
Exkurs: Hochfrequente Strahlung in der Medizin

Mikrowellen-Diagnostik: Die vom Körper ausgesandte Strahlung wird in der Medizin diagnostisch ausgewertet, indem mit Hilfe von Infrarotkameras die Temperaturverteilung an der Körperoberfläche abgebildet wird. Zur Untersuchung tieferer Gewebsebenen ist es notwendig, die niederfrequenteren Strahlungsanteile im Mikrowellenbereich auszuwerten. In diesem Fall spricht man von Mikrowellen-Thermographie.

Da Mikrowellenstrahlung die Wolkenhaut durchdringt, spielt ihre Auswertung auch bei der militärischen und zivilen Fernerkundung durch Satelliten wegen der damit erreichten Wetterunabhängigkeit eine zunehmende Rolle.

Elektrochirurgie: Die fehlenden Reizwirkungen im hochfrequenten Bereich sind in der Medizin die Voraussetzung, um z. B. in der Hochfrequenzchirurgie hohe Stromdichten einzusetzen, ohne gleichzeitig Muskelzuckungen auszulösen. Damit ist es möglich, durch eine »Schneide«-Elektrode das Gewebe so rasch zu erwärmen, daß an der Kontaktstelle die Zellen zerbersten und sich das Gewebe wie durch einen Schnitt öffnet. Der Vorteil ist dabei, daß die lokale Erwärmung gleichzeitig zum Verschluss der durchtrennten Blutgefäße führt und dadurch die Sicht auf das Operationsgebiet auch beim Durchtrennen stark durchbluteter Bereiche erhalten bleibt.

Tumorbehandlung: Die bevorzugte Erwärmung leitfähiger Teile durch hochfrequente Felder wird gezielt zur Therapie einer speziellen Krebserkrankung ausgenutzt: Während andere Tumorarten an unvorhersehbaren Stellen im Körper Metastasen bilden können, ist das Glioblastom, eine spezielle bösartige Hirntumor-Erkrankung, dadurch charakterisiert, daß sich seine Metastasen nach der Entfernung des Primärtumors ausschließlich an den Rändern der Operationswunde im Gehirn neu bilden. Wenn man am Ende der Erstoperation diese Ränder mit Metallpulver bestreut, bietet sich die Möglichkeit, später von außen durch hochfrequente elektromagnetische Felder gezielt das Metallpulver und damit das unmittelbar angrenzende metastasengefährdete Hirngewebe kurzfristig so stark zu erwärmen, daß die neuerlich wachsenden Tumorzellen abgetötet werden. Durch diese ambulante Behandlung, die nur einige Minuten dauert und in regelmäßigen Abständen wiederholt wird, kann das weitere Tumorzellwachstum unterbunden werden.

Ein Vergleich zwischen konventioneller und hochfrequenter Erwärmung zeigt, daß zwar nicht die Erwärmungsmechanismen selbst, wohl aber die Art der Wärmeeinkopplung unterschiedliche biologische Konsequenzen haben.

Bei konventioneller Erwärmung besteht ein Temperaturgefälle zwischen Oberfläche und Körperinnerem: Es wird zunächst die Haut erwärmt, und erst allmählich gelangt die Wärme durch Wärmeleitung in das Körperinnere, so daß einerseits die Hautrezeptoren diesen Vorgang frühzeitig erfassen und andererseits dem Körper für die Temperaturregelung mehr Zeit bleibt.

Im Gegensatz dazu ist bei hochfrequenter Erwärmung die Temperaturregelung behindert. Der Grund liegt darin, daß die Strahlung vom Körpergewebe direkt absorbiert wird, ohne daß die wasserarme Hautschicht wesentlich erwärmt würde. Dadurch können

die peripheren Rezeptoren ihre Vorwarnfunktion nicht ausfüllen, so daß die Temperaturregelung träger erfolgt. Dieser Einfluß ist umso größer, je mehr Wärme jenem Bereich zugeführt wird, in dem sich weder äußere noch innere Wärmefühler befinden. Darüber hinaus behindert die vergleichsweise kühle Hautoberfläche die Wärmeabgabe durch zwei weitere Effekte: Zum einen ist die von der 4. Potenz der Temperatur abhängige Wärmeabgabe durch Strahlung reduziert, zum anderen ist auch die Wärmeabgabe durch Durchblutungssteigerung und Schweißsekretion ebenfalls niedriger als bei konventioneller Erwärmung.

