne Melanome) war das Erkrankungsrisiko in Sandwell niedriger als in der Region. [Wie die Autoren ebenfalls anmerken, sind Studien um einzelne Sendeanlagen herum im Allgemeinen nicht geeignet, um Kausalzusammenhänge zwischen Exposition und Krebsrisiko aufzuzeigen oder auszuschliessen.]

Wie bereits in den älteren Studien bestehen auch bei den neuen Studien zum Krebsrisiko von Erwachsenen verschiedene methodische Probleme. Dazu gehören Unklarheiten bei der Auswahl des Untersuchungsgebietes, mangelhafte Expositionsbestimmung, kleine Fallzahlen und fehlende Berücksichtigung von Störfaktoren. Eine weitere Schwierigkeit bei der Interpretation der Resultate ist, dass in den meisten Studien sehr heterogene Kollektive untersucht wurden, teilweise auch Kinder und Erwachsene gemeinsam. Dies ist angesichts der Bedeutung des Alters als der wichtigste Risikofaktor für Krebserkrankungen nicht sinnvoll. Besonders ungünstig ist diese Heterogenität, wenn sich auch die Altersstruktur in den einzelnen Expositionsgruppen unterscheidet und dies in der Auswertung nicht berücksichtigt wird.

Die Hauptschwierigkeit für die Erforschung von Krebsrisiken im Zusammenhang mit der Fernfeldexposition ist die Abschätzung der Langzeitbelastung, die für allfällige kanzerogene Wirkungen besonders relevant ist. Die Hochfrequenzstrahlung von Mobilfunkbasisstationen variiert räumlich sehr stark, und die Entwicklung der Mobilfunknetze war in den letzten Jahren dynamisch. Selbst mit guten Modellen ist es deshalb kaum möglich, die Exposition für ein grosses Kollektiv über einen längeren Zeitraum akkurat abzuschätzen, weil man dazu den Standort aller Studienteilnehmenden auf wenige Meter genau kennen muss. Studien in der Umgebung von Rundfunksendern sind aus diesem Grund konzeptionell einfacher. In diesen Studien ist das exponierte Gebiet grösser, und das Bewegungsverhalten der Teilnehmer fällt weniger ins Gewicht.

Sowohl für Rundfunksender als auch für Basisstationen gilt allerdings, dass das Ausmass der Fernfeldexposition durch fix installierte Sendeanlagen im Allgemeinen gering ist, und es eine zunehmende Anzahl anderer Hochfrequenzquellen im Alltag gibt, die zur Ganzkörperbelastung beitragen (vgl. Kapitel 3.2). Bei der Beurteilung der Gesamtevidenz sind daher auch Studien zur Benutzung von Mobil- und Schnurlostelefonen zu berücksichtigen, weil die dadurch entstehenden Expositionen vor allem am Kopf deutlich höher sein können.

Insgesamt erfüllt keine der neuen Studien zu Fernfeldexpositionen die grundlegenden Anforderungen an eine wissenschaftliche Untersuchung. Zum jetzigen Zeitpunkt liegt daher keine qualitativ genügende Studie zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen der Fernfeldexposition durch ortsfeste Sendeanlagen und dem Krebsrisiko von Erwachsenen vor. Eine abschliessende Beurteilung der Evidenz ist auf dieser Studienbasis weiterhin nicht möglich.

Bewertung:**Krebsrisiko bei Erwachsenen**

Tab. 12 > Studien zum Krebsrisiko bei Erwachsenen in der Umgebung von ortsfesten Sendeanlagen

