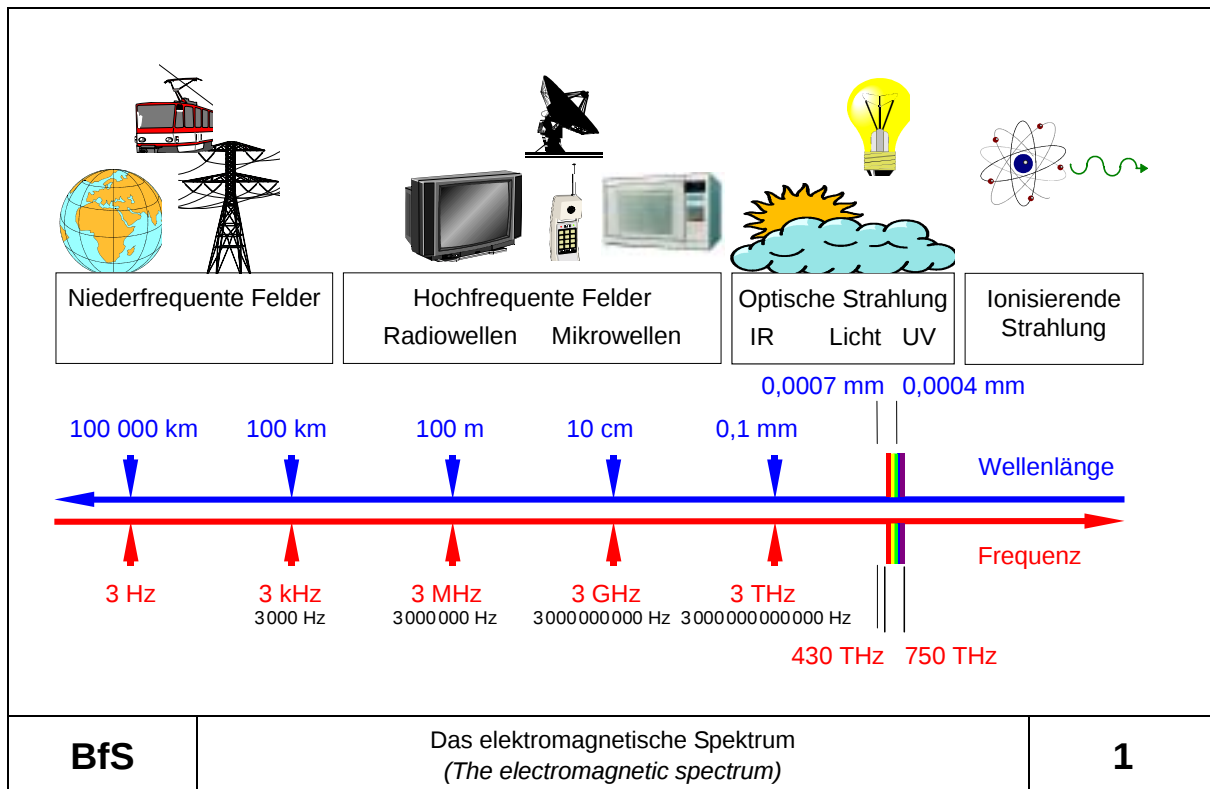


NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG

(NON-IONISING RADIATION)

Den Bereich der nichtionisierenden Strahlung (NIR) bilden niederfrequente elektrische und magnetische bzw. hochfrequente elektromagnetische Felder sowie die optische Strahlung, zu der die ultraviolette Strahlung (UV) gehört, mit Wellenlängen von 100 nm und darüber (Abb. 1). Im Folgenden wird die Physik von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern erklärt, Quellen und mögliche Expositionen angegeben, biophysikalische Wirkungsmechanismen erläutert und die nachgewiesenen sowie möglichen gesundheitlichen Wirkungen dargestellt.



1. Statische Felder (Static fields)

Der Begriff "Statische Felder" umfasst elektrostatische Felder, die z. B. in Gleichspannungsanlagen auftreten, und statische Magnetfelder, wie z. B. das natürliche Erdmagnetfeld.

