

Biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder

Innerhalb des Frequenzbereiches elektromagnetischer Strahlungen bestehen erhebliche Unterschiede sowohl hinsichtlich des physikalischen Verhaltens der Strahlung selbst als auch hinsichtlich der Wechselwirkung mit biologischen Objekten und der biologischen Wirksamkeit. Aus diesem Grund sind verschiedene Frequenzbereiche getrennt zu betrachten. Der Begriff „Elektrosmog“, der von den Medien geprägt wurde und unspezifisch jegliche technisch hervorgerufenen Felder in unserer Umwelt einbezieht, ist daher irreführend und täuschend. Ob elektromagnetische Emissionen gesundheitsbeeinträchtigend oder gar gefährdend sein können, kann nicht einfach mit ja oder nein beantwortet werden, sondern erfordert differenzierte Antworten.

Die Vorstellungen über biologische Wirkungen elektromagnetischer Mobilfunk-Strahlung werden in der Öffentlichkeit noch immer von den Erfahrungen mit Röntgen- oder radioaktiver Strahlung geprägt. Dies ist aus mehreren Gründen falsch. Während Röntgenstrahlung so energiereich ist, daß selbst die kleinstmögliche Strahlungsmenge ausreicht, um ein Molekül zu schädigen, sind Mobilfunkstrahlungen dazu grundsätzlich nicht in der Lage. Dies führt zu wichtigen Konsequenzen:

1. Während man bei Röntgenstrahlung immer mit der Möglichkeit eines Schadens rechnen muß, gibt es bei Mobilfunkstrahlung grundsätzlich sichere Schwellenwerte. Eine Gefährdung kann daher nur auftreten, wenn die Strahlung zu stark ist.
2. Bei Röntgenstrahlung muß immer mit dem Auftreten klein-

ster bleibender Schäden gerechnet werden, die sich im Laufe der Zeit aufsummieren und z.B. zur Krebsbildung führen können. Bei Mobilfunkstrahlung gibt es hingegen unterhalb der Schwellenwerte keine bleibenden Veränderungen. Eine Wirkung kann daher nur gleichzeitig mit der Exposition auftreten und verschwindet danach wieder. Das Dosis-konzept der Röntgentechnik, wonach die zeitliche Summe der einwirkenden Strahlung die biologische Wirkung bestimmt, gilt daher hier nicht.

Physikalisches Verhalten

Der Bereich von den niederen Frequenzen der Energieversorgung bis zu denen des Mobilfunks ist groß: Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde entspricht in

etwa dem Alter unserer Erde in Jahren. So wie die verschiedenen Erdperioden unterscheiden sich auch die verschiedenen Frequenzbereiche.

Im **Niederfrequenzbereich** elektromagnetischer Felder sind die folgenden beiden Komponenten getrennt zu betrachten: *Elektrische Felder* werden von elektrischen Spannungen verursacht und sind daher im Alltag keinen starken zeitlichen Schwankungen ausgesetzt. Die Ursache *magnetischer Felder* hingegen ist der elektrische Strom. Ihre Stärke schwankt daher ständig mit dem Verbrauch elektrischer Energie. Man bezeichnet beide Arten als Felder, weil sie sich nicht wie eine Strahlung von der Quelle ablösen können; sie nehmen mit der Entfernung zur Quelle stark ab.

Im **Hochfrequenzbereich** sind beide Feldarten wie die Glieder einer

Kette untrennbar miteinander verknüpft: Hier können sie sich von der Antenne lösen und je nach der Antennenform gebündelt oder allseitig in den Raum ausbreiten. Erst hier ist die Bezeichnung elektromagnetische Strahlung berechtigt.