Studie	Studientyp (Kollektiv)	Expositionsquelle (Signal, Frequenz)	Expositionskategorien	Krebsrisiko insgesamt, OR (95 %-CI)	Risiko für einzelne Krebserkrankungen, OR (95 %-CI)	Bemerkungen
Preece et al. 2007	Querschnitt (ca. 1870 Erwachsene und Kinder aus 3 Dörfern)	Militärantenne (17.6 MHz, 100 kW)	Mittelwerte der elektrischen Feldstärke insgesamt (und von Militärantenne) in Dorf 1: 0.57 V/m (0.11 V/m), in Dorf 2: 0.46 V/m (0.04 V/m), in Dorf 3: <0.01 V/m	Keine Unterschiede, Zahlen nicht angegeben		Unvollständige Erfassung der Fallzahlen
Eger et al. 2009	Clusterstudie (575 Personen ab 10 Jahren)	Eine Mobilfunkbasisstation im Ort, seit 1999 in Betrieb	Studienregion: 400 m um die Basisstation; Zeiträume: Januar 2000 bis Dezember 2004 versus Januar 2005 bis Juni 2007	Verhältnis der beobachteten vs. erwarteten Erkrankungen im zweiten Beobachtungszeitraum höher als im ersten: 2.63 (1.14–6.10)		Anzahl der Erkrankungen basiert auf einer Anwohnerbefragung; keine Angaben zur Exposition
Spinelli et al. 2010	Fall-Kontrollstudie (121 Patienten, 121 Kontrollpersonen ab 18 Jahren)	Mobilfunkbasisstationen in der Wohnumgebung	Wohnadresse <500 m von der nächsten Basisstation entfernt		Hirntumoren: 0.49 (0.26–0.92)	Distanzschätzung gemäss Teilnehmerangaben
Dode et al. 2011	Ökologische Studie (7191 Personen mit Krebserkrankungen, Alter: 0 bis 99 Jahre)	Mobilfunkbasisstationen in der Wohnumgebung	Umkreise mit zunehmendem Radius (m): <100 <200 <500 <1000	Verhältnis der Sterblichkeitsraten bei Anwohnern im jeweiligen Umkreis vs. Gesamtbevölkerung: 1.35 1.25 1.08 1.00		Keine individuelle Expositionsabschätzung, Basispopulation unbekannt, Altersstruktur nicht berücksichtigt
Atzmon et al. 2012	Fall-Kontrollstudie (47 Krebspatienten)	Rund- und Mobilfunksender (HF, MW) in der Wohnumgebung	Distanzbasiertes Schätzmass: 1/berechnete Distanz zur nächsten Sendeanlage (m) ² ; keine Kategorien angegeben	1.00 (0.99–1.02)	Darmkrebs (n=11): 1.03 (1.01–1.05) Brustkrebs (n=10): 0.84 (0.72–0.79)	Expositionsabschätzung basiert auf Distanz
Stewart et al. 2012	Clusterstudie (19 Krebspatienten, 27 bis 80 J.)	Mobilfunkbasisstation (GSM 1800, 25.2 dBW, in Betrieb seit 1997)	Vergleich der Mortalitätsraten: Bezirk vs. Gesamtregion	SMR für 2001 bis 2003: Frauen: 1.38 (1.08–1.74), Männer: 1.20 (0.92–1.55), keine statistisch signifikanten Unterschiede für die Zeiträume 1993–1995, 1999–2001 und 2002–2004	Darm-, Brust- und Prostatakrebs: keine Assoziation	

Detaillierte Erläuterungen zur Tabelle siehe S. 16; OR: Odds Ratio, SMR: Standardisiertes Mortalitätsratenverhältnis, übrige Abkürzungen siehe Glossar

3.7 Nichtkanzerogene Wirkungen

3.7.1 Fertilität und Auswirkungen auf die Nachkommen

Auswirkungen der Hochfrequenzbelastung auf die Fruchtbarkeit, die Fehl- oder Frühgeburtsraten sowie angeborene Missbildungen sind bisher hauptsächlich im Zusammenhang mit der Nahfeldexposition durch Mobiltelefone oder andere Geräte evaluiert worden. In einigen arbeitsmedizinischen Studien wurden Physiotherapeutinnen untersucht, die Kurzwellendiathermie-Geräte verwendet hatten, andere betrafen Männer mit beruflicher Hochfrequenzbelastung. Wie im Bericht UM 162 dargelegt, hatten diese älteren Studien keine einheitlichen Resultate erzielt. In den darauf folgenden Jahren waren dann auch Studien zu Veränderungen der Spermienqualität bei Mobiltelefonbenutzern publiziert worden. Bis zum Bericht UW 0722 hatten zwei solche Studien vorgelegen, die allerdings wegen gravierender methodischer Mängel als nicht aussagekräftig beurteilt worden waren. Zur Fernfeldbelastung durch Rund- oder Mobilfunkseideanlagen waren bis dahin noch keine Studien vorhanden.