Die Umgehung der äußeren Wärmefühler hat darüber hinaus auch die Folge, daß die Gewebserwärmung nicht oder erst zu spät bewußt wird, so daß der Gefahrenbereich nicht rechtzeitig erkannt und verlassen werden kann.

Wird der Körper durch genügend starke hochfrequente Felder bestrahlt, tritt ein exponentieller Temperaturanstieg ein, der zunächst allein von der zugeführten Energie abhängt und bei konstanter Intensität linear mit der Bestrahlungsdauer ansteigt. Der Verlauf des Temperaturanstiegs kann durch die sogenannte »thermische Zeitkonstante« charakterisiert werden, die bei ca. 6 Minuten liegt. Dieser Wert ist in fast allen Grenzwertregelungen zur Definition der Kurzzeitbestrahlung herangezogen worden.

Der Temperaturanstieg hängt wesentlich von den Durchblutungsverhältnissen des Gewebes ab: Bei schlecht durchbluteten Bereichen wie z. B. der Augenlinse ist er entsprechend höher. Nach etwa 10 Minuten bleibt zunächst aufgrund der Wärmeleitung und -verteilung durch den Blutkreislauf die Temperatur konstant.

Nach Beendigung der Bestrahlung kehrt die Temperatur allmählich auf ihren Ausgangswert zurück, wobei durch die erhöhte Blutzirkulation und die Erweiterung der Kapillaren sogar noch nach 20 bis 30 Minuten eine vorübergehende Unterschreitung des Ausgangswertes möglich ist.

Bei nicht zu großen Intensitäten ist eine kurzzeitige Bestrahlung ungünstiger als eine dauernde. Der Grund dafür liegt darin, daß der Körper sich bei lange anhaltender Bestrahlung auf die Wärmezufuhr einstellen und Abweichungen von der Kerntemperatur ausregulieren kann, während dies bei kurzen Bestrahlungsdauern wegen der Trägheit der Wärmeregulation erschwert ist.

Linsentrübung und Herzinfarkt

Daß eine Änderung der Körperkerntemperatur biologische Auswirkungen haben kann, ist zu erwarten und wird auch durch die Erfahrung bestätigt.

Hochfrequente Strahlung kann bei ausreichender Intensität die gleichen Wärmewirkungen, wie konventionelle Wärmequellen verursachen. Dies kann bis zur Trübungen der Augenlinse, Verbrennungen oder sogar den Tod führen.

Die Auswirkungen einer Bestrahlung hängen nicht nur von der einfallenden Strahlungsstärke ab. Wesentlich ist vor allem, wieviel davon vom Gewebe aufgenommen, also absorbiert wird und wie empfindlich das Gewebe auf die Erwärmung reagiert. Darüber hinaus ist auch die Durchblutung des Gewebes wichtig. Sie beeinflusst, wie warm das Gewebe wird, da durch sie die zugeführte Wärme abgeführt werden kann.

Die Empfindlichkeit der Gewebe gegenüber Temperaturerhöhungen unterscheidet sich

erheblich: Sie ist am größten bei Hodengewebe und Spermien.

Wegen der fehlenden Durchblutung und der dadurch behinderten Wärmeabgabe ist vor allem die Augenlinse zu beachten.

Das Absorptionsvermögen von Geweben variiert stark. Es ist umso höher, je größer der Wassergehalt ist. Es können drei Fälle unterschieden werden:

- wasserreiche flüssige Aufschlammungen von Zellen, z.B. Blut;
- zusammenhängende wasserreiche Zellverbände, z.B. Muskelgewebe, und
- Gewebe mit geringem Wassergehalt, z.B. Fett oder Knochen.

