

Was macht eine Strahlung zur bedrohlichen Strahlung: Ein Vergleich der UV-Strahlung im Sonnenlicht mit radioaktiver bzw. ionisierender Strahlung

Bernd Laquai 14.3.2025

Wer sich über längere Zeit deutlich erhöhter radioaktiver Strahlung aussetzt, kann an Krebs erkranken. Diese Erkenntnis steht mittlerweile wissenschaftlich fest. Oft manifestiert sich eine solche Krebserkrankung erst etliche Jahre nach der übermäßigen Exposition gegenüber der radioaktiven Strahlung. Man bezeichnet diese Erkrankung daher als Spätfolge der Exposition. Das Phänomen der strahlungsinduzierten Krebsinzidenz haben die Wissenschaftler aber nicht nur bei radioaktiver Strahlung, sondern auch bei der Sonnenstrahlung infolge des ultravioletten Strahlungsanteils festgestellt. Wenn sich beispielsweise Menschen in ihrer Jugend im Freibad oder bei anderen Aktivitäten im Freien häufig einen Sonnenbrand geholt haben, dann steigt die Wahrscheinlichkeit im Erwachsenenalter an Hautkrebs zu erkranken sehr deutlich. Bei UV-strahlungsbedingtem Hautkrebs ist die Latenzzeit bis Spätfolgen eintreten relativ lang und wird mit 25-40 Jahren angegeben. Es ist aber umgekehrt nicht so, dass jeder Mensch, der als Kind einige Sonnenbrände bekommen hat, im Erwachsenenalter auch automatisch an Hautkrebs erkrankt. Und genauso muss nicht jeder, der sich einer intensiven radioaktiven Strahlung ausgesetzt hat, mit einer Krebserkrankung rechnen. Vielmehr geht es um die Zunahme von Wahrscheinlichkeiten, die man aus der Häufigkeit des Auftretens einer Krebserkrankung bei einer sehr großen untersuchten Personengruppe ausrechnet.

Zudem ist es bei der UV-Strahlung ähnlich wie bei der radioaktiven Strahlung oder auch bei der Röntgenstrahlung, dass wenn Menschen längere Zeit einer sehr intensiven Strahlung des jeweiligen Typs ausgesetzt waren, sich relativ kurzfristig, je nach Intensität auch rein äußerlich Veränderungen zeigen, wie beispielsweise eine starke Rötung der Haut (Erythem), sowie bei sehr intensiver Bestrahlung Hautjucken, Blasenbildung bzw. verbrennungsähnliche Veränderungen. Während man bei zu intensiver UV-Bestrahlung lediglich Veränderungen der Haut feststellen kann, sind bei sehr intensiver Röntgen- oder radioaktiver Bestrahlung Gewebe-Veränderungen nicht nur auf die Haut beschränkt, sondern sind auch am Gewebe im Innern des Körpers möglich. Allerdings wird die Spontanreaktion in Form eines Sonnenbrands von den Menschen eher als harmlos wahrgenommen im Vergleich zu der Vorstellung einer radioaktiven Strahlung ausgesetzt gewesen zu sein, selbst dann, wenn bei der radioaktiven Strahlung noch keinerlei Symptome erkennbar waren. Die Spätfolgen der UV-Bestrahlung z.B. die Hautalterung oder gar Hautkrebs wird infolge der langen Latenzzeit von 25-40 Jahren vor allem von jungen Menschen eher wenig wahrgenommen oder gar völlig ignoriert.