Einführung

Auch nach 2007 wurde zu dieser Fragestellung lediglich ein Ergebnis aus der bereits in Kapitel 3.5.2 und 3.6.4 erwähnten zypriotischen Querschnittsstudie in drei Dörfern in der Umgebung einer Militärantenne veröffentlicht (Preece et al. 2007). In einem separaten Fragebogen wurden alle Frauen im Alter von 18 bis 50 Jahren nach Früh-, Fehl- oder Totgeburten sowie nach Kindern mit zu niedrigem Geburtsgewicht gefragt. Es bestanden keine Unterschiede zwischen den Dörfern, von denen zwei stärker exponiert waren als das dritte. [Die Teilnahmerate bei den Frauen ist nicht angegeben und die tatsächliche Exposition ist unklar.]

Resultate

Die Datenlage zu dieser Fragestellung ist weiterhin ungenügend und erlaubt keine Beurteilung eventueller Auswirkungen der Hochfrequenzbelastung durch Sendeanlagen auf die Fruchtbarkeit, Schwangerschaft oder angeborene Fehlbildungen bei den Nachkommen.

Bewertung

Tab. 13 > Studie zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf die Fertilität oder die Nachkommen

Studie	Studientyp, Kollektiv	Expositionsquelle (Signal, Frequenz)	Intensität	Resultat	Bemerkung
Preece et al. 2007	Querschnitt, Bewohnerinnen von 3 Dörfern auf Zypern	Kurzwellensender (Militärantenne)	100 kW, Mittelwerte der elektrischen Feldstärke insgesamt (und von Militärantenne) in Dorf 1: 0.57 V/m (0.11 V/m), in Dorf 2: 0.46 V/m (0.04 V/m), in Dorf 3: <0.01 V/m	Keine Unterschiede bezüglich Früh-, Fehl- oder Totgeburten und anderen Schwangerschaftskomplikationen	Anzahl der Teilnehmerinnen nicht angegeben

Detaillierte Erläuterungen zu der Tabelle siehe S. 16

> Anhang

Grössen, Einheiten und Umrechnungen für elektromagnetische Felder

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 $\mu_0=4 \cdot \pi / 10^7 \text{ Vs/Am}$ $\approx 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$	$\mu=\mu_0 \cdot \mu_r$ $\mu_r=1$ 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: $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
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}

