



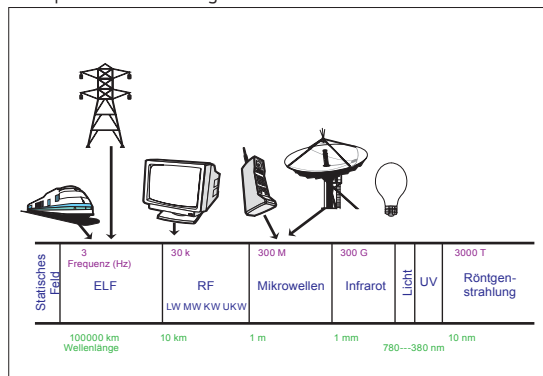
## Gesundheitliche Wirkungen von hochfrequenten EMF in der Wohnumwelt

Von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern spricht man dann, wenn ausgehend von der Feldquelle – den

bewegten Ladungen – das elektrische und magnetische Feld sich frei in den Raum ausbreiten kann. Da Frequenz und Wellenlänge über die Lichtgeschwindigkeit aneinander gekoppelt sind (Wellenlänge mal Frequenz = Lichtgeschwindigkeit) und der Wirkungsgrad der Antenne vom Verhältnis Antennenhöhe zu Wellenlänge abhängt, kann eine Ablösung des Feldes von der Antenne erst bei hohen Frequenzen (d.h. niedrigen Wellenlängen) erfolgen. Gewöhnlich zieht man die Grenze zur Niederfrequenz bei 30 oder 100 kHz. Je kürzer die Wellenlänge umso lichtähnlicher werden die Eigenschaften: ab 300 GHz spricht man von Infrarot- oder Wärmestrahlung. Daran schließt sich das schmale Band des sichtbaren Lichts mit Wellenlängen zwischen 780 und 380 nm an und bei noch kürzeren Wellenlängen die Ultraviolettstrahlung, die die Grenze zur ionisierenden Strahlung markiert.

Abbildung 1:

Das Spektrum elektromagnetischer Felder



Das hochfrequente Spektrum teilt man in radiofrequente und Mikrowellen, wobei letztere zwischen 300 MHz und 300 GHz liegen. Die für Funkanwendungen bedeutsamsten Bereiche sind heute das UKW (um 100 MHz), die vom Fernsehen genutzten UHF und VHF Bänder im Bereich zwischen 300 MHz und 800 MHz sowie die Mobilfunkfrequenzen (um 900 MHz, 1800 MHz und 2 GHz) und die verschiedenen Radaranwendungen und Satellitenfunk im Gigahertzbereich. Die lokalen Funknetzwerke (z.B. WLAN und Bluetooth) nehmen ebenfalls an Bedeutung zu und könnten in nicht allzu ferner Zukunft eine Konkurrenz für die Mobiltelefonie werden. Das gesamte Spektrum ist von

verschiedensten Anwendungen praktisch ausgeschöpft, sodass kaum mehr freie Frequenzen vorhanden sind.

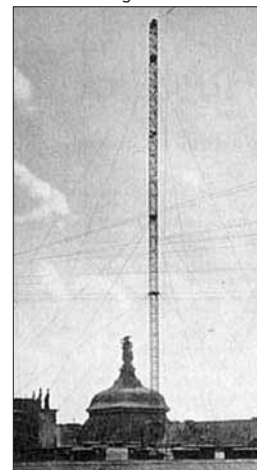
Obwohl hochfrequente elektromagnetische Felder auf der Erde auch natürlich vorkommen, überwiegen bei weitem die künstlichen Felder. Es gibt kaum einen Ort, an dem nicht künstliche hochfrequente Felder gemessen werden können. Die Intensität der Felder an einem gegebenen Ort wird bei Frequenzen über 10 MHz gewöhnlich als Leistungsflussdichte in W/m<sup>2</sup> angegeben, bei Frequenzen unter 10 MHz muss das elektrische und magnetische Feld getrennt gemessen werden, weil im Allgemeinen zwischen beiden noch keine feste Kopplung besteht. Dabei wird die elektrische Komponente als elektrische Feldstärke in V/m und die magnetische meist als magnetische Flussdichte in  $\mu\text{T}$  (Tesla) angegeben.

Bedenkt man, dass es kaum 100 Jahre her ist, seit es technische Anwendungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder (HF-EMF) gibt, dann ist es schon erstaunlich, wie sehr solche Anwendungen heute unseren Alltag beherrschen. Von Radio und Fernsehen bis Mikrowellengerät, vom Handy bis zum Wetterradar und von der Mikrowellendiathermie in der Medizin bis zu Plastikschweißgeräten sind die Anwendungen von HF-EMF in allen Bereichen anzutreffen. Die Entwicklungen gehen weiter, und in den hypermodernen Haushalten sind die Geräte bereits mit Funkeinrichtungen ausgestattet, sodass z.B. der Kühlschrank eine Nachricht an ein Handy übermitteln kann, dass das Bier ausgegangen ist. Aber auch wichtigere Dinge, z.B. die Überwachung der Herzfunktion bei bestimmten Patienten per Fernabfrage oder die Kommunikation zwischen Fahrzeugen im Straßenverkehr zur Abwendung von Unfällen, könnten mithilfe von Funkanwendungen bewerkstelligt werden.