In Abhängigkeit der Entfernung von der Sendeantenne können zwei unterschiedliche Bereiche unterschieden werden: Im Nahbereich ist die Stärke der Strahlung sehr inhomogen. Es treten „heiße“ und „kalte“ Stellen auf. Im weiteren Umfeld ist die Stärke homogen, sie nimmt jedoch sehr rasch, nämlich mit dem Quadrat der Entfernung, ab. Dies ist der Grund, weshalb bei der Benutzung eines Handys die oberflächennahen Bereiche des Kopfes einer wesentlich stärkeren Strahlung ausgesetzt sind, als sie in der Nähe von Basisstationen auftritt.

Technik des Mobilfunks

Bis vor kurzem wurde die Telekommunikation analog, also bei ununterbrochener Aussendung hochfrequenter Trägerwellen vorgenommen, auf denen die Nachricht entweder in Form von Amplituden- oder Frequenzschwankungen aufmoduliert ist. Dies hat technisch zwei Nachteile: Einerseits wird mehr Sendeenergie benötigt (was vor allem bei batteriebetriebenen Geräten bedeutsam ist), und andererseits kann mit einer Trägerfrequenz nur eine einzige Verbindung hergestellt werden.

Die letzten Jahre sind durch den zunehmenden Wunsch nach im-



Die Nachfrage nach Funkverbindungen hat sich in den letzten Jahren erhöht. Hier eine D2-Basisstation im Schwarzwald (Foto: Mannesmann Mobilfunk)

mer mehr Funkverbindungen und mehr Radio- und Fernsehprogrammen geprägt. Da der verfügbare Frequenzbereich jedoch beschränkt ist, besteht die technische Lösung darin, eine Trägerschwingung für mehrere Verbindungen gleichzeitig zu nutzen. Dies geschieht, indem sie in Zeitsegmente unterteilt, digitalisiert wird und die Verbindung mit einem Teilnehmer nur mehr für jeweils kurze Zeitschnitte hergestellt wird. Die verbleibenden Pausenabschnitte können somit für jeweils wiederum nur kurzzeitige Verbindungen mit anderen Teilnehmern genutzt werden. Bei GSM-Telefonen können mit einer Trägerschwingung bis zu 8 Teilnehmer gleichzeitig bedient werden.

Dies bedeutet jedoch, daß es zwischen den Signalen des Handy-Benutzers und der Basisstation wesentliche Unterschiede gibt:

Da der *Telefonierende* ja jeweils nur einen einzigen Zeitschlitz belegen darf, ist das vom Handy ausgestrahlte Signal stärker, nämlich im (starrten) Verhältnis 1:8, gepulst, allerdings nur

während der aktiven Sprechphasen. Während des Zuhörens unterbleibt die Abstrahlung. Die Expositionsdauer ist daher gering. Im Standby-Betrieb ist die Abstrahlung auf sporadische Kommunikationen begrenzt und vernachlässigbar.

Im Gegensatz dazu sind die Signale der *Basisstation* gleichförmiger, da in der Regel über mehrere Zeitschnitte gleichzeitig die Verbindung zu mehreren Kunden aufgenommen wird. Für Personen im Bereich von Mobilfunkstationen ist die Dauer der Exposition im Prinzip unbegrenzt. Die Stärke ist jedoch um mehrere Größenordnungen geringer als bei Handys und unterliegt entsprechend der variierenden Anzahl der Gesprächsteilnehmer einem ausgeprägten Tagesgang. Abgesehen von einem Kontrollkanal wird nämlich auf nicht benutzten Kanälen nicht gesendet.

Da die Sendestärke ständig auf dem niedrigstmöglichen Wert gehalten wird, sind sowohl bei Handys als auch bei Basisstationen die Signalamplituden laufenden Schwankungen unterworfen.

Biologische Wirkungen

Die biologische Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung kann je nach der Stärke unterschiedliche Bedeutung besitzen. Die Feststellung von Veränderungen einer Meßgröße, also ein „Effekt“, bedeutet allerdings noch nicht, daß dies bereits physiologisch bedeutsam oder gar gesundheitlich relevant wäre.

Die Diskussion um die biologischen Auswirkungen umfaßt heute drei Bereiche: den Wärmewirkungsbereich, den Wirkungsbereich schwacher Strahlung und die indirekten Wirkungen.