> Literatur

- Abdel-Rassoul G., El-Fateh O.A., Salem M.A., Michael A., Farahat F., El-Batanouny M., Salem E. 2007: Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology*; 28 (2): 434–440.
- Abelin T., Altpeter E., Rösli M. 2005: Sleep Disturbances in the Vicinity of the Short-Wave Broadcast Transmitter Schwarzenburg. *Somnologie*; 9 (4): 203–209.
- 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., Rösli 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.
- Atzmon I., Linn S., Richter E., Portnov B.A. 2012: Cancer risks in the Druze Isifya Village: Reasons and RF/MW antennas. *Pathophysiology*; 19 (1): 21–28.
- Augner C., Florian M., Pauser G., Oberfeld G., Hacker G.W. 2009: GSM base stations: short-term effects on well-being. *Bioelectromagnetics*; 30 (1): 73–80.
- Augner C., Hacker G.W., Oberfeld G., Florian M., Hitzl W., Hutter J., Pauser G. 2010: Effects of exposure to GSM mobile phone base station signals on salivary cortisol, alpha-amylase, and immunoglobulin A. *Biomed Environ Sci*; 23 (3): 199–207.
- Baan R., Grosse Y., Lauby-Secretan B., El Ghissassi F., Bouvard V., Benbrahim-Tallaa L., Guha N., Islami F., Galichet L., Straif K., WHO International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. 2011: Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *The lancet oncology*; 12 (7): 624–626.
- BAFU 2007: Hug K., Rapp R., Schär P., Taschner N.: Hochfrequente Strahlung und Gesundheit. Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich. Umwelt-Wissen Nr. 0722. Bundesamt für Umwelt, Bern, 2007.
- BAFU 2012: Hug K., Rösli M.: Elektromagnetische Hypersensibilität. Bewertung von wissenschaftlichen Studien. Stand Ende 2011. Umwelt-Wissen Nr. 1218. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Baliatsas C., van Kamp I., Kelfkens G., Schipper M., Bolte J., Yzermans J., Lebre E. 2011: Non-specific physical symptoms in relation to actual and perceived proximity to mobile phone base stations and powerlines. *BMC Public Health*; 11, 421.
- Berg-Beckhoff G., Blettner M., Kowall B., Breckenkamp J., Schlehofer B., Schmiedel S., Bornkessel C., Reis U., Potthoff P., Schüz J. 2009: Mobile phone base stations and adverse health effects: phase 2 of a cross-sectional study with measured radio frequency electromagnetic fields. *Occup Environ Med*; 66 (2): 124–130.
- Blettner M., Schlehofer B., Breckenkamp J., Kowall B., Schmiedel S., Reis U., Potthoff P., Schüz J., Berg-Beckhoff G. 2009: Mobile phone base stations and adverse health effects: phase 1 of a population-based, cross-sectional study in Germany. *Occup Environ Med*; 66 (2): 118–123.
- Bortkiewicz A., Gadzicka E., Szyjowska A., Poltanski P., Mamrot P., Szymczak W., Zmyslony M. 2012: Subjective complaints of people living near mobile phone base stations in Poland. *Int J Occup Med Environ Health*; 25 (1): 31–40.
- Breckenkamp J., Blettner M., Kowall B., Schüz J., Schlehofer B., Schmiedel S., Bornkessel C., Reis U., Potthoff P., Berg-Beckhoff G. 2010: Ergebnisse einer Querschnittsstudie zum Zusammenhang von elektromagnetischen Feldern von Mobilfunksendeanlagen und unspezifischen gesundheitlichen Beschwerden. *Umweltmed Forsch Prax*; 15 (3): 159–166.
- Buchner K., Eger H. 2011: Veränderung klinisch bedeutsamer Neurotransmitter unter dem Einfluss modulierter hochfrequenter Felder – Eine Langzeiterhebung unter lebensnahen Bedingungen. *Umwelt – Medizin – Gesellschaft*; 24 (1): 44–57.
- Bürgi A., Frei P., Theis G., Mohler E., Braun-Fahrlander C., Fröhlich J., Neubauer G., Egger M., Rösli M. 2010: A model for radiofrequency electromagnetic field predictions at outdoor and indoor locations in the context of epidemiological research. *Bioelectromagnetics*; 31 (3): 226–236.
- BUWAL 2003: Rösli M., Rapp R.: Hochfrequente Strahlung und Gesundheit. Bewertung von wissenschaftlichen Studien im Niedrigdosisbereich. Umwelt-Materialien Nr. 162. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 2003.
- Clark M.L., Burch J.B., Yost M.G., Zhai Y., Bachand A.M., Fitzpatrick C.T., Ramaprasad J., Cragin L.A., Reif J.S. 2007: Biomonitoring of estrogen and melatonin metabolites among women residing near radio and television broadcasting transmitters. *J Occup Environ Med*; 49 (10): 1149–1156.
- Danker-Hopfe H., Dorn H., Bornkessel C., Sauter C. 2010: Do mobile phone base stations affect sleep of residents? Results from an experimental double-blind sham-controlled field study. *Am J Hum Biol*; 22 (5): 613–618.
- Divan H.A., Kheifets L., Obel C., Olsen J. 2008: Prenatal and postnatal exposure to cell phone use and behavioral problems in children. *Epidemiology*; 19 (4): 523–529.
- Dode A.C., Leao M.M., Tejo Fde A., Gomes A.C., Dode D.C., Dode M.C., Moreira C.W., Condessa V.A., Albinatti C., Caiaffa W.T. 2011: Mortality by neoplasia and cellular telephone base stations in the Belo

Horizonte municipality, Minas Gerais state, Brazil. *Sci Total Environ*; 409 (19): 3649–3665.

Eger H., Neppe F. 2009: Krebsinzidenz von Anwohnern im Umkreis einer Mobilfunksendeanlage in Westfalen; Interview-basierte Piloterhebung und Risikoschätzung. *Umwelt – Medizin – Gesellschaft*; 22 (1): 55–60.

Eger H., Jahn M. 2010: Spezifische Symptome und Mobilfunkstrahlung in Selbitz (Bayern) – Evidenz für eine Dosiswirkungsbeziehung. *Umwelt – Medizin – Gesellschaft*; 23 (2): 130–139.

Elliott P., Toledano M.B., Bennett J., Beale L., de Hoogh K., Best N., Briggs D.J. 2010: Mobile phone base stations and early childhood cancers: case-control study. *BMJ*; 340 c3077.

Eltiti S., Wallace D., Ridgewell A., Zougkou K., Russo R., Sepulveda F., Mirshekar-Syahkal D., Rasor P., Deeble R., Fox E. 2007: Does short-term exposure to mobile phone base station signals increase symptoms in individuals who report sensitivity to electromagnetic fields? A double-blind randomized provocation study. *Environ Health Perspect*; 115 (11): 1603–1608.