Der technischen Phantasie sind keine Grenzen gesetzt. Wie verhält es sich aber mit dem gesundheitlichen Aspekt? Können solche Anwendungen uns langfristig gesundheitliche Probleme bescheren? In den folgenden Abschnitten werden wir versuchen, Ansätze zur Beantwortung dieser Fragen zu geben. Und es soll auch erläutert werden, warum auch heute noch, 100

Abbildung 2:

Erster Rundfunksender in Österreich 1923 auf dem Dach des ehem. Kriegsministeriums am Stubenring



Jahre nach den ersten Anwendungen der Funktechnik, keine endgültige Antwort gegeben werden kann.

### Die Wirkung hochfrequenter EMF

Durch die wachsende Verbreitung des Einsatzes von Funk- und Radartechniken im und nach dem 2. Weltkrieg wurden schon in den 1940er und 1950er Jahren Befürchtungen geäußert, es könnten damit nachteilige Auswirkungen auf die Gesundheit verbunden sein. Es wurde z.B. von Militärärzten und Arbeitsmedizinern über gehäufte gesundheitliche Beschwerden von Soldaten und Arbeitern, die an Radaranlagen beschäftigt waren, berichtet. Die Vermutung, es handle sich dabei um Auswirkungen der HF-EMF, wurde aber von der Mehrzahl der Fachleute als unwahrscheinlich angesehen. Dennoch wurden in den Unternehmen aber auch beim Militär Zonen in der Nähe von Radaranlagen definiert, die man möglichst nicht betreten sollte. Frequenzen von einigen 100 MHz, wie sie für das Fernsehen eingesetzt wurden, hielt man überhaupt für unschädlich. Deshalb stieß auch eine experimentelle Untersuchung von Boysen [1] im Jahr 1953 an Kaninchen, die mit einem 350 MHz EMF bestrahlt worden waren, auf einhelligen Unglauben. Denn in dieser Untersuchung wurde ermittelt, dass die Bestrahlung zu Gewebszerstörung in nahezu allen Organen und schließlich zum Tod durch Überwärmung führt. Aus heutiger Sicht erscheint die damalige Diskussion merkwürdig, weil der Mikrowellenherd ja bereits erfunden und im Einsatz war, wobei man die Fähigkeit von Mikrowellen (die ja HF-EMF im Frequenzbereich 300 MHz bis 300 GHz darstellen) zur Erwärmung kommerziell ausnutzte. Allerdings setzte man für den Mikrowellenherd weit höhere Frequenzen als 350 MHz, nämlich 2,45 GHz, ein, dennoch ist das Prinzip der Wirkung dasselbe: nämlich die Absorption eines Teils der Feldenergie durch im Feld befindliche Dielektrika (=Objekte, durch die das Feld hindurch gehen kann, im Gegensatz zu Leitern, die im Inneren feldfrei sind). Erst als in den USA 1957 ein Todesfall aufgrund einer Mikrowellenexposition unbekannter Intensität eine starkes Medienecho

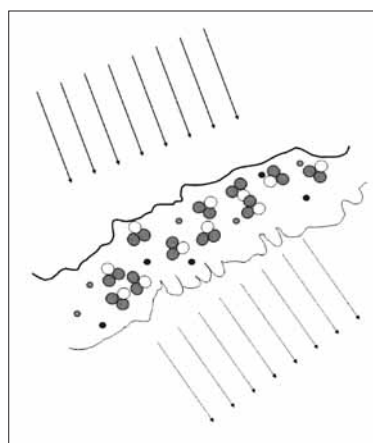
auslöste, begann – zumindest in westlichen Ländern – eine intensivere Beschäftigung mit der Wirkung hochfrequenter Felder. In den ehemaligen Ostblockländern wurden zur selben Zeit umfangreiche biologische Untersuchungen unter einer ganz anderen Prämisse durchgeführt: Man ging davon aus, dass HF-EMF nicht nur Energie, sondern auch Information transportieren und daher möglicherweise mit biologischen Prozessen interagieren können. Deshalb wurden in diesen Ländern hauptsächlich Untersuchungen zu verschiedenen Arten von Modulationen (das sind zeitliche Schwankungen in der Amplitude, der Frequenz oder der Phase des Feldes) durchgeführt. Da diese Untersuchungen geheim waren, sind sie nur teilweise im Detail bekannt geworden und auch im Westen veröffentlicht. Auch in den USA und anderen westlichen Ländern wurden manche Untersuchungen nicht oder erst verspätet zugänglich gemacht, die Forschung war aber im Allgemeinen weit offener und transparenter. Die Hauptrichtung der Forschung in den westlichen Ländern war an den Mechanismen der Absorption elektromagnetischer Energie durch Organismen orientiert. Man stellte fest, dass ab etwa 10 MHz die Frequenz zu hoch ist, um durch die im Organismus induzierten Ströme Nerven oder Muskeln zu reizen. Ab etwa dieser Frequenz überwiegt die Energieaufnahme durch geladene Teilchen und polare Moleküle (das sind Moleküle, in denen die Elektronen nicht gleichmäßig auf die Atome aufgeteilt sind, sondern mehr oder weniger stark zu einem der Bindungspartner verschoben sind; das häufigste solche Molekül im Organismus ist das Wassermolekül) indem ihre Bewegungs- oder Rotationsenergie erhöht wird. Da Wärme nichts anderes ist als Bewegung von Atomen und Molekülen, äußert sich die Energieaufnahme durch eine Erwärmung des Gewebes.