Ein statisches elektrisches Feld kann elektrische Ladungen ausrichten und damit direkt auf die Körperoberfläche einwirken. Dadurch bewirkte Bewegungen von Körperhaaren oder Mikroentladungen treten bei elektrischen Feldstärken ab 20 kV/m auf. Unangenehme Empfindungen werden ab 25 kV/m erzeugt. Statische elektrische Felder können zu elektrischen Aufladungen von nicht geerdeten Gegenständen führen. Als indirekte Wirkung kommt es beim Berühren des Körpers mit einem solchen Gegenstand zu Ausgleichsströmen. In Feldern oberhalb von 5 bis 7 kV/m können solche Phänomene Schreckreaktionen durch Funkenentladungen auslösen. Im privaten wie beruflichen Alltag sind vor allem elektrostatische Aufladungen für Funkenentladungen verantwortlich, und nicht elektrische Gleichfelder von Gleichspannungsanlagen. Dies erklärt, weshalb derzeit keine Grenzwertregelungen für elektrische Gleichfelder vorliegen.

Die möglichen Wirkungsmechanismen statischer Magnetfelder sind einerseits Kraftwirkungen auf Teilchen und Gegenstände, z. B. metallische Implantate, die ein eigenes Magnetfeld besitzen oder magnetisierbar sind, und andererseits die Erzeugung elektrischer Spannungen in bewegten Körperteilchen (z. B. Blutströmung). An der Aorta führt dieser Mechanismus z. B. zu einer Potentialdifferenz von bis zu 16 mV bei einem statischen Magnetfeld von 1 T. Es ist auch abgeschätzt worden, dass die magnetohydrodynamische Inter-

aktion in einem 5 T- Feld die Flussrate in der Aorta um bis zu 7 % verringern kann. Akute Schadwirkungen einer Exposition durch statische Magnetfelder bis 2 T auf die menschliche Gesundheit lassen sich experimentell nicht nachweisen. Analysen bekannter Wechselwirkungsmechanismen lassen den Schluss zu, dass eine langfristige Exposition durch Magnetflussdichten von bis zu 200 mT keine schädlichen Folgen für die Gesundheit hat.

In Hinblick auf die Umwelt spielt die Fähigkeit von Tieren, statische Magnetfelder wahrzunehmen, eine große Rolle. Diese Wahrnehmbarkeit besteht bei Feldstärken in der Größenordnung des geomagnetischen Feldes (in Deutschland im Mittel 40 μT). Für den Menschen konnte eine derartige Wahrnehmung bisher nicht nachgewiesen werden.

In der bildgebenden medizinischen Diagnostik wird das magnetische Resonanzverfahren (nuclear magnetic resonance – NMR) angewendet. Neben medizinisch-diagnostischen Aspekten liegt der Vorteil der NMR in der Vermeidung ionisierender Strahlung. Hierbei ist der Patient statischen und zeitlich veränderlichen Magnetfeldern sowie hochfrequenten elektromagnetischen Feldern ausgesetzt. Die empfohlenen Richtwerte zur Begrenzung der Exposition liegen bei magnetischen Flussdichten von 2 T für den Kopf und/oder Rumpf und von 5 T für Extremitäten. Eine Analyse der Daten zu biologischen Wirkungen dieser Felder erlaubt es nicht, Schwellenwerte für gesundheitsschädliche Effekte exakt anzugeben. Deswegen sind Sicherheitsfaktoren bei der Festlegung von Richt- und Grenzwerten, wie die SSK sie 1998 empfohlen hat, erforderlich [1].

Literatur

- [1] SSK: Empfehlungen und Stellungnahme der Strahlenschutzkommission 1998
Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 44, Gustav-Fischer-Verlag 1999

2. Niederfrequente Felder (*Low frequency fields*)

Der Bereich der niederfrequenten Felder umfasst elektrische und magnetische Wechselfelder mit Frequenzen von 1 Hz bis 100 kHz. Die elektrische Feldstärke an der Körperoberfläche bewirkt eine mit der Frequenz wechselnde Aufladung der relativ hochohmigen Körperbehaarung. Dadurch wird eine Vibration des Haarschaftes angeregt, die über die Berührungsrezeptoren in der Haut registriert wird. Im Wesentlichen führen niederfrequente elektrische Felder zu elektrischen Strömen an der Körperoberfläche, was bei hohen Feldstärken zu einer direkten Stimulation von peripheren Rezeptoren in der Haut führen kann. Zudem treten starke Feldüberhöhungen an der Körperoberfläche vor allem im Kopfbereich auf. Durch elektrische Ausgleichsvorgänge zwischen Kleidung und Haut kann ein wahrnehmbares Kribbeln auftreten. Wirken magnetische Felder auf den Menschen ein, kommt es im Organismus zur Induktion von Wirbelströmen, die bei Überschreitung bestimmter Schwellenwerte Nerven- und Muskelzellen erregen können.