Eltiti S., Wallace D., Ridgewell A., Zougkou K., Russo R., Sepulveda F., Fox E. 2009: Short-term exposure to mobile phone base station signals does not affect cognitive functioning or physiological measures in individuals who report sensitivity to electromagnetic fields and controls. *Bioelectromagnetics*; 30 (7): 556–563.

Eskander E.F., Estefan S.F., Abd-Rabou A.A. 2012: How does long term exposure to base stations and mobile phones affect human hormone profiles? *Clin Biochem*; 45 (1–2): 157–161.

Frei P., Mohler E., Bürgi A., Fröhlich J., Neubauer G., Braun-Fahrlander C., Röösli M. 2009: A prediction model for personal radio frequency electromagnetic field exposure. *Sci Total Environ*; 408 (1): 102–108.

Frei P., Mohler E., Bürgi A., Fröhlich J., Neubauer G., Braun-Fahrlander C., Röösli M., Qualifex Team. 2010: Classification of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF) for epidemiological research: Evaluation of different exposure assessment methods. *Environ Int*; 36 (7): 714–720.

Frei P., Mohler E., Braun-Fahrlander C., Fröhlich J., Neubauer G., Röösli M. 2012: Cohort study on the effects of everyday life radio frequency electromagnetic field exposure on non-specific symptoms and tinnitus. *Environ Int*; 38 (1): 29–36.

Frentzel-Beyme R. 2002: Bevölkerungsbezogene Erfassung und Bewertung von subjektiven Beschwerden der Anwohner in der Umgebung des Senders Oberlaindern. *umwelt medizin gesellschaft* 15 (4): 316–326.

Furubayashi T., Ushiyama A., Terao Y., Mizuno Y., Shirasawa K., Pongpaibool P., Simba A.Y., Wake K., Nishikawa M., Miyawaki K., Yasuda A., Uchiyama M., Yamashita H.K., Masuda H., Hirota S.,

Takahashi M., Okano T., Inomata-Terada S., Sokejima S., Maruyama E., Watanabe S., Taki M., Ohkubo C., Ugawa Y. 2009: Effects of short-term W-CDMA mobile phone base station exposure on women with or without mobile phone related symptoms. *Bioelectromagnetics*; 30 (2): 100–113.

Gati A., Hadjem A., Wong M.F., Wiart J. 2009: Exposure induced by WCDMA mobiles phones in operating networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*; 8 (12): 5723–5727.

Guxens M., van Eijsden M., Vermeulen R., Loomans E., Vrijlkotte T.G., Komhouth H., van Strien R.T., Huss A. 2013: Maternal cell phone and cordless phone use during pregnancy and behaviour problems in 5-year-old children. *J Epidemiol Community Health*; 67 (5): 432–438.

Ha M., Im H., Lee M., Kim H.J., Kim B.C., Gimm Y.M., Pack J.K. 2007: Radio-Frequency Radiation Exposure from AM Radio Transmitters and Childhood Leukemia and Brain Cancer. *Am J Epidemiol*; 166 (3): 270–279.

Ha M., Im H., Kim B.C., Gimm Y.M., Pack J.K. 2008: Re: «radio-frequency radiation exposure from am radio transmitters and childhood leukemia and brain cancer» – Five authors reply. *Am J Epidemiol*; 167 (7): 884–885.

Heinrich S., Ossig A., Schlittmeier S., Hellbrück J. 2007: Elektromagnetische Felder einer UMTS-Mobilfunkbasisstation und mögliche Auswirkungen auf die Befindlichkeit – eine experimentelle Felduntersuchung. *Umweltmed Forsch Prax*; 12 (3): 171–180.

Heinrich S., Thomas S., Heumann C., von Kries R., Radon K. 2010: Association between exposure to radiofrequency electromagnetic fields assessed by dosimetry and acute symptoms in children and adolescents: a population based cross-sectional study. *Environ Health*; 9 (1): 75.

Heinrich S., Thomas S., Heumann C., von Kries R., Radon K. 2011: The impact of exposure to radio frequency electromagnetic fields on chronic well-being in young people – A cross-sectional study based on personal dosimetry. *Environ Int*; 37 (1): 26–30.