Befindet man sich etliche Wellenlängen entfernt von einer Antenne im so genannten Fernfeld, dann hängt das Ausmaß der Energieabsorption vom Verhältnis der Ausdehnung des Organismus in Richtung des elektrischen Feldvektors zur Wellenlänge ab. Die stärkste Aufnahme elektromagnetischer Energie tritt ungefähr bei einer Wellenlänge auf, die der doppelten Ausdehnung des Körpers in Richtung des elektrischen Feldvektors entspricht. Der Körper wirkt dabei wie eine Antenne. Aufgrund dieser Gesetzmäßigkeit liegt das Maximum der Absorption bei Kindern bei höheren Frequenzen (und damit kürzeren Wellenlängen) als bei Erwachsenen. Ist die Wellenlänge im Vergleich zur Ausdehnung des Körpers klein, dann kommt es zu einer Absorption, die weitgehend auf die Oberfläche beschränkt bleibt.

Die Eindringtiefe des Feldes hängt ebenfalls von der Frequenz ab. Ein wesentlicher Faktor ist aber auch der Aufbau der Gewebe. Ist ein Gewebe von Flüssigkeit umhüllt, dann wird diese einen großen Teil der Absorption bewirken, während ein von Fett eingehülltes Gewebe einen höheren Anteil selbst absorbiert. Die Ursache für diese Unterschiede liegt

**Abbildung 3:**

Das hochfrequente EMF trifft im Gewebe auf polare Moleküle und geladene Teilchen, dadurch kommt es zu einem dielektrischen und Leitungsverlust, der das Feld abschwächt. Die Feldenergie geht in Bewegungsenergie dieser Teilchen über, was sich in einer Erwärmung des Gewebes äußert.



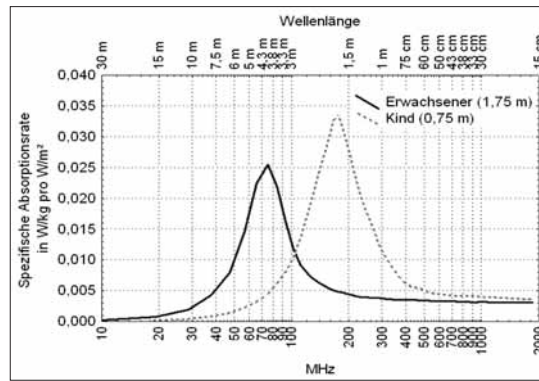
in den dielektrischen Eigenschaften unterschiedlicher Gewebe. Die Leitfähigkeit für ein HF-EMF von 1 GHz ist z.B. für die Flüssigkeit, die das Gehirn und Rückenmark umhüllt, ca. 2,5 S/m, während sie für Fettgewebe nur 0,05 S/m beträgt (d.h. nur ein 50stel). Die Eindringtiefe (definiert als jene Tiefe, bei der die Feldstärke auf etwa 37% des Wertes an der Oberfläche abgesunken ist) beträgt für die erwähnte Flüssigkeit ca. 2 cm, für Fettgewebe aber mehr als 20 cm. Daher ist die Verteilung des Feldes im Inneren des Organismus vom Aufbau der Gewebe abhängig.

Das Ausmaß, mit dem elektro magnetische Energie vom Organismus absorbiert wird, bezeichnet man als Spezifische Absorption (SA) und drückt sie in J/kg Gewebe aus. Die pro Zeiteinheit absorbierte Energie wird als Spezifische (Energie)absorptionsrate (SAR) bezeichnet und in W/kg Gewebe angegeben. Die SAR ist proportional dem Quadrat der elektrischen Feldstärke im Gewebe und damit ein Maß für die Stärke des Feldes im Organismus.

Es besteht kein Zweifel, dass bei einer Exposition mit starken hochfrequenten Feldern aufgrund der Erwärmung des Gewebes und des gesamten Organismus die Gesundheit gefährdet ist. Im Vordergrund steht zunächst die durch die Erwärmung ausgelöste Kreislaufbelastung, bei stark inhomogener Absorption kann es lokal zu starker Übererwärmung und dadurch zur Gewebsschädigung kommen. Bei diesen Wirkungen ist ausschließlich die Energie, die durch das Feld in den Organismus ‚transportiert‘ wird, maßgeblich. Die Mehrheit der Expositionsricht- und -grenzwerte zielt ausschließlich auf die Verhütung dieser durch Energieabsorption ausgelösten Erwärmungen ab. Es besteht aber auch breite Zustimmung, dass nicht alle beobachteten Effekte auf die Erwärmung allein zurückgeführt werden können. Allerdings gibt es keinen Konsens darüber, ob diese so genannten nicht-thermischen Effekte gesundheitlich bedeutsam sind.