Im Alltag ergibt sich die Exposition der Bevölkerung im niederfrequenten Bereich hauptsächlich aus den elektrischen und magnetischen Feldern, die durch die Stromversorgung (50 Hz) und elektrifizierte Verkehrssysteme wie Eisenbahnen (16 $\frac{2}{3}$ Hz) entstehen.

In der 26. BImSchV (26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes; Verordnung über elektromagnetische Felder; gültig seit 1. Januar 1997) sind die Grenzwerte für feststehende Niederfrequenzanlagen geregelt (Tabelle 2-1). Danach ist bei 50 Hz-Feldern der Wert der magnetischen Flussdichte auf 100 μT begrenzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nach dem etablierten Strom-Dichte-Modell der WHO von 1987 durch den physikalischen Mechanismus der Induktion bei 100 μT im menschlichen Körper eine Stromdichte von etwa 2 mA/m^2 entsteht. Bei diesem Wert, der der endogenen (natürlichen, körpereigenen) Stromdichte entspricht, gibt es keinen wissenschaftlichen Nachweis für biologische Wirkungen. Gesundheitsrelevante Wirkungen niederfrequenter Felder sind erst bei einer Stromdichte von über 100 mA/m^2 bekannt.

Tabelle 2-1 Grenzwerte für feststehende Niederfrequenzanlagen (26. BImSchV)
(Limit values for fixed low frequency installations - 26th BImSchV)

Frequenzbereich	elektrische Feldstärke (kV/m)	magnetische Flussdichte (μ T)
16 2/3 Hz	10	300
50 Hz	5	100

In der Öffentlichkeit wird kontrovers diskutiert, ob niederfrequente Felder bei chronischer Exposition zu Erkrankungen wie Krebs führen. Vor allem der Zusammenhang zwischen der Exposition durch niederfrequente Magnetfelder und einem erhöhten Leukämierisiko für Kinder steht hier im Vordergrund. Eine Voraussetzung für die Entstehung von Krebs ist die Schädigung des Erbguts, der DNS. Substanzen, die solche Schäden hervorrufen, bezeichnet man als genotoxisch. Nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft wirken niederfrequente Felder nicht genotoxisch. In zahlreichen Zell- und Tierstudien wurde untersucht, ob niederfrequente Magnetfelder einen indirekten Einfluss auf den Verlauf (Promotion) von Krebserkrankungen haben, indem sie Schädigungen der DNS begünstigen oder die Entwicklung der Krankheit beschleunigen. Die Bewertung der Studien ergibt, dass bislang kein solcher Einfluss nachgewiesen werden kann.

Im Jahr 2001 wurde eine epidemiologische Studie vorgestellt, die einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen einer erhöhten nächtlichen Magnetfeldexposition von $> 0,4 \mu\text{T}$ bei 50 Hz und dem Auftreten von kindlicher Leukämie zeigte (sog. Michaelis-Studie). Dieser Wert wurde in nur 0,6 % der Leukämiefälle (3 von 514 in die Studie aufgenommene, an Leukämie erkrankte Kinder) und in 0,2 % der Personen in der Vergleichsgruppe (3 von 1301 nicht erkrankter Kinder) erreicht. Falls eine erhöhte Magnetfeldexposition tatsächlich eine der möglichen Ursachen für diese Krankheit ist, könnte dieser Zusammenhang bei etwa 1 % der kindlichen Leukämiefälle eine Rolle spielen.

Die Ergebnisse dieser und anderer epidemiologischer Studien über einen möglichen Zusammenhang zwischen Krebs und einer Magnetfeldexposition sind als wissenschaftlich begründeter Verdacht zu werten und erfordern eine intensive Suche nach möglichen Zusammenhängen.