Hinrichs H., Heinze H.-J., Rotte M. 2005: Human sleep under the influence of a GSM 1800 electromagnetic far field. *Somnologie*; 9: 185–191.

Huss A., Röösli M. 2006: Consultations in primary care for symptoms attributed to electromagnetic fields--a survey among general practitioners. *BMC Public Health*; 6: 267.

Hutter H.P., Moshhammer 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.

ICNIRP. 1998: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health physics*; 74 (4): 494–522.

- Kühnlein A., Heumann C., Thomas S., Heinrich S., Radon K. 2009: Personal exposure to mobile communication networks and well-being in children-A statistical analysis based on a functional approach. *Bioelectromagnetics*; 30 (4): 261–269.
- Lauer O., Frei P., Gosselin M.C., Joseph W., Rösli M., Fröhlich J. 2013: Combining near- and far-field exposure for an organ-specific and whole-body RF-EMF proxy for epidemiological research: A reference case. *Bioelectromagnetics*; 34 (5): 366–374.
- Leitgeb N., Schröttner J., Cech R., Kerbl R. 2008: EMF-protection sleep study near mobile phone base stations. *Somnologie*; 12 (3): 234–243.
- Li C.Y., Liu C.C., Chang Y.H., Chou L.P., Ko M.C. 2012: A population-based case-control study of radiofrequency exposure in relation to childhood neoplasm. *Sci Total Environ*; 435–436 472–478.
- Merzenich H., Schmiedel S., Bennack S., Brüggemeyer H., Philipp J., Spix C., Blettner M., Schüz J. 2007: Leukämie bei Kindern in der Umgebung von Sendestationen des Rundfunks – Anforderungen an das Studiendesign. *Umweltmed Forsch Prax*; 12 (4): 213–223
- Merzenich H., Schmiedel S., Bennack S., Brüggemeyer H., Philipp J., Blettner M., Schüz J. 2008: Childhood leukemia in relation to radio frequency electromagnetic fields in the vicinity of TV and radio broadcast transmitters. *Am J Epidemiol*; 168 (10): 1169–1178.
- Mohler E., Frei P., Braun-Fahrlander C., Fröhlich J., Neubauer G., Rösli M. 2010: Effects of everyday radiofrequency electromagnetic-field exposure on sleep quality: a cross-sectional study. *Radiat Res*; 174 (3): 347–356.
- Mohler E., Frei P., Fröhlich J., Braun-Fahrlander C., Rösli M. 2012: Exposure to radiofrequency electromagnetic fields and sleep quality: a prospective cohort study. *PLoS One*; 7 (5): e37455.
- 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. *International archives of occupational and environmental health*; 77 (6): 387–394.
- Persson T., Tornevik C., Larsson L.E., Loven J. 2011: Output power distributions of terminals in a 3G mobile communication network. *Bioelectromagnetics*; 33 (4): 320–325.
- Preece A.W., Georgiou A.G., Dunn E.J., Farrow S.C. 2007: Health response of two communities to military antennae in Cyprus. *Occup Environ Med*; 64 (6): 402–408.
- Regel S.J., Negovetic S., Rösli M., Berdiñas V., Schuderer J., Huss A., Lott U., Kuster N., Achermann P. 2006: UMTS Base Station-Like Exposure, Well Being and Cognitive Performance. *Environ Health Perspect*; 114 (8): 1270–1275.
- Riddervold I.S., Pedersen G.F., Andersen N.T., Pedersen A.D., Andersen J.B., Zachariae R., Molhave L., Sigsgaard T., Kjaergaard S.K. 2008: Cognitive function and symptoms in adults and adolescents in relation to rf radiation from UMTS base stations. *Bioelectromagnetics*; 29 (4): 257–267.
- Rösli M., Moser M., Baldinini Y., Meier M., Braun-Fahrlander C. 2004: Symptoms of ill health ascribed to electromagnetic field exposure – A questionnaire survey. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*; 207 (2): 141–150.
- Rösli M., Huss A. 2008: Mobile phone base station exposure and symptoms. *Environ Health Perspect*; 116 (2): A62–63; author reply A64–65.
- Rösli M., Mohler E., Frei P. 2010: Sense and sensibility in the context of radiofrequency electromagnetic field exposure. *Comptes Rendus Physique*; 11 (9–10): 576–584.
- Schmiedel S., Brüggemeyer H., Philipp J., Wendler J., Merzenich H., Schüz J. 2009: An evaluation of exposure metrics in an epidemiologic study on radio and television broadcast transmitters and the risk of childhood leukemia. *Bioelectromagnetics*; 30 (2): 81–91.
- Schüz J., Philipp J., Merzenich H., Schmiedel S., Brüggemeyer H. 2008: Re: Radio-frequency radiation exposure from AM radio transmitters and childhood leukemia and brain cancer. *Am J Epidemiol*; 167 (7): 883–884.
- Spinelli V., Chinot O., Cabaniols C., Giorgi R., Alla P., Lehucher-Michel M.P. 2010: Occupational and environmental risk factors for brain cancer: a pilot case-control study in France. *Presse medicale*; 39 (2): e35–44.
- Stewart A., Rao J.N., Middleton J.D., Pearmain P., Evans T. 2012: Mobile telecommunications and health: report of an investigation into an alleged cancer cluster in Sandwell, West Midlands. *Perspect Public Health*; 132 (6): 299–304.
- Theml T. 2007: Subjektive Beschwerden der Anwohner in der Umgebung des Senders IBB Oberlandern: Ergebnisse der Nachstudie. *umwelt medizin gesellschaft* 20 (4): 309–327.
- Thomas S., Kühnlein A., Heinrich S., Praml G., Nowak D., von Kries R., Radon K. 2008a: Personal exposure to mobile phone frequencies and well-being in adults: a cross-sectional study based on dosimetry. *Bioelectromagnetics*; 29 (6): 463–470.
- Thomas S., Kühnlein A., Heinrich S., Praml G., von Kries R., Radon K. 2008b: Exposure to mobile telecommunication networks assessed using personal dosimetry and well-being in children and adolescents: the German MobilEe-study. *Environ Health*; 7: 54.
- Thomas S., Heinrich S., von Kries R., Radon K. 2010: Exposure to radio-frequency electromagnetic fields and behavioural problems in Bavarian children and adolescents. *Eur J Epidemiol*; 25 (2): 135–141.
- Wallace D., Eltiti S., Ridgewell A., Garner K., Russo R., Sepulveda F., Walker S., Quinlan T., Dudley S., Maung S., Deeble R., Fox E. 2010: Do TETRA (Airwave) base station signals have a short-term impact on