Wärmewirkungsbereich

Daß intensive hochfrequente Strahlung in der Lage ist, gravierende Erwärmungen hervorzurufen, ist heute allgemein bekannt und wird ja kommerziell in Industrie, Gewerbe und Haushalt, z.B. in Form des Mikrowellenherdes, ausgenutzt. Ebenso unbestritten ist, daß es auch ein Gefährdungspotential bis hin zur Lebensbedrohung gibt, das durch die Einhaltung von Grenzwerten ausgeschlossen werden muß.

Der Vorgang der Körpererwärmung ist gut bekannt: Er besteht in der Umwandlung von Strahlungsenergie in mechanische Wärmebewegung der Moleküle; eine chemische Veränderung findet dabei nicht statt. Da dies bei Wassermolekülen am besten geschieht, wird das wasserreiche Muskelgewebe besonders gut und die trockene Haut, in der sich unsere Temperaturfühler befinden, kaum erwärmt. Dies ist der

Grund, weshalb wir eine Übererwärmung durch hochfrequente Strahlung nicht rechtzeitig wahrnehmen können.

Die Menge der aufgenommenen Wärme erlaubt noch keine Rückschlüsse auf die biologische Wirksamkeit. Der Grund liegt darin, daß diese auch von der Wärmeempfindlichkeit, der Durchblutung und vom Wärmespeichervermögen der Körpermasse abhängt.

Ganzkörpererwärmung

Die gleiche Wärmemenge bedeutet für ein Kind eine größere Belastung als für einen Erwachsenen. Um dies zu berücksichtigen, wird

die aufgenommene Strahlungsleistung auf die Körpermasse bezogen und als SAR (spezifische Absorptionsrate) in Watt pro Kilogramm angegeben. Bereits ohne körperliche Aktivität erzeugen wir durch die Stoffwechselvorgänge eine Wärmeleistung, die etwa 1 W/kg entspricht. Die bestehenden Grenzwerte für die Ganzkörpererwärmung sind so festgelegt, daß die zusätzliche Erwärmung nicht nur den Körper nicht belastet, sondern nicht einmal eine Temperaturregelung erfordert. Für die Allgemeinbevölkerung ist eine Wärmezufuhr von weniger als 10%, nämlich nur 0,08 W/kg erlaubt. Dieser Grenzwert wird bei Mobil-

funk-Basisstationen in der Regel selbst innerhalb der Strahlungskeule bereits ab ca. 1-2 m Entfernung unterschritten.

Teilkörpererwärmung

Der Bezug auf die gesamte Körpermasse ist nur sinnvoll, wenn die Erwärmung den gesamten Körper gleichmäßig erfaßt. Bei körpernahen Quellen wie dem Handy ist dies nicht der Fall. Um daher auch eine lokale Übererwärmung zu begrenzen, ist auch eine kleinräumige Bestimmung und Begrenzung der spezifischen Absorptionsrate vorgesehen. International sind die Regelungen diesbezüglich noch uneinheitlich und sehen einen Bezug auf jeweils 1, 10 oder 100 Gramm Körpergewebe vor.

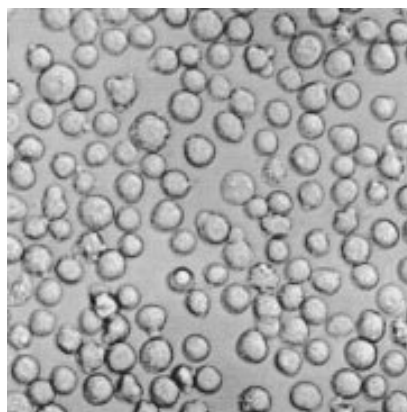
Während die Exposition der Bevölkerung durch Basisstationen um viele Größenordnungen unter dem Grenzwert liegt, ist die Situation bei Handies nicht so günstig: Da bei einigen Modellen bis zu 80% der Sendeleistung bereits am Kopf in Wärme umgewandelt wird, wird der (lokale) Grenzwert oft nur knapp unterschritten.