Im Rahmen einer Studie, die im Zeitraum von Mai 1996 bis Juni 1997 zur "Erfassung der niederfrequenten magnetischen Exposition der Bürger in Bayern" im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen durchgeführt wurde, zeigte sich, dass bei 24 h-Messungen für das magnetische Feld bei 50 Hz ein arithmetischer Mittelwert für alle untersuchten Personen von nur $0,101 \mu\text{T}$ und ein Medianwert von nur $0,047 \mu\text{T}$ erreicht werden (Tab. 2.-2). Es ergab sich weiterhin aus der Studie, dass die nächtliche Exposition auffällig höher lag, wenn sich das Messgerät in unmittelbarer Nähe z. B. eines Radioweckers befand. Aber auch in solchen Fällen wurde ein relativ geringer Medianwert von nur $0,146 \mu\text{T}$ erreicht (nicht in Tab. 2.-2 aufgeführt).

Tabelle 2-2 Magnetfeldexpositionen für die allgemeine Bevölkerung (repräsentativ für die Siedlungsstruktur in Bayern) auf Grund der 50 Hz Stromversorgung
(Magnetic field exposures to the general public - representative for the structure of settlement in Bavaria - due to 50 Hz current supply)

Dauer bzw. Ort der Exposition	Anzahl Personen	Magnetische Flussdichte (μT)		
		Mittelwert	Median	95 % Perzentil
24 h-Exposition	1.952	0,101	0,047	0,308
Exposition im Haus	1.941	0,090	0,063	0,215
Exposition während der Nacht	1.926	0,095	0,092	0,144
Großstadt, 24 h	370	0,115	0,061	0,314
ländlich, 24 h	432	0,077	0,035	0,261
Einfamilienhaus	1.227	0,092	0,059	0,218
Hochhaus	51	0,097	0,076	0,116
24 h Daten: im Büro Tätige	624	0,107	0,049	0,338
Handwerker/Arbeiter	148	0,166	0,049	0,628
nicht Erwerbstätige	922	0,093	0,046	0,258
direkte Nähe zu 16 2/3 Hz Oberleitungen	190	0,156	0,102	0,436

Individuelle Personenmessung, arithmetischer Mittelwert über sekundliche Messungen, Median = 50 % Perzentil

Alle Werte liegen Größenordnungen unterhalb der Grenzwerte der 26. BImSchV (s. Tab. 2-1). Eine Überschreitung des Grenzwertes wurde nur kurzzeitig, hauptsächlich während der Arbeit mit Maschinen beobachtet.

Die Ergebnisse der bayrischen Studie zeigen, dass die tatsächliche Exposition der Bevölkerung im Mittel unter $0,2 \mu\text{T}$ liegt, so dass eine dauerhafte Exposition in der Nacht mit $0,4 \mu\text{T}$ und mehr, wie in der Michaelis-Studie angegeben, ein eher seltenes Ereignis darstellt.

3. Hochfrequente Felder (High frequency fields)

Hochfrequente elektromagnetische Felder ($>30 \text{ kHz} - 300 \text{ GHz}$) kommen in unserem Alltag hauptsächlich bei Anwendungen vor, die zur drahtlosen Informationsübertragung bei Radio, Funk oder Fernsehen verwendet werden. Diese Felder dringen, abhängig von der Frequenz, unterschiedlich tief in das Gewebe ein und verursachen eine Erwärmung (thermischer Effekt). In der Medizin wird dies z. B. bei der Kurzwellenerwärmung zu Therapiezwecken ausgenutzt.