Bei nicht-thermischen Wirkungen sind zwei Gesichtspunkte zu unterscheiden: Erstens könnte es Effekte geben, die zwar direkt mit der Energie des Feldes zusammenhängen, aber nicht auf einer Gewebeerwärmung beruhen und zweitens könnte es Effekte geben, die weitgehend unabhängig von der Energie sind.

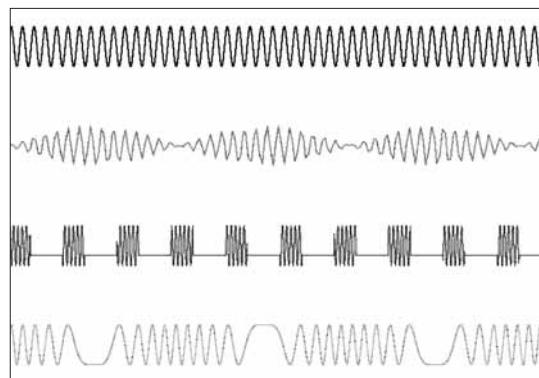
Effekte der ersten Art könnten etwa damit zusammenhängen, dass auch ohne nennenswerte Gewebeerwärmung bestimmte Moleküle an der Oberfläche von Zellen beginnen, falsche Signale auszusenden. Effekte der zweiten Art können nur auf der vom Feld transportierten Information beruhen. Felder, wie sie zum Funken verwendet werden, transportieren nicht nur Energie, sondern auch Information. Die Information steckt in der Modulation des Hochfrequenzfeldes. Im einfachsten Fall schalten wir das Feld in einem bestimmten Rhythmus ein und wieder



**Abbildung 4:** SAR als Funktion der Frequenz (Wellenlänge) für einen Erwachsenen und ein Kind

aus (z.B. beim Morsen), die Information steckt dann in der Abfolge von unterschiedlich langen Pulsen. Es kann aber auch die Amplitude synchron mit einem zu übertragenden Signal schwanken (Amplitudenmodulation), was etwa im Kurzwellenfunk geschieht, wobei das Signal akustischer Art ist. Aber auch z.B. die Information über die Helligkeit eines Fernsehbildpunktes wird über die Amplitude des Fernsehsignals bestimmt. Eine andere Technik bedient sich der Frequenzmodulation. Dabei wird die Information in den Schwankungen der Trägerfrequenz verpackt. Das geschieht z.B. im UKW Radiosignal. Andere Arten der Modulation dienen nicht direkt der Informationsübertragung, sondern kommen aus anderen Gründen zustande. So wird z.B. bei der GSM Technik des Mobilfunks ein Zeitschlitzverfahren angewandt, das jedem mit einer Basisstation verbundenen sendenden Handy 217 Mal pro Sekunde einen Zeitschlitz von 577 µs Dauer zur Verfügung stellt. Die Information selber wird in den kurzen Impulsen digital durch ein Verfahren ähnlich der Frequenzmodulation übertragen. Durch die Pulsung entsteht aber eine niederfrequente Pulsmodulation, die nichts mit der Information selber, sondern mit dem Verfahren der Aufteilung des Funkkanals auf mehrere Benutzer zu tun hat.

Reale technische Hochfrequenzfelder sind fast nie zeitlich konstant, sondern weisen entweder aufgrund der Technik der Informationsübertragung oder aus anderen Gründen Schwankungen niedriger Frequenz auf. In diesen niederfrequenten Anteilen könnte biologische



**Abbildung 5:** Oben: kontinuierliche Welle; darunter: Amplitudenmodulation; Pulsmodulation; Frequenzmodulation

Bedeutung stecken. Biologische Strukturen sind nicht in der Lage, die hohen Frequenzen der Trägerwellen eines Funksignals als einzelne Wellen zu detektieren. Niedrige Frequenzen könnten aber sehr wohl erkannt werden und Zellen könnten darauf spezifisch reagieren. Tatsächlich wurde eine der ersten Hinweise auf nicht-thermische Effekte aus Beobachtungen gewonnen, die ursprünglich einen ganz anderen Zweck hatten. Verschiedene Untersuchungen in den 1960er Jahren hatten nämlich ergeben, dass Menschen und Versuchstiere, die mit niederfrequenten elektrischen Feldern in der Größenordnung von einigen 10 kV/m exponiert wurden, bestimmte Veränderungen der Hirnströme aufwiesen. Da man die elektrischen Felder nicht beliebig stark erhöhen kann, weil es sonst zwischen den Elektroden und dem Körper der Person zu einem Spannungsüberschlag kommt, verwendete man hochfrequente Felder, die mit der niedrigen Frequenz moduliert waren, um das niederfrequente Feld in den Organismus hinein zu transportieren. Dabei zeigten sich nahezu gleiche Effekte, ob nun das elektrische Feld oder ein hochfrequentes Feld in der Amplitude variierte. Diese Anfang der 1970er Jahre durchgeführten Experimente weisen darauf hin, dass möglicherweise niederfrequente Komponenten eines hochfrequenten Feldes biologische Bedeutung haben.