Bevor aber Schäden in den Zellen entstehen können, muss eine krebserzeugende Strahlung erst in das Gewebe eindringen können. Bei der Fähigkeit, im Falle einer Bestrahlung von außen in das Gewebe eindringen zu können, unterscheiden sich die unterschiedlichen Typen der energiereichen bzw. der ionisierenden Strahlung erheblich. Das hat mit der Absorption der unterschiedlichen Strahlungstypen zu tun. Während die Röntgenstrahlung oder die radioaktive Gammastrahlung je nach Energie den Körper bzw. das Gewebe mehr oder weniger leicht durchdringen kann, weil diese beiden Strahlungsarten auf Grund der geringen Wechselwirkung nur wenig absorbiert werden, ist die Eindringtiefe für UV-Strahlung in die normale Haut nicht sehr hoch, da es zu einer starken Wechselwirkung und damit zu einer starken Absorption in der oberen Hautschicht kommt. Das liegt daran, dass die Energie der UV-Strahlung im Verhältnis zur Röntgen- und radioaktiven Gammastrahlung deutlich geringer ist. Daher findet man als Spätfolge von zu intensiver UV-Bestrahlung eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit für eine Krebserkrankung nur im Bereich der Haut und nicht an den inneren Organen. Allerdings muss man dazu sagen, dass ein Hautkrebs zwar in der Haut entsteht, bei schweren

Verläufen dann aber z.B. das ganze Lymphsystem befällt oder in innere Organe aussiedelt (Bildung von Metastasen) und somit genauso tödlich enden kann wie eine Krebserkrankung, die in inneren Organen beginnt. Es gibt bei einer wiederholten bzw. dauerhaft intensiven UV-Bestrahlung der normalen Haut zudem auch noch weitere Spätschäden neben der Krebsinzidenz, z.B. eine starke Hautalterung (Zersetzung der kollagenen Fasern, Faltenbildung, starke Pigmentierung, „Photoaging“). Die Augenlinse stellt schließlich noch eine besondere Ausnahme dar, denn sie erlaubt ein tieferes Eindringen der UV-Strahlung ins Auge, so dass die Augen besonders gefährdet sind und entsprechend besser geschützt werden müssen. In der Augenlinse taucht durch die Einwirkung energiereicher Strahlung (insbesondere auch durch UV-Strahlung) nach einer gewissen Latenzzeit ein Trübungseffekt auf (radiogene Linsentrübung, Katarakt).

Was die Durchdringungsfähigkeit von Geweben durch die radioaktive Alpha- und Betastrahlung anbelangt, muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass diese beiden Strahlungstypen eine Teilchenstrahlung darstellen, die sich beim Eindringvorgang ganz anders verhalten als elektromagnetische Strahlung (UV-, Röntgen- und Gammastrahlung). Man kann aber pauschal sagen, dass Alpha-Strahlung die oberste Hornschicht der Haut nicht durchdringen kann und daher bei äußerer Bestrahlung kaum schädigend wirkt. Die radioaktive Beta-Strahlung jedoch kann je nach Energie mehr oder weniger tief in die Haut eindringen, ihre Reichweite im Gewebe liegt im Millimeter-Bereich. Sie kann daher bei äußerer Bestrahlung, genau wie bei der UV-Strahlung Hautkrebs erzeugen, die inneren Organe werden in der Regel nur wenig geschädigt.

Um die schädigende Wirkung der UV-Strahlung auch im Vergleich zur radioaktiven Strahlung richtig einschätzen zu können, muss zuallererst der Energiebegriff geklärt werden. Dazu muss man sich zunächst das Spektrum der elektromagnetischen Wellen über der Frequenz, der Wellenlänge und der sogenannten Photonenenergie anschauen, für die dann auch noch unterschiedliche physikalische Maßeinheiten benutzt werden.