Wirkungsbereich schwacher Strahlung

Es wird heute allgemein akzeptiert, daß bei Einhaltung der Grenzwerte gesundheitsrelevante Wärmewirkungen ausgeschlossen werden. Die Diskussion rankt sich daher um die Frage, ob durch andere, nicht-thermische Wechselwirkungsmechanismen innerhalb des zulässigen Strahlungsbereiches biologische Wirkungen auftreten können.

Bereits die Definition der elektrischen Feldstärke beruht auf der

(nicht-thermischen) Kraftwirkung auf ein geladenes Teilchen. Daß daher Wirkungen möglich sind, die nicht auf einer Erwärmung beruhen, ist an sich trivial. Genau genommen verbirgt sich daher hinter der Diskussion um nicht-thermische Wirkungen nicht die Frage der Existenz an sich, sondern ob und unter welchen Bedingungen diese biologische Relevanz erhalten können.



An Lymphozyten wird untersucht, ob EM-Felder Einfluß auf die Krebsentstehung nehmen (Foto: Uni Bonn)

In der wissenschaftlichen Literatur gibt es dazu eine Vielzahl von Berichten über Effekte, die durch schwache Bestrahlung festgestellt wurden. Die breite Palette von Untersuchungsobjekten reichte dabei von Einzelmolekülen, künstlichen Nachbildungen einer Zellmembran, Bakterien und Hegezellen, Kulturen von Körperzellen, Gewebeproben, Lebewesen wie Fliegen, Schnecken, Vögel, Geflügel, Mäuse, Ratten, Affen bis hin zum Menschen. Untersucht wurden dabei

- Bindungsverhalten von Ionen
- Aktivität von Enzymen
- Zellmembranen
- Zellteilungsvorgänge

- Zellwachstum
- Hormonproduktion
- Circadiane Periodik
- Tumorbildung
- Tumorwachstum
- Hirnaktivität
- Verhalten

Die Schwierigkeit der Interpretation der Ergebnisse hat mehrere Ursachen:

- a) Einerseits konnten Ergebnisse meist nicht einmal von der selben Gruppe reproduziert werden.
- b) Darüber hinaus berichteten verschiedene Gruppen über einander widersprechende Ergebnisse.
- c) Ein Vergleich wird dadurch erschwert, daß Versuchsdurchführung, Expositionskennwerte und Analysemethoden verschiedener Gruppen unterschiedlich sind.
- d) Das Know-how der Gruppen unterscheidet sich erheblich. Fehler in Hinblick auf die Expositionsanordnung, die Bestimmung der biologischen Dosis, der Behandlung der Untersuchungsobjekte und der Analysemethoden sind daher nicht selten.
- e) Ferner sind die Untersuchungsobjekte vom Menschen äußerst verschieden und lassen nur sehr schwer einfache Rückschlüsse zu.

Schlußfolgerungen können und dürfen sich daher nicht auf unbestätigte Einzeluntersuchungen beschränken. Es ist vielmehr zu beurteilen, ob ein beobachteter Effekt, selbst wenn er gesichert wäre, beim Menschen aufgrund der unterschiedlichen physiologischen Gegebenheiten überhaupt auftreten könnte und wenn, ob er dann auch noch relevant wäre.

Schwankungen im Alltag

Noch vor wenigen Jahren war von einzelnen Physikern die Meinung vertreten worden, hochfrequente Strahlung müßte jedenfalls stärker als das thermische Rauschen sein, um meßbare biologische Effekte verursachen zu können. In der Zwischenzeit wurden einige theoretische Modelle vorgeschlagen, die Wirkungen auch unterhalb der Rauschgrenze erklären könnten. Im wesentlichen handelt es sich dabei um Modelle, die auf Resonanzphänomenen beruhen und damit erklären, weshalb die berichteten Effekte überwiegend nur innerhalb enger Frequenz-, aber auch Amplitudenbereiche festgestellt werden konnten und in manchen Fällen überdies noch von der Stärke und Orientierung des Erdmagnetfeldes abzuhängen scheinen.