Der allgemeinen Anerkennung, dass niederfrequent modulierte Signale biologische Bedeutung haben, steht allerdings ein erhebliches Hindernis im Wege. Damit die im Organismus induzierten Ströme niederfrequent werden, muss das Hochfrequenzfeld demoduliert werden. Bis heute ist dazu kein Mechanismus vorgeschlagen worden, der breite Zustimmung gefunden hätte.

Obwohl manche der nicht-thermischen Effekte in mehreren unabhängigen Untersuchungen beobachtet wurden, werden sie von manchen Wissenschaftlern nicht anerkannt und für Artefakte unbekanntes Ursprungs gehalten. Diese Position ist zwar bedenklich, weil im Allgemeinen der Nachweis des Wirkungsmechanismus für die medizinische Beurteilung nicht erforderlich, sondern nur unterstützend ist, hat aber angesichts der enormen wirtschaftlichen, politischen und militärischen Bedeutung des Einsatzes hochfrequenter Felder dennoch nicht wenige Anhänger.

## Gesundheitliche Auswirkungen

Die Kontroversen um die Frage der gesundheitlichen Auswirkungen von hochfrequenten EMF wären längst beigelegt, wenn die vorliegenden Daten höhere Qualität hätten, wenn deren Erfassung planmäßig und systematisch erfolgt wäre. Leider beherrscht von allem Anfang an dieses Feld der Wissenschaft eine starke Einflussnahme aus Bereichen, die ein vitales Interesse daran haben, dass es keine bedeutsamen Beschränkungen für den Einsatz dieser Felder gibt. Andererseits ist es nicht sehr

wahrscheinlich, dass hochfrequente Felder im Bereich niedriger Intensitäten sehr starke Auswirkungen auf die Gesundheit haben, denn sonst könnten die Kontroversen nicht so lange aufrecht bleiben – Interessen hin oder her.

Wir müssen also davon ausgehen, dass die Effekte subtil sind. Das heißt: es muss sich um Effekte handeln, die entweder nur unter bestimmten Begleitumständen und/oder nur bei bestimmten Personengruppen auftreten. Da wir darüber hinaus nicht wissen, ob hochfrequente Felder alle einen einheitlichen Wirkungsmechanismus besitzen, müssten wir streng genommen jede Expositionsart einzeln behandeln. Das ist ein nahezu aussichtsloses Unterfangen.

Wenn wir die Auswirkungen bestimmter Umweltbedingungen untersuchen, dann nutzen wir vier Arten von Daten: Epidemiologische Untersuchungen (das sind Beobachtungsstudien an Bevölkerungsgruppen), Provokationsexperimente (das sind Untersuchungen, in denen wir meist über kurze Zeit Personen der Bedingung aussetzen und die Reaktionen darauf messen), Langzeitexperimente an Versuchstieren und ‚Reagenzglas‘-Experimente (das sind Untersuchungen an Molekülen, Zellen oder Geweben außerhalb des Organismus). Für die Beurteilung eines möglichen Risikos spielen zwar alle diese Arten von Untersuchungen eine Rolle, die Frage nach der gesundheitlichen Bedeutung können aber nur epidemiologische Untersuchungen beantworten.

Insgesamt sind etwa zur Frage eines Zusammenhangs zwischen hochfrequenten Feldern und Krebs in 26 Jahren 20 epidemiologische Untersuchungen erschienen, während allein zu Mobilfunk bereits innerhalb von 6 Jahren mehr als 20 solche Studien veröffentlicht worden sind. Das erklärt sich einerseits aus dem gestiegenen öffentlichen Interesse an diesen Fragen, andererseits durch die Tatsache, dass erst durch die Einführung des modernen Mobilfunks ein erheblicher Anteil der Bevölkerung hohen Feldstärken ausgesetzt ist, während es früher nur eng umschriebenen Regionen oder bestimmte Berufe waren, in denen hochfrequente Felder höherer Intensität auftraten. Zu anderen möglichen Auswirkungen wie etwa auf die Schwangerschaft oder andere chronische Krankheiten als Krebs gibt es noch weit weniger Untersuchungen. Entgegen der Behauptung, die man manchmal von Vertretern der Industrie hört, dass es tausende Untersuchungen gäbe, die die Unschädlichkeit hochfrequenter Felder bewiesen, ist es tatsächlich so, dass es nur sehr wenige epidemiologische Untersuchungen gibt und keine, die man als Hinweis anführen könnte, dass hochfrequente Felder unschädlich sind. Unter den 20 erwähnten Untersuchungen gibt es aber auch keine, die einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Exposition und Krebs erbrachte, und nur eine lässt sich anführen, die einen deutlichen Hinweis gibt. In dieser norwegischen Untersuchung, die Tore Tynes [2] im Jahr 1996 veröffentlicht hat, wurden mehr als 2500

Frauen, die zwischen 1920 und 1980 als Schiffsfunkrinnen gearbeitet hatten, insbesondere auf das Auftreten von Brustkrebs untersucht. Es fand sich ein erhöhtes Brustkrebsrisiko besonders bei den über 50-jährigen Frauen. Da die Frauen oft auch Nacharbeit geleistet hatten und diese ebenfalls als möglicher Risikofaktor gilt, konnte wegen des oft gleichzeitigen Auftretens von Nacharbeit und Exposition gegenüber hochfrequenten Feldern nicht geklärt werden, welcher der Faktoren oder auch ob die Kombination beider für das erhöhte Risiko verantwortlich ist. Von den übrigen Untersuchungen enthalten weitere 12 einige Hinweise auf einen Zusammenhang, die restlichen können nicht beurteilt werden.