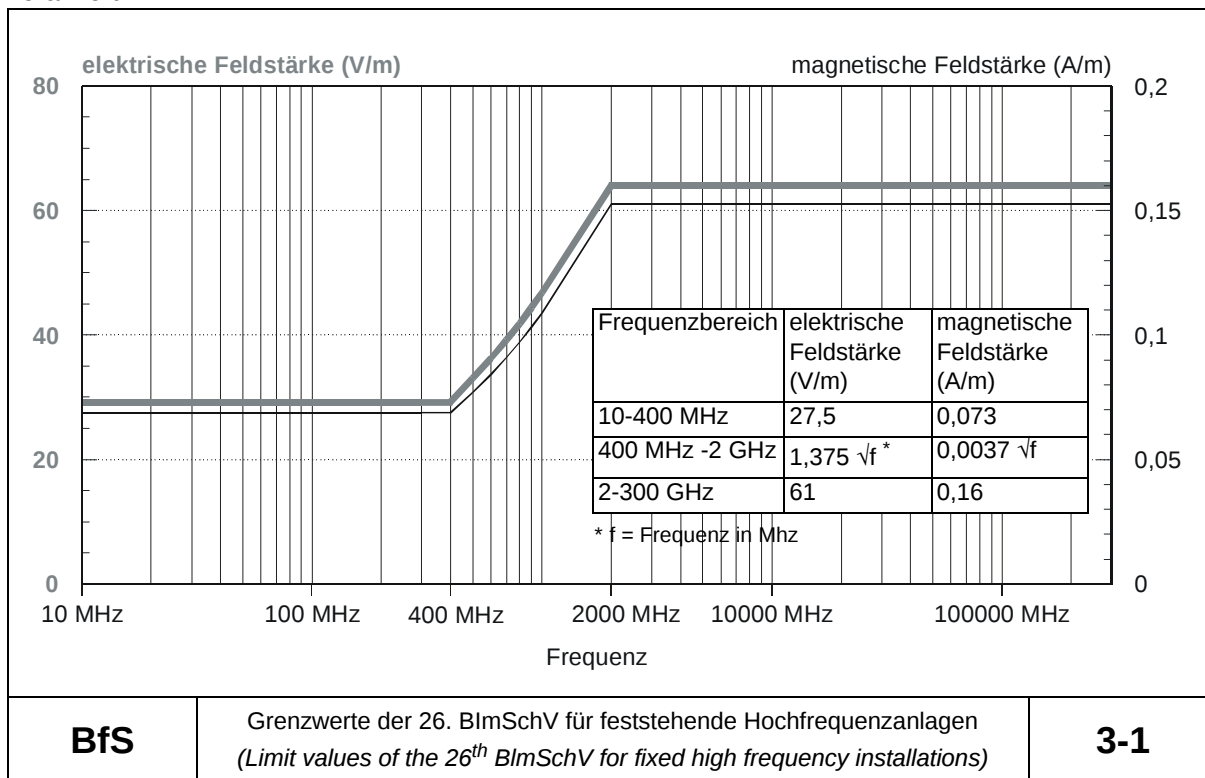
Bei der bereits erwähnten medizinischen Diagnosemethode NMR werden hochfrequente Felder zur Anregung des Kernspin-Systems benötigt. Derzeit werden in der klinischen Praxis Hochfrequenzfelder mit 10 MHz bis 85 MHz eingesetzt. Die Abstrahlung dieser Felder erfolgt gepulst. Die vom Körper des Patienten absorbierte Energie kann nur im Mittel abgeschätzt werden, da auf Grund der komplexen Verhältnisse zwischen Körper und Gerät keine genauen Vorhersagen der Energieabsorption durch Berechnungen, Simulationen oder anhand von Phantomen möglich ist.

Parameter für Maßnahmen zum Schutz vor hochfrequenten elektromagnetischen Feldern ist die Gewebeerwärmung. Erst bei einer Erhöhung der Körpertemperatur um deutlich mehr als 1°C konnten in wissenschaftlichen Untersuchungen gesundheitlich bedeutende Beeinträchtigungen beobachtet werden.

Die Absorption von Energie im Gewebe auf Grund der Hochfrequenzstrahlung wird durch die spezifische Absorptionsrate (SAR) beschrieben. Sie gibt an, welche Leistung pro Kilogramm Körpergewebe (W/kg) aufgenommen wird und bestimmt die Temperaturerhöhung. International wird eine zulässige Belastung der Bevölkerung von max. $0,08 \text{ W/kg}$, gemittelt über den ganzen Körper, empfohlen. Beim Telefonieren mit Handys wird vor allem der Kopf den Hochfrequenzfeldern ausgesetzt. Da bei einer solchen Teilkörperexposition hohe lokale Werte der SAR auftreten können, während die SAR für den gesamten Körper kaum erhöht ist, wurden zusätzlich Teilkörpergrenzwerte festgelegt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass vor allem die Blutzirkulation einen raschen Temperatúrausgleich bewirkt, beträgt der empfohlene Teilkör-

pergrenzwert für den Kopf 2 W/kg (gemittelt über 10 g Gewebe und 6 min). Damit werden nach dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand nachgewiesene gesundheitliche Gefahren ausgeschlossen.