Dies hat mehrere wichtige Konsequenzen: Die Ausbildung von Resonanzen erfordert über ausreichend lange Zeit die Beibehaltung konstanter Expositionsbedingungen, also der Frequenz und der Strahlungsstärke. Dies kann zwar im Labor erreicht werden, im Alltag und insbesondere sowohl bei der Benutzung des Handys als auch bei Exposition gegenüber der Strahlung von Basisstationen sind diese Anforderungen nicht erfüllt. Tatsächlich zeigen Untersuchungen, daß Effekte verschwinden, wenn bereits nur die Amplitude oder die Pulsation zufälligen Schwankungen unterworfen wird.

Epidemiologische Studien

Auch wenn die bestehenden Grenzwerte relevante thermische Wirkungen ausschließen und in

den bisherigen Untersuchungen keine durch schwache Strahlungen verursachten bleibenden Veränderungen festgestellt werden konnten, bestehen in der Bevölkerung Befürchtungen, daß sich eine dauernde Exposition dennoch negativ auf die Gesundheit auswirken könnte. Einen Weg zur Klärung dieser Frage bieten epidemiologische Studien, in denen der Gesundheitszustand oder die Häufigkeit von Krebs von exponierten mit nicht exponierten Personengruppen verglichen wird. Es zeigt sich jedoch, daß diese Methodik im Fall der elektromagnetischen Strahlungen sehr unzuverlässige Ergebnisse liefert. Der Grund dafür liegt darin, daß bereits das Ausmaß der Exposition nur äußerst vage erfaßt werden kann und überdies nach wie vor ein gesichertes Konzept für die Bewertung der biologischen Bedeutung zeitlich schwankender Expositionen fehlt. Dies macht bereits die Zuordnung von Personen in die Gruppe der Exponierten oder Nichtexponierten äußerst unsicher. Darüber hinaus wirken jedoch ständig gleichzeitig auch andere Einflüsse (Kofaktoren), die ebenfalls die Gesundheit beeinflussen können. Es ist daher nicht verwunderlich, daß die bisherigen epidemiologischen Untersuchungen uneinheitliche und sogar widersprechende Ergebnisse erbrachten.

Auch wenn damit die Frage nicht eindeutig geklärt werden konnte, ist es doch beruhigend, daß auch die Laborbefunde bisher nicht auf eine krebserzeugende Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung hinweisen und ein Risiko, wenn es überhaupt existiert, klein sein muß.

Indirekte Wirkungen

Mobilfunksignale können nicht nur von Antennen empfangen werden, sondern auch in elektronischen Schaltkreisen Störspannungen erzeugen, die in empfindlichen elektronischen Geräten verstärkt werden und Funktionsbeeinträchtigungen bewirken können. Unangenehm oder sogar bedenklich kann dies werden, wenn davon elektromedizinische Geräte des Patienten, wie z.B. Hörhilfen oder Herzschrittmacher, betroffen sind. Patienten sollten sich daher der Möglichkeit einer Störbeeinflussung bewußt sein und mit Mobilfunkgeräten verantwortungsbewußt umgehen. Da - Handys auch in der Lage sind, lebenswichtige elektromedizinische Geräte zu stören, ist in kritischen Bereichen wie im Operationsaal oder auf Intensivstationen der Gebrauch von Handys verboten.

Fazit

Durch Strahlungsstärken, wie sie durch Mobilfunk-Basisstationen erzeugt werden, konnten bisher keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen nachgewiesen werden. Selbst die Benutzung von Handys ist unkritisch, erfordert jedoch wegen möglicher indirekter Wirkungen einen bewußten Umgang durch Risikogruppen oder in gefährdeten Bereichen.

Prof. Dr. Norbert Leitgeb,
Institut für Biomedizinische Technik,
Technische Universität Graz