Bei der Diskussion um mögliche gesundheitliche Auswirkungen des Mobilfunks wird oft angeführt, dass wir seit 50 Jahren Fernsehfunksignalen ausgesetzt sind, die nur etwas niedrigere Trägerfrequenzen als der Mobilfunk aufweisen. Wären die gesundheitsschädlich, dann hätte man das in diesen Jahren schon entdecken müssen. Tatsache ist, dass zu Radio- und Fernsehantennenanlagen und deren Auswirkungen auf die Gesundheit in diesen Jahrzehnten gerade einmal 8 epidemiologische Untersuchungen erschienen sind. Keine dieser Untersuchungen ist zwar geeignet nachzuweisen, dass bei höheren Belastungen mit diesen Funkfrequenzen Gesundheitsrisiken auftreten, dennoch enthält jede dieser Studien schwache Hinweise auf ein erhöhtes Risiko. So wurden z.B. von Helen Dolk und Mitarbeitern alle Sendetürme in Großbritannien mit hoher Leistung untersucht [3,4]. Die Autoren gingen der Krebshäufigkeit in der Nähe dieser Sendeantennen nach und fanden Hinweise dafür, dass in der näheren Umgebung, dort wo in Bodennähe die stärksten Felder auftreten, das Risiko erhöht ist. Da aus solchen so genannten ökologischen Studien keine weitreichenden Schlussfolgerungen gezogen werden können, dienen diese Befunde zunächst nur als Anhaltspunkte für einen möglichen Zusammenhang, die in anderen Untersuchungen näher geprüft werden müssen. Es ist aber nicht möglich, diese Untersuchungen als Zeugen für die Ungefährlichkeit der hochfrequenten Felder anzurufen.

Da sich aus den epidemiologischen Untersuchungen zwar Hinweise für gesundheitliche bedeutende Effekte der langfristigen Exposition gegenüber hochfrequenten EMF ergaben, sich aber aufgrund der Komplexität des Problems und methodischer Schwierigkeiten daraus keine eindeutigen Schlussfolgerungen ziehen lassen, kommt den anderen Datenquellen eine umso größere Bedeutung zu.

Es ist bezeichnend, dass trotz einer jahrzehntelangen Kontroverse um die Frage, ob schwache hochfrequente Felder in der Lage sind, das Risiko für Krebs zu erhöhen (bereits 1953 wurde diese Vermutung aufgrund von Beobachtungen bei Radartechnikern geäußert), erst zu Beginn der 1980er Jahre der erste Langzeittierversuch begonnen wurde. Dazu muss man wissen, dass solche

Versuche ein Standard in der Toxikologie sind, wenn vermutet wird, dass eine Einwirkung krebserregend ist. Diese im Auftrag der US Air Force durchgeführte und 1982 abgeschlossene Untersuchung wurde erst 10 Jahre später der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zugänglich gemacht [5]. Das Ergebnis war nämlich keineswegs erfreulich: die knapp unterhalb des Grenzwerts für die Exposition am Arbeitsplatz bestrahlten Tiere zeigten nämlich fast viermal so viele bösartige Neubildungen (18%) wie die nicht bestrahlten Kontrolltiere (5%). Als Argument, warum man dem keine große Bedeutung zumessen darf, wurde angeführt, dass die gutartigen Tumore nicht erhöht waren. Dieses Argument ist jedoch keineswegs zulässig. Erstens werden bei solchen Untersuchungen die gutartigen Geschwülste nur dann herangezogen, wenn sie selbst oder die Summe der gut- und bösartigen Tumore erhöht sind, und zweitens wäre eine Reduktion der Zahl gutartiger bei gleichzeitigem Anstieg der Zahl bösartiger Tumore immerhin ein Hinweis auf einen die Tumorentwicklung beschleunigenden Effekt, aber drittens stimmte das Argument grundsätzlich nicht, weil die Zahl gutartiger Neubildungen ebenfalls erhöht war, nur nicht so stark wie die der bösartigen.

Abgesehen von Tierversuchen mit Mobilfunkfrequenzen gibt es nur wenige andere Experimente, die überwiegend in nur zwei Labors durchgeführt wurden. Dabei ergaben die Untersuchungen des einen Labors regelmäßig bedeutsame Effekte auf das Tumorzellwachstum, während die des anderen keine oder nur schwache Effekte erbrachten. Aufgrund der Tatsache, dass sich die vorliegenden Untersuchungen in nahezu allen Aspekten der Exposition (Frequenz, Modulation, Polarisation, Dauer, Intensität usw.) unterscheiden, lässt sich darauf keine allgemeine Aussage gründen. Aber auch die vorliegenden Tierversuche lassen nicht den Schluss zu, dass hochfrequente EMF keine langfristigen gesundheitlichen Auswirkungen haben.