Die ersten Untersuchungen über die Abhängigkeit der biologischen Wirkungen vom zeitlichen Verlauf der Strahlung erfolgten mit (gepulster) Radarstrahlung. Dabei konnte festgestellt werden, daß Menschen Mikrowellenimpulse bei ausreichender Dauer und geeigneter Pulsfolgefrequenz bereits ab einer mittleren Intensität von $0,4 \text{ mW/cm}^2$ als Klicken, Summen, Zischen oder Klopfen hören konnten (Mikrowellenhören). Unabhängig von der Lokalisation der Versuchsperson im Feld wurde der Höreindruck im oder hinter dem Hinterkopf lokalisiert. Schwerhörige nahmen die Impulse nur wahr, wenn ihr Innenohr intakt war. Dieser Effekt wurde lange als Beweis für eine nicht-thermische Wirkung angesehen. In der Zwischenzeit ist der Nachweis gelungen, daß durch die Impulsenergie im flüssigkeitsgefüllten Innenohr kurzzeitige Temperaturerhöhungen von nur $5 \cdot 10^{-6} \text{ °C}$ entstehen. Diese verursachen jedoch thermoelastische Druckwellen, die sich zum Innenohr ausbreiten und dort den Höreindruck bewirken. Daß dieser nicht vom Intensitätsspitzenwert, sondern von der Impulsenergie abhängt, ist eine weitere Bestätigung daß es sich um einen thermischen Effekt handelt. Bei einer Frequenz von 2,45 GHz und Pulsdauern unter 30 μs liegt die Wahrnehmbarkeitsschwelle der Energiedichte bei ca. 400 mJ/m^2 pro Puls und kann sich in sehr ruhiger Umgebung um ca. ein Drittel auf 280 mJ/m^2 verringern. Bei Tieren liegt die Wahrnehmbarkeitsschwelle noch niedriger, Der Effekt des Mikrowellenhörens kann im Tierversuch Verhaltensänderungen auslösen.

Die Wahrnehmung durch ein Wärmegefühl erfolgt erst bei wesentlich höheren Intensitäten: Bei der kontinuierlichen Bestrahlung der Stirn und des Unterarmes konnten bei 3 GHz und nach 10 s erst Intensitäten über $33,5 \text{ mW/cm}^2$ wahrgenommen werden. Mit zunehmender Frequenz verringert sich die Wahrnehmbarkeitsschwelle, da sich die Erwärmung immer mehr auf hautnahe Bereiche konzentriert. Bei 1000 GHz (im Infrarotbereich) beträgt sie z.B. nur mehr $12,6 \text{ mW/cm}^2$ ([Abb. 59](#)).

Im Gegensatz zu anderen Körperbereichen ist das Absorptionsvermögen der Linse für optische Strahlung so gering, daß sie ohne besondere Kühlsysteme auskommt. Dadurch ist sie jedoch gegen übermäßige Erwärmung besonders anfällig. Trübungen der Augenlinse (Katarakte) durch zu starke Einwirkung von Infrarot- Wärmestrahlung sind in Hochofenbetrieben als Berufserkrankung anerkannt. Es gilt heute als gesichert, daß Schädigungen der Augenlinse auch im Bereich der hochfrequenten elektromagnetischen Wellen grundsätzlich möglich sind und thermische Ursachen haben. Akute Linsentrübungen konnten jedoch erst festgestellt werden, wenn die Augentemperatur auf über 45 °C erhöht wurde. Dazu waren Intensitäten weit über der Wahrnehmbarkeitsschwelle erforderlich, sodaß Tiere durch ihr Fluchtverhalten geschützt waren. An narkotisierten Kaninchen lag der Schwellwert für (makroskopisch sichtbare) Linsentrübungen im Frequenzbereich von 400 MHz bis 3 GHz bei 100 bis 200 mW/cm^2 ; bei 5,5 GHz waren bereits 800 mW/cm^2 erforderlich ([Abb. 60](#)). Bis zu einer

Intensität von 80 mW/cm^2 konnten mikroskopisch kleine Trübungen festgestellt werden. Auch die Bildung von Mikrotrübungen setzt eine starke Erhöhung der Augeninnentemperatur, auf über 41°C , voraus. Sie bilden sich jedoch nach einigen Tagen wieder zurück. Folgen die Expositionen in zu kurzen Abständen, können sie sich zu makroskopischen Veränderungen summieren. Da getrübe Linsen die Strahlung verstärkt absorbieren, tendieren Linsentrübungen zu beschleunigtem Fortschreiten, auch wenn die Expositionsbedingungen gleich bleiben.

Die für die Erzeugung von Linsentrübungen erforderlichen Intensitätswerte sind von Spezies zu Spezies sehr verschieden. Sie liegen umso höher, je größer die Körpermasse und je besser die Wärmeregulation sind. So ließen sich beim frei beweglichen Affen Katarakte durch Mikrowellenbestrahlung bei $2,45 \text{ GHz}$ überhaupt nicht erzeugen. Nach ihrer Narkotisierung kam es noch vor dem ihrem Auftreten zu Verbrennungen der Gesichtshaut. Beim Menschen sind die erforderlichen Intensitätswerte nochmals höher. Da sie somit nicht nur über der Wahrnehmbarkeits-, sondern auch über der Schmerzgrenze liegen, können Linsentrübungen nicht unbemerkt auftreten.