health and well-being? A randomized double-blind provocation study. *Environ Health Perspect*; 118 (6): 735–741.

Wallace D., Eltiti S., Ridgewell A., Garner K., Russo R., Sepulveda F., Walker S., Quinlan T., Dudley S., Maung S., Deeble R., Fox E. 2012: Cognitive and physiological responses in humans exposed to a TETRA base station signal in relation to perceived electromagnetic hypersensitivity. *Bioelectromagnetics*; 33 (1): 23–39.

Yildirim M.S., Yildirim A., Zamani A.G., Okudan N. 2010: Effect of mobile phone station on micronucleus frequency and chromosomal aberrations in human blood cells. *Genet Couns*; 21 (2): 243–251.

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. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), The Hague.

> Verzeichnisse

Abkürzungen/Glossar

AM

Amplitudenmodulation: Modulationsverfahren zur Aufprägung der Information auf die hochfrequente Trägerwelle

Assoziation

Ein in epidemiologischen Studien statistisch festgestellter Zusammenhang zwischen einer Exposition und dem Auftreten biologischer Wirkungen. Eine Assoziation gilt als statistisch signifikant, wenn 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 Bericht 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.

CI

Confidence Interval: siehe Vertrauensintervall

Confounder

siehe Störgrösse

CW

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

dBW

Dezibel Watt: Einheit des Leistungspegels L_P , der das Verhältnis einer Leistung P im Vergleich zur Bezugsleistung von 1 W (Watt) beschreibt.

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

Downlink

Senderichtung von der Basisstation zum mobilen Endgerät

DTX

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

EEG

Elektroenzephalogramm

Effektschätzer

siehe Risikoschätzer

EMF

Elektromagnetische Felder

Epidemiologie

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

ERP

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

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.