Wenn wir also weder auf Basis der epidemiologischen Untersuchungen noch auf Basis von Tierversuchen eine belastbare Beurteilung des Gesundheitsrisikos vornehmen können, wie sieht es dann mit Untersuchungen zu den möglichen Mechanismen aus, durch die Schädigungen auf den Organismus entstehen könnten. Bei der Frage der Krebsentstehung stehen uns eine Reihe von Testverfahren zur Verfügung, mit denen wir bestimmte grundlegende Fragen behandeln können, ohne Menschen oder Tiere selbst der Belastung aussetzen zu müssen. Dabei gehen wir von der heute allgemein vertretenen Annahme aus, dass das Auftreten von Krebs in einem Organismus voraussetzt, dass in einer Zelle, von der dann der Krebs ausgeht, Veränderungen im Erbmateriale, den Genen, stattgefunden haben müssen. Deshalb schließen wir, dass eine Exposition von Zellen, die zu Veränderungen des Erbmateriale führt, auch in der Lage sein könnte, Krebs hervorzurufen. Finden wir also bei bestrahlten Zellen Mutationen, dann ist das zwar

kein Beweis für ein krebsauslösendes Potenzial, aber ein weiteres wichtiges Glied in der Argumentationskette bei der Risikobeurteilung. Fassen wir die verschiedenen Effekte auf das Erbgut zusammen, dann sprechen wir von genotoxischen Effekten, wenn eine Einwirkung die normale Funktion von Genen nachteilig verändert. Solche Effekte können darin bestehen, dass ein oder mehrere Gene übermäßig, zu schwach oder gar nicht in Funktion treten, dass die Funktion verändert ist oder dass das Produkt des Gens fehlerhaft ist. Solche genotoxischen Effekte können an Zellen mit verschiedenen Verfahren untersucht werden. Bis heute gibt es etwa 60 solche Untersuchungen mit hochfrequenten EMF, wobei ebenfalls sehr unterschiedliche Expositionsbedingungen getestet wurden. Von diesen Untersuchungen weist etwa ein Viertel auf eine Schädigung des Erbguts hin, etwa die Hälfte ergab keine Effekte und der Rest ist aufgrund methodischer Unzulänglichkeiten nicht beurteilbar. Generell leiden die Untersuchungen an Sorgfalt bei der Wahl der Zellen und der Expositionsbedingungen. Die korrekte Vorgangsweise im Fall eines unbekanntem Wirkmechanismus wäre zunächst, verschiedene realistische Expositionsszenarios durchzuspielen, um die am ehesten zu einer Schädigung führenden Bedingungen zu finden. Dabei würde man Zellen einsetzen, von denen man annehmen kann, dass sie empfindlich reagieren. Im nächsten Schritt müsste man dann verschiedene Zelltypen exponieren, um zu ermitteln, welche mehr und welche weniger oder nicht empfindlich sind. So ging man jedoch bei der Untersuchung hochfrequenter EMF leider nicht vor. Die überwiegende Mehrheit aller bisher veröffentlichten Untersuchungen waren mit peripheren Blutlymphozyten durchgeführt worden. Für die Verwendung dieser Zellen spricht nur, dass sie leicht gewonnen und untersucht werden können. Alles andere, insbesondere Überlegungen zur Empfindlichkeit, spricht dagegen.

Da wissenschaftliche Untersuchungen in diesem Forschungsfeld überwiegend im Auftrag der Industrie oder des Militärs durchgeführt wurden und werden, bestimmen deren Interessen die Forschungsfragen und teilweise auch die eingesetzten Methoden. Die Fachliteratur ist deshalb überflutet mit irrelevanten, methodisch fragwürdigen und biologisch unnützen Untersuchungen, die mehr zur Verwirrung als zur Klärung der offenen Fragen beitragen. Ein Beispiel für diese Verwirrung ist die Frage, ob durch die Exposition mit hochfrequenten Feldern die Blut-Hirnschranke durchlässig wird. Diese Frage wurde erstmals von Allan Frey 1975 behandelt [6]. Er fand nach Mikrowellenbestrahlung von Ratten, dass die Blut-Hirnschranke in verschiedenen Bereichen des Gehirns durch die Exposition geöffnet werden kann. Diese Untersuchungen wurden durch weitere Experimente in zwei anderen Labors gestützt. Dann wurde durch die Behauptung anderer Forscher, die im Auftrag der US Air Force die Experimente wiederholt hatten, sie hätten die Effekte nicht reproduzieren können, dieser vielversprechende Ansatzpunkt in Misskredit gezogen. Als dann

die Untersuchungen zur Veröffentlichung eingereicht wurden, stellte sich heraus, dass die Daten im Gegensatz zur Behauptung die ursprünglichen Befunde sehr wohl stützten. Weitere Experimente ebenfalls im Auftrag des Militärs zeigten scheinbar auch keinen Effekt. Betrachtet man aber die angewendeten Methoden, dann stellt man fest, dass durch einen simplen Trick die Aufnahme der Untersuchungssubstanz, die dann im Gehirn nachgewiesen werden sollte, verzögert worden war: anstatt die Substanz intravenös zu verabreichen, hatte man sie in die Bauchhöhle gespritzt, ohne eine Korrektur für die deutlich verlängerte Zeit, bis die Substanz ins Gehirn gelangen kann, vorzunehmen. Inzwischen war aber das Thema für die Forschungsförderung durch die US Bundesregierung zu kontrovers geworden, und sie stellte die Förderung ein. Bis heute hat sich dieser Forschungsbereich von den Kontroversen nicht erholt.