Einige Studien legen nahe, daß gepulste Strahlung trotz niedriger Mittelwerte degenerative Veränderungen der Netzhaut und der Hornhaut verursachen können, wenn die Pulsenergie ausreichend hoch ist. Die Schwellwerte für Veränderungen der Sehzellen der Netzhaut lag bei spezifischen Absorptionsraten von 260 kW/kg pro Puls (bei $10\mu\text{s}$ Pulsen mit einer Wiederholfrequenz von 100 Hz). Bei Einnahme von Medikamenten zur Glaukombehandlung sank die Schwelle auf ein Zehntel.

Gefährdung männlicher Keimzellen

Es kommt nicht von ungefähr, daß sich die männlichen Fortpflanzungsorgane außerhalb der warmen Körperhöhle befinden: Männliche Keimzellen erhalten bei ihrer Reifung einen Energievorrat, mit dem sie in weiterer Folge auskommen müssen. Höhere Temperaturen bewirken, daß dieser Energievorrat schneller aufgebraucht wird. Wenn jedoch die Spermatozoen im Ernstfall eines Zeugungsaktes weniger Reserven besitzen, ist ihre Beweglichkeit und damit die Zeugungsfähigkeit eingeschränkt. Darüber hinaus ist auch das Hodenepithel, das die Spermien bildet, temperaturempfindlich. Es kann durch Erwärmung beeinträchtigt oder sogar geschädigt werden, sodaß die Spermienbildung herabgesetzt oder unmöglich gemacht wird. An narkotisierten Mäusen wurde nach Kurzzeiteinwirkung von $2,45 \text{ GHz}$ Mikrowellenstrahlung hoher Intensitäten ab einer SAR von ca. $5,6 \text{ W/kg}$ festgesellt, daß bei Temperaturerhöhungen des Hodens ab 37°C Spermien abgetötet und das Spermienepithel reduziert wurde. Bei chronischer Exposition mit mittleren Intensitäten war es Mäusen hingegen möglich, die Hodentemperatur konstant zu halten.

Es ist bekannt, daß bei Ganzkörpererwärmungen, die zu einer Veränderung der Körperkerntemperatur über 1°C führen, biologisch relevante Wirkungen auftreten. Dies ist bei Menschen bei spezifischen Absorptionsraten ab ca. 4 W/kg anzunehmen. In Versuchen an Affen wurden Änderungen des Temperaturregelungssystems bei einer SAR von 1 W/kg festgestellt.

Bei höheren Strahlungsintensitäten und SAR ab ca. 8 W/kg können gravierendere biologische Wirkungen eintreten wie z.B. verringertes Geburtsgewicht und eine Erhöhung der Mißbildungsrate.

Herzinfarkt und Hitzetod

Die Bestimmungen jener Intensitätswerte, die beim Menschen zu lebensgefährlichen Temperaturerhöhungen führen, lassen sich aus naheliegenden Gründen nicht durch systematische Versuche ermitteln. Die Ergebnisse aus Tierversuchen sind jedoch nur schwer und mit großen Unsicherheiten auf den Menschen übertragen. Dies hat folgende Gründe:

- Sowohl die geometrischen Abmessungen der Tiere als auch die Anordnung und die relative Größe ihrer einzelnen Organe sind verschieden. Dies bewirkt eine andere Frequenzabhängigkeit der spezifischen Absorptionsraten im Vergleich zum Menschen. Dadurch kann der Vergleich je nach betrachteter Frequenz günstiger oder ungünstiger ausfallen.
- Auch bei gleich großer mittlerer SAR ist die verursachte Erhöhung der Körperkerntemperatur verschieden. Der Grund liegt in den wesentlich unterschiedlichen Wärmeabgabemöglichkeiten wegen des isolierenden Pelzkleides, des anderen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses. oder unterschiedlicher Durchblutungsverhältnisse.
- Die verwendeten Versuchstiere sind in der Regel gesund und geben daher keinen Aufschluß über die Reaktion von menschlichen Risikogruppen.
- Die Lebenserwartungen sind sehr unterschiedlich: Ein 15-monatiges Experiment bedeutet z.B. für eine Ratte mit einer Lebenserwartung von ca. 2,5 Jahren eine Exposition über die halbe Lebensdauer und hat daher eine andere Bedeutung als für einen Menschen.
- Die Laborbedingungen berücksichtigen in der Regel nicht die ungünstigsten Bedingungen, bei denen die, menschliche Temperaturregelung erschwert sein kann, wie z.B. ungünstige klimatische Bedingungen mit hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit, intensiver körperlicher Arbeit oder die Wärmeabgabe behindernde (Schutz-) Bekleidung.