Elektromagnetische Wellen werden bei Funkanwendungen wie dem Rundfunk und dem Mobilfunk typischerweise anhand der Frequenz klassifiziert, damit gemeint ist die Anzahl Schwingungen, welche die elektrischen und magnetischen Felder, die untereinander verkoppelt sind, an einer Stelle im Raum ausführen. Dabei geht die Skala der Frequenzen üblicherweise von Kilohertz (Langwellen, Mittelwellen) über Megahertz (Kurz- und Ultrakurzwellen), Gigahertz (Mikrowellen) bis neuerdings zu Terahertz. Die meisten Mobilfunkbänder sowie das WLAN-Netz liegen im Gigahertzbereich. Bei den elektromagnetischen Wellen für Funkanwendungen kann man bereits starke Unterschiede bei der Durchdringungsfähigkeit von Materie erkennen. Während Rundfunkwellen im Bereich von Kilo- und Megahertz eine hohe Durchdringungskraft haben, nimmt diese zum Gigahertz Bereich hin stark ab. Die Reichweite von Terahertzwellen liegt im Millimeterbereich, sie werden beispielsweise in Sicherheits-Bodyscannern eingesetzt um nur die Kleidung, nicht aber den Körper zu durchleuchten. Bei Frequenzen oberhalb der Terahertz-Strahlung, zum Beispiel bei Infrarot-, sichtbarem und UV-Licht benutzt man dann die Wellenlänge der Strahlung zur Klassifizierung. Sie beschreibt welchen Weg eine elektromagnetische Welle zwischen zwei Schwingungsmaxima im freien Raum (oder seltener in einem festen Isolator) zurücklegt, sie ist umgekehrt proportional zur Frequenz. Dabei entspricht die Frequenz von 1Gigahertz (1 Milliarde Schwingungen pro Sekunde) im freien Raum der Wellenlänge von 300mm.

Ab einer Frequenz von 30Terahertz also etwa 10um Wellenlänge kann der Mensch eine Erwärmung oder Abkühlung gegenüber der Körpertemperatur mit den Kälte- und Wärmerezeptoren in der Haut wahrnehmen. Bei 60°C strahlt ein schwarzer Körper eine elektromagnetische Strahlung mit einer mittleren Wellenlänge von etwa 10um ab (Wärmestrahlung, bzw. Infrarotstrahlung), welche die Haut sogar aus einer Distanz und durch ein Vakuum hindurch so erwärmen kann, dass man die Wärmestrahlung mit den Kälte- und Wärme-Rezeptoren in der Haut spürt, das kann man an der

Wärmestrahlung der Sonne leicht erkennen. Als Wärmestrahlung oder Infrarotstrahlung bezeichnet man elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von 1mm (0.3THz) bis ca. 0.8µm (375THz). Ab 800nm Wellenlänge kann der Mensch die elektromagnetische Strahlung schließlich mit den Augen wahrnehmen (Farbe Rot), dann redet man von sichtbarem Licht. Bei etwa 380nm (Violett) endet diese Fähigkeit der körpereigenen Wahrnehmung wieder. Für noch kleinere Wellenlängen beginnt der Ultraviolett-Bereich des Lichts. Er reicht von einer Wellenlänge von 400nm (UV-A) bis herunter zu 100nm (UV-C). Technisch wichtig (für die Microchip-herstellung) ist noch die Extreme-UV (bzw. Vakuum-UV) Strahlung zwischen 100nm und 1nm, die manchmal auch als sanfte Röntgenstrahlung bezeichnet wird.

Im Weltall enthält das Sonnenlicht nicht nur infrarotes, sichtbares und UV-Licht, sondern auch noch Röntgenstrahlung. Röntgenstrahlung sagt man zu elektromagnetischer Strahlung, wenn sie weniger als 100nm Wellenlänge hat. Die EUV-Strahlung reicht demnach in den Bereich der Röntgenstrahlung hinein. Bei diesen Wellenlängen sind daher die Bezeichnungen nicht mehr so ganz eindeutig. Die UV-C-Strahlung und die natürliche Röntgenstrahlung im Sonnenlicht werden aber durch die Erdatmosphäre fast vollständig herausgefiltert, so dass sie an der Erdoberfläche nicht mehr relevant sind.