Ähnliche Vorgangsweisen kann man für eine Reihe anderer Schlüsselexperimente erkennen. So hatten Lai und Singh von der Universität Washington 1995 und 1996 berichtet, dass es nach Mikrowellenexposition im Bereich des Grenzwerts für die lokale Exposition des Schädels zu Strangbrüchen der DNS in Gehirnzellen kommt [7,8]. Diese Experimente wurden im Auftrag der Telekommunikationswirtschaft wiederholt, dabei wurde allerdings eine Vielzahl von Änderungen der experimentellen Bedingungen vorgenommen und insbesondere eine andere Methode zum Nachweis der Strangbrüche eingesetzt.

## Zusammenfassung

Der einzige anerkannte Wirkungsmechanismus hochfrequenter EMF ist die Erwärmung des Körpers oder von Körperteilen durch Absorption elektromagnetischer Energie und bei Frequenzen unter 10 MHz die Reizung von Muskeln und Nerven. Diese Effekte treten nur bei sehr hohen Feldstärken auf, die normalerweise in der Umwelt nicht und an Arbeitsplätzen nur sehr selten vorkommen. Die Frage, ob es Effekte einer langfristigen Exposition gegenüber niedrigen Intensitäten hochfrequenter Felder gibt, kann derzeit nicht eindeutig beantwortet werden. Die Gesamtsicht der bisherigen Forschung deutet aber eher auf die Existenz langfristiger gesundheitlicher Folgen hin. Das Grundproblem bei der Risikobeurteilung ist das Fehlen eines für solche Effekte plausiblen Wirkmechanismus. Dadurch ist es auch nicht möglich, die Eigenschaften der Expositionssituation zu präzisieren, die für die Effekte verantwortlich sind. Folglich lässt sich auch keine Messgröße angeben, mit denen die experimentellen oder epidemiologischen Daten in Verbindung gebracht werden können. Aus diesem Mangel ergibt sich schließlich die Schwierigkeit, dass man von bestimmten einzelnen Expositionsbedingungen nicht auf andere verallgemeinern kann. Dies

schränkt die Verwendbarkeit der vorliegenden Hinweise etwa für die Ableitung eines Expositionsrichtwertes ein.

Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten ist eine rationale Vorgangsweise beim Umgehen mit diesen möglichen Risiken an der Vorsorge orientiert. Da man nicht weiß, welche Aspekte der Exposition eventuell nachteilig sind, wird man versuchen müssen, alle Einwirkungen unter dem Primat der Minimierung zu behandeln. Die in anderen Bereichen erprobten Vorsorgestrategien wie die Anwendung des ALARA-Prinzips und die umsichtige Vermeidung können auch im Fall hochfrequenter EMF angewendet werden.

Die Bevölkerung erwartet von der Wissenschaft klare Antworten, leider ist das bei sehr komplizierten Fragestellungen und vor allem dann, wenn es starke Interessensgegensätze gibt, oft nicht möglich. Aufgrund der gegebenen Situation wird es notwendig sein, mehr Forschung von unabhängiger Seite durchzuführen. Selbst wenn man von sehr optimistischen Voraussetzungen ausgeht, dann ist in den nächsten 10 Jahren nicht mit einer Klärung der wichtigsten offenen Fragen zu rechnen. Vielleicht wird man im Bereich des Mobilfunks in einigen Fragen etwas früher zu einem Konsens kommen, für das ausgedehnte Gebiet aller hochfrequenten EMF wird das aber sicher viel länger dauern.

## Literaturverzeichnis

- |  |   |
|--|---|
| <p>[1] Boysen JE (1953): Hyperthermic and pathologic effects of electromagnetic radiation (350 Mc), A.M.A. Arch Indust Hyg 7: 516-525</p> <p>[2] Tynes T, Hannevik M, Andersen A, Vistnes AI, Haldorsen T (1996): Incidence of breast cancer in Norwegian female radio and telegraph operators. Cancer Causes Control 7:197-204</p> <p>[3] Dolk H, Shaddick G, Walls P, Grundy C, Thakrar B, Kleinschmidt I, Elliott P (1997): Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part I. Sutton Coldfield Transmitter. Am J 145:1-9.</p> <p>[4] Dolk H, Elliot P, Shaddick G, Walls P, Thakrar B (1997): Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, Part II. All high-power transmitters. Am J Epidemiol 145:10-17.</p> | <p>[5] Chou C-K, Guy AW, Kunz LL, Johnson RB, Crowley JJ, Krupp JH (1992): Long-term, low-level microwave irradiation of rats. Bioelectromagnetics 13:469-496</p> <p>[6] Frey AH, Feld SR, Frey B (1975): Neural function and behavior: Defining the relationship. Ann NY Acad Sci 247:433-439.</p> <p>[7] Lai H, Singh NP (1995): Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single strand breaks in rat brain cells. Bioelectromagnetics 16:207-210.</p> <p>[8] Lai H, Singh NP (1996): Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. Int J Radiat Biol 69:513-521.</p> |
|--|---|