Führt man dem Körper so viel Wärme zu, daß sein Regelvermögen überfordert wird, kommt es zum Anstieg der Körperkerntemperatur. Dieser ist bis zu 39°C in der Regel ohne weiteres erträglich. Ab etwa 40°C besteht jedoch die Gefahr des Kreislaufversagens (Hitzekollaps), die bei körperlicher Arbeit weiter erhöht ist. In Abhängigkeit der Temperaturempfindlichkeit und der Durchblutung können lokal bereits Gewebsschädigungen auftreten wie z.B. Blutungen, Nekrosen und Verbrennungen. Liegt die Körperkerntemperatur längere Zeit über 41°C, kann eine Gehirnschädigung eintreten, Erhöhungen über 43°C bewirken einen Hitzschlag mit meist tödlicher Folge.

Bei Mäusen führte eine Bestrahlung ab einer SAR von 30 W/kg bereits nach wenigen Minuten zum Tod. Mit zunehmender Körpermasse sinkt jedoch die für eine tödliche Temperaturerhöhung erforderliche Ganzkörper-SAR.

Informationen über biologische Wirkungen an Menschen bei Bestahlung mit starken hochfrequenten Feldern stammen vor allem von unbeabsichtigten Überexpositionen:

Bei Frequenzen unterhalb des Resonanzbereiches (< 100 MHz) kommt es zu einer Ganzkörpererwärmung. Bei hohen Intensitäten von ca. 50 mW/cm² traten unspezifische Störungen des Allgemeinbefindens auf wie Kopfschmerzen, Müdigkeit, Unlust, Angst, Aufgeregtheit, Schlafstörungen. Die Symptome konnten sich bis zu Schwindel, Übelkeit und Erbrechen steigern, waren jedoch von Person zu Person verschieden. Am gefährlichsten ist jedoch die Erhöhung der Gerinnungsneigung des Blutes, da damit eine wesentliche Erhöhung des Infarktrisikos verbunden ist. Ähnliche Folgen wurden von drei Technikern berichtet, die sich unbeabsichtigt hohen Intensitäten von Radarstrahlen (ca.

10 GHz) im Bereich von 160 bis 680 mW/cm² aussetzten. Bei dem am stärksten exponierten Mann trat bei der Annäherung an die Sendeantenne ein sehr starkes Hitzegefühl auf, nachdem er durch ein Wärmegefühl ähnlich einer warmen Luftströmung, gewarnt worden war. Da sie daraufhin den Strahlungsbereich rasch verließen, beschränkte sich die Exposition auf nur wenige Minuten.

Zwei Tage später wurden sie in eine Klinik eingeliefert mit Ödemen am Penis, Rötungen am Penisrücken und geringfügig am Brustkorb. Alle klagten über Müdigkeit, Abgeschlagenheit, Schwindel, Kopfschmerz und ein Druckgefühl über den Augen. Der Blutdruck war erniedrigt, das Blut bei allen eingedickt bei einem hohen Gehalt an roten Blutkörperchen, die Kreislaufregulation war gestört. Nach elf Tagen wurden sie beschwerdefrei aus dem Krankenhaus entlassen. Der am stärksten Exponierte erlitt am 16. Tag nach dem Vorfall einen Herzinfarkt unklarer Ursache, den er überlebte. Nach 4 Monaten litt er an Potenzstörungen und produzierte keine Spermatozoen mehr. In den folgenden Monaten erlitt er mehrere Infarkte. 4 Jahre danach starb er an einem schweren Infarkt. Die Obduktion ergab alte Infarkte auch in anderen Organen und eine stark entwickelte Arteriosklerose. Das Keimdrüsengewebe hingegen hatte sich normalisiert.

[← zurück](#) [↑ Inhalt](#) [→ vor](#)