Aus den zulässigen SAR-Werten können die maximal zugelassenen Feldstärkewerte z. B. in der Umgebung von Mobilfunksendeanlagen abgeleitet werden. Diese sind rechtlich in der 26. BImSchV (Abb. 3-1) verankert.



Die Einhaltung dieser Grenzwerte wird in einem Anzeigeverfahren zur Erteilung der Standortbescheinigung durch die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (RegTP) nach telekommunikationsrechtlichen Vorschriften überprüft. 10 % der im Rahmen des Bescheinigungsverfahrens neu erfassten Standorte werden einer stichprobenartigen Nachprüfung unterzogen. Es wird somit nicht nur vor der Inbetriebnahme, sondern auch während des Betriebes die Gewährleistung des Schutzes von Personen in elektromagnetischen Feldern überprüft. Laut dem Bericht der RegTP vom Dezember 2001 wurden im Jahr 2000 1409 Nachüberprüfungen durchgeführt mit dem Ergebnis, dass an keinem Standort eine Überschreitung der Personenschutzgrenzwerte auftrat [1].

Während der thermische Effekt unumstritten ist, werden die sog. nichtthermischen Effekte von Hochfrequenzfeldern kontrovers diskutiert. Darunter versteht man Effekte, die nicht mit einer Erwärmung erklärt werden können. Verschiedene nicht-thermische Effekte wie z. B. Veränderungen in der Ionenpermeabilität der Zellmembranen wurden an einzelnen Zellen und Zellkulturen beschrieben. Bislang kann diesen Effekten jedoch weder ein Wirkungsmechanismus noch eine gesundheitliche Relevanz zugeordnet werden. Sie machen aber deutlich, dass wissenschaftlich nicht erklärte Wirkungsmechanismen dieser Felder existieren können. Das heißt, dass es Risiken geben könnte, die bisher noch nicht nachgewiesen sind. Die Notwendigkeit zur Vorsorge ist also eine Folge des sich ständig fortentwickelnden Erkenntnisstandes. Das Bundesamt für Strahlenschutz setzt sich für die Umsetzung eines Vorsorgepaketes ein, das folgende Maßnahmen umfasst: Sicherstellung einer möglichst geringen Exposition durch den Mobilfunk, Information der Bevölkerung und Initiierung von Forschung.

Literatur

- [1] Tätigkeitsbericht 2000/2001 der Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post.
Bericht nach § 81, Abs.1 Telekommunikationsgesetz und § 47, Abs. 1, Postgesetz, Bonn, 2001

4. Optische Strahlung (Optical radiation)

Zum Bereich der optischen Strahlung gehört die biologisch hochwirksame ultraviolette (UV-) Strahlung. Die UV-Strahlung gliedert sich in den UV-A (320 – 400 nm), UV-B (280 – 320 nm) und UV-C (200 – 280 nm) Anteil.

Die Intensität der Sonne ist selbst in unseren Breitengraden im Sommer ausreichend hoch, um die Gesundheit des Menschen zu beeinträchtigen. Auf Grund der geringen Eindringtiefe sind vor allem die Haut und die Augen betroffen. Akute Wirkungen der UV-Exposition umfassen vor allem Erytheme (Sonnenbrand) der Haut und Photokeratitis (lichtinduzierte Hornhautentzündung) des Auges. Zu den chronischen Wirkungen zählen der Katarakt (Linsentrübung) des Auges, frühzeitige Hautalterung und Hautkrebs.