Mit der Röntgenstrahlung beginnend verwendet man dann vorwiegend eine Klassifizierung über die Energie und verwendet den Begriff der Wellenlänge nur noch selten. Da man die Röntgenstrahlung technisch durch Beschleunigung von Elektronen in der Röntgenröhre erzeugt, benutzt man zur Klassifikation der Röntgenstrahlung die Beschleunigungsenergie bei der Erzeugung. Sie entspricht damit physikalisch gesehen direkt einer physikalischen Energieform. Die Energie in der Einheit Joule (bzw. Watt* Sekunde) kann man mit Hilfe der Elementarladung e der Elektronen aus der Beschleunigungsspannung ausrechnen ($E = Q \cdot U = e \cdot U$). Deswegen setzt man die Elementarladung e der Beschleunigungsspannung U in Volt voran und bildet so die Pseudoeinheit eV, die welche die Beschleunigungsenergie der Elektronen darstellt. Diese Energie wird bei jeder höherenergetischen elektromagnetischen Strahlung in Anlehnung an das Licht auch als Photonen-Energie bezeichnet, selbst wenn die Strahlung nicht mehr sichtbar ist. Sie ist dann wieder proportional zur Frequenz und umgekehrt proportional zur Wellenlänge. Eine Wellenlänge von 1nm entspricht dabei einer Beschleunigungsspannung von 1240eV. Ein normales, medizinisches Röntgengerät arbeitet bei einer Beschleunigungsspannung von etwa 70keV, was einer Wellenlänge von 0.018nm entspricht. Bei dieser Energie beginnt in etwa auch die natürliche radioaktive Gammastrahlung, die beim Zerfall von instabilen Atomkernen entsteht (Th₂₃₄ im natürlichen Uran bei 63keV). Man kann sie bis zu einigen MeV Energie auch an natürlichen Elementen auf der Erde nachweisen und bis zu einigen Tera-Elektronenvolt im Weltall. Beide, die Röntgenstrahlung und die radioaktive Gammastrahlung haben wieder ein hohes Durchdringungsvermögen durch Materie und können auch meterdicken Beton durchdringen im Vergleich zum Licht. Das Durchdringungsvermögen einer Strahlung hängt also nicht alleine mit der Frequenz, Wellenlänge oder Energie zusammen.

Zur Klassifikation der radioaktiven Alpha- und Betastrahlung verwendet man ebenfalls die Energie-Einheit eV. Sie beschreibt hier aber die Energie der Teilchen, die beim jeweiligen Zerfall aus dem Atomkern herausgeschleudert werden. Bei der Betastrahlung sind diese Teilchen Elektronen und bei Alphastrahlung doppelt positiv Heliumkerne. So gesehen kann man sich die Elektronenvolt-Angabe hier als die theoretische Beschleunigungsenergie solcher Teilchen in einem elektrischen Feld vorstellen.

Bei der Beurteilung der Energie einer elektromagnetischen Strahlung muss man nun auch noch ein weiteres Phänomen berücksichtigen, das Max Planck entdeckt hat. Man nimmt normalerweise den Strahlungsfluss von elektromagnetischer Strahlung wie zum Beispiel sichtbarem Licht als eine kontinuierliche Größe wahr. So „fließt“ beispielsweise die Energie des Sonnenlichts als kontinuierlicher Energiefluss durch das Weltall und durch die Erdatmosphäre hindurch und wird zum Beispiel in einem

Solarmodul auf einem Hausdach absorbiert und in elektrische Energie pro Zeiteinheit (elektrische Leistung) in Form eines kontinuierlichen elektrischen Stroms bei einer gewissen Spannung umgewandelt. Max Planck hat jedoch festgestellt, dass dieser Fluss an elektromagnetischer Strahlung, z.B. durch das Weltall, nicht wirklich kontinuierlich ist, sondern aus kleinen Strahlungspaketen besteht, die man Strahlungsquanten genannt hat. Das Geschehen ist daher vergleichbar zum kontinuierlichen elektrischen Strom, der eigentlich aus Elektronen besteht, Teilchen also, die wiederum kleine Ladungsmengen (die Elementarladung) tragen. Nur die Tatsache, dass es z.B. beim Sonnenlicht so viele Strahlungspakete (Quanten) pro Sekunde sind, die man nicht unterscheidbar