FM

Frequenzmodulation: Modulationsverfahren zur Aufprägung der Information auf die hochfrequente Trägerwelle

Frequenz

Anzahl der Schwingungen pro Sekunde

Gentoxizität

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

GSM

Global System for Mobile Communication. Das digitale Mobilfunknetz der zweiten Generation ist in der Schweiz seit 1993 in Betrieb. Frequenzbereiche: 900 und 1800 MHz

HF

Hochfrequenz (siehe unten)

hochfrequent

Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 300 GHz

IARC

International Agency for Research on Cancer; Teil der WHO

ICNIRP

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; wissenschaftliche Kommission

Informationsbias

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

in vivo

Bezeichnung für die Exposition von Zellen oder Gewebe in lebenden Tieren 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)

kontralateral

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

Mikrowellen

hochfrequente Strahlung mit einer Frequenz von 300 MHz bis 300 GHz

Modulation

Veränderung der Amplitude, der Frequenz, der Phase eines hochfrequenten Trägersignals oder Kombinationen davon, um die zu übertragende Information (Ton, Bild oder Daten) auf das hochfrequente Trägersignal zu prägen.

NATEL C

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

Neurotransmitter

Botenstoffe des Nervensystems zur Übermittlung und Verarbeitung von Reizen im Gehirn

niederfrequent

Frequenzbereich bis maximal 100 kHz

NISV

Schweizerische Verordnung über den Schutz von nichtionisierender Strahlung

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.

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.

Prävalenz

Häufigkeit einer Krankheit zu einem bestimmten Zeitpunkt

Publikationsbias

Es ist bekannt, dass Studien, in denen ein Expositionseffekt beobachtet wurde, mit grösserer Wahrscheinlichkeit publiziert werden als Studien, die keinen Effekt nachweisen.

REM

Rapid eye movements: schnelle Augenbewegungen

REMS

Rapid eye movement sleep: REM-Schlaf. Vigilanzzustand neben Non-REM-Schlaf und Wachsein. Wird manchmal auch als «Traumschlaf» bezeichnet. Diese Bezeichnung ist allerdings irreführend, weil Träume auch aus allen Stadien des Non-REM-Schlafes berichtet werden.

Risikoschätzer

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

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)

Selektionsbias

Ein Selektionsbias ist insbesondere in Fall-Kontrollstudien relevant. Er tritt auf, wenn bei der Auswahl von Patienten und Kontrollpersonen ein systematischer Unterschied in Bezug auf die Exposition bestand. 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

Störgrösse

engl: confounder. Ein Faktor, der sowohl mit der Exposition als auch mit der untersuchten Zielgrösse 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 die Störgrösse Rauchen in der statistischen Analyse berücksichtigt, besteht keine Assoziation mehr 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.

TETRA

Terrestrial Trunked Radio: Digitales Bündelfunksystem für geschlossene Benutzergruppen, z. B. Behörden

TMB

Trail Making Test B: neuropsychologischer Test zur Untersuchung der visuellen Aufmerksamkeit

UMTS

Universal Mobile Telecommunications System: Standardsystem der dritten Mobilfunkgeneration, das in der Schweiz seit 2002 existiert. Das UMTS-Netz arbeitet im Frequenzband von 2 GHz (1900 bis 2200 MHz).

Uplink

Senderichtung 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.

WHO

World Health Organisation: Weltgesundheitsorganisation

WLAN

Wireless Local Area Network: drahtloses lokales Funknetz

Tabellen**Tab. 1**

Vergleich der kumulativen Expositionsdosis (absorbierte Energie) während 24 Stunden durch Nah- und Fernfeldquellen bei durchschnittlicher Fernfeldbelastung, Handy- und Schnurlostelefonbenutzung.

18

Tab. 2

Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf das Hormonsystem.

24

Tab. 3

Studie zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf das Verhalten.

26

Tab. 4

Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf kognitive Funktionen.

29

Tab. 5

Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf Herz-/Kreislauffunktionen.

31

Tab. 6

Experimentelle Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf unspezifische Symptome

36

Tab. 7

Bevölkerungsstudien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf unspezifische Symptome. 43

Tab. 8

Studien zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf den Schlaf. 49

Tab. 9

Studie zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf in vivo exponierte Blutzellen. 51

Tab. 10

Studien zum Leukämierisiko bei Kindern in der Umgebung von ortsfesten Sendeanlagen. 56

Tab. 11

Studien zum Hirntumorrisiko bei Kindern in der Umgebung von ortsfesten Sendeanlagen. 57

Tab. 12

Studien zum Krebsrisiko bei Erwachsenen in der Umgebung von ortsfesten Sendeanlagen 62

Tab. 13

Studie zu Auswirkungen der Hochfrequenzstrahlung von ortsfesten Sendeanlagen auf die Fertilität oder die Nachkommen. 63