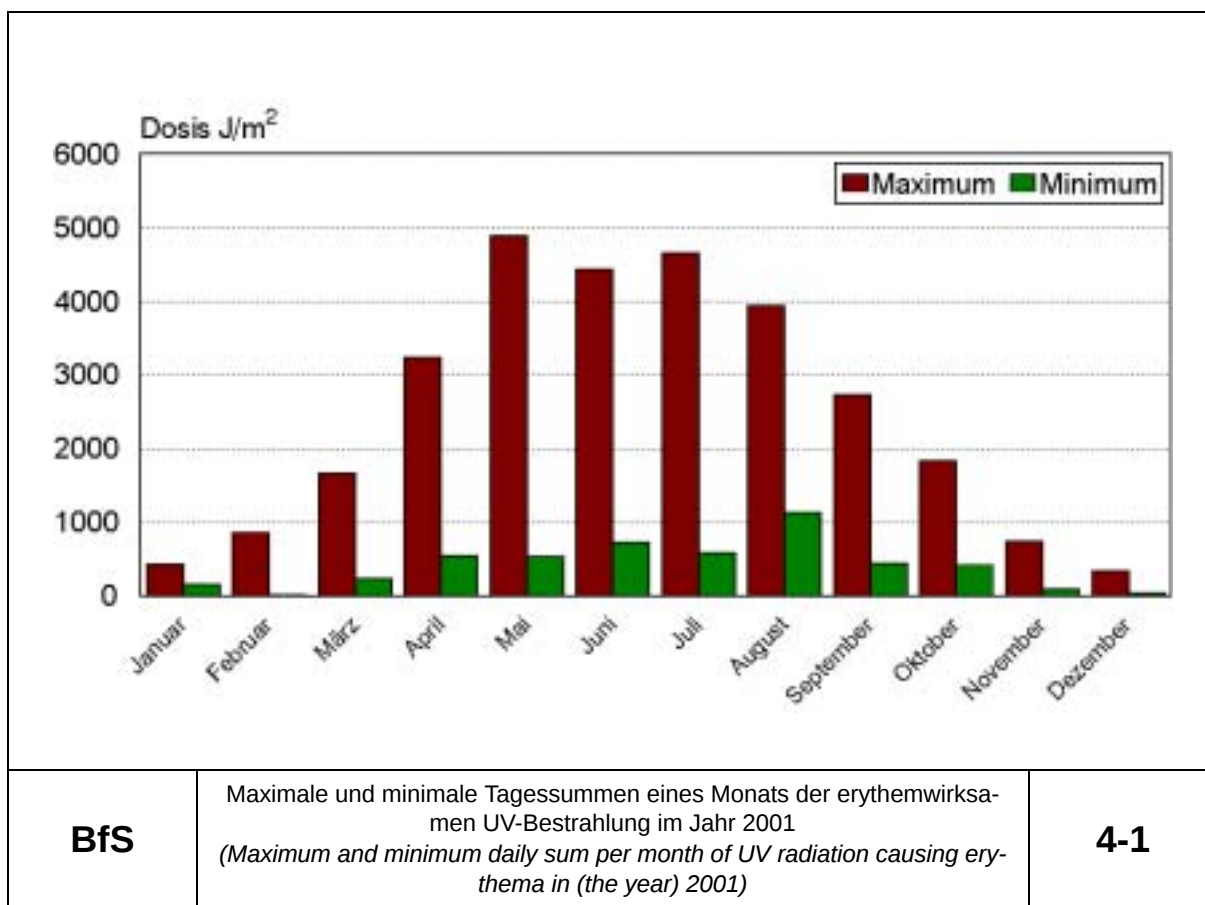
Diese Wirkungen der UV-Strahlung sind stark wellenlängenabhängig (je kürzer die Wellenlänge, desto höher die biologische Wirkung), jedoch für die Bräunung (Melanese), für die Lichtentzündung (Erythembildung), für die Erzeugung von Hautkrebs (Karzinogenese) sowie für die vorzeitige Hautalterung (Elastose) sehr ähnlich. Daher kann keine Bestrahlung eine einzige gewünschte Wirkung allein erzeugen, ohne gleichzeitig auch die anderen Effekte zu verursachen.

Vor allem infolge eines geänderten Freizeit- und Sozialverhaltens ist die Hautkrebsinzidenz deutlich steigend. Das Risiko, an einem Hautkrebs zu erkranken, hängt hauptsächlich von den persönlichen Gewohnheiten bezüglich der Sonnenexposition ab. Bei Basal- und Stachelzellkarzinomen gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen solarer UV-Exposition und Krebsentstehung. Beim malignen Melanom ist dieser noch nicht eindeutig nachgewiesen. Die Inzidenz für Basalzellkarzinome ist steigend. In Deutschland werden zur Zeit Neuerkrankungen bei ca. 60 Frauen und bei ca. 90 Männern pro 100.000 Einwohner pro Jahr registriert. Die Sterblichkeitsrate liegt bei <1%.

Um die UV-Strahlung der Sonne kontinuierlich erfassen und strahlenhygienisch bewerten zu können, wird vom Bundesamt für Strahlenschutz gemeinsam mit dem Umweltbundesamt und weiteren staatlichen und universitären Institutionen an neun repräsentativen Standorten in Deutschland die bodennahe solare UV-Strahlung kontinuierlich und spektral aufgelöst gemessen (solares UV-Monitoring). Die Messdaten werden in der Messnetzzentrale in München strahlenhygienisch bewertet, dokumentiert und regelmäßig unter <http://www.bfs.de> veröffentlicht.

In Abbildung 4-1 werden die maximalen und minimalen Tagessummen der erythemwirksamen Bestrahlung pro Monat im Jahr 2001 für die Station München dargestellt. Im Mai 2001 wurde ein Wert von annähernd 5000 J/m² erreicht. Dies bedeutet, dass z. B. Menschen mit Hauttyp II (bei blondhaarigen Menschen mit blauen oder grünen Augen), die ungeschützt bei einer Exposition von 250 J/m² einen Sonnenbrand bekommen, hier bereits bei einem zwanzigstel der Tagesdosis gefährdet sind.

Statistische Auswertungen der bisherigen Messdaten lassen auf einen leichten Anstieg der UV-Strahlung schließen, ein ozonbedingter Effekt kann jedoch auf Grund der vielfältigen Einflussgrößen nicht sicher nachgewiesen werden.



5. Aktuelle Themen (Actual topics)

Das Thema "Elektromog" und dabei insbesondere die möglichen gesundheitlichen Auswirkungen des Mobilfunks fanden im Jahr 2001 großes öffentliches Interesse. Die Forschung zu den umstrittenen Fragen der Wirkungen elektromagnetischer Felder stand 2001 im Mittelpunkt eines Fachgesprächs des Bundesamtes für Strahlenschutz. Es wurde beschlossen, dass die Forschung auf dem Gebiet verstärkt werden soll. Im Rahmen des Umweltforschungsplans (UFO-Plan) werden für die Jahre 2002 bis 2005 vom Bundesamt für Strahlenschutz Forschungsvorhaben im Bereich Dosimetrie hochfrequenter elektromagnetischer Felder, biologische Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Zellen und Tiere, Einfluss dieser Felder auf den Verlauf von Krebs am Beispiel Leukämie und epidemiologische Studien in Bezug auf elektrosensible Personen und Risikokommunikation vergeben.

Abgesehen vom Mobilfunk wurde in der Öffentlichkeit auch die Frage diskutiert, inwieweit hochfrequente elektromagnetische Strahlung Ursache für Krebserkrankungen von Bundeswehrsoldaten sein kann, die jahrelang militärische Radargeräte bedient und gewartet hatten. Da bislang eine genotoxische Wirkung der Hochfrequenzstrahlung nicht belegt werden konnte, ist ein Auslösen von Krebserkrankungen durch Mikrowellenexposition sehr unwahrscheinlich. Bei sehr starken Radarsendern, wie sie z. B. in der Flugsicherung eingesetzt werden, wird im Inneren Röntgenstrahlung, also ionisierende Strahlung, erzeugt. Eine Strahlenexposition, insbesondere in einer Höhe, die zur Auslösung einer Krebserkrankung führen kann, ist bei diesen Störstrahlern nur dann möglich, wenn unter Missachtung einschlägiger Vorschriften bei geöffnetem Schutzgehäuse gearbeitet wird (siehe dazu Abschnitt A, Teil III-3. Strahlenexposition bei Radargeräte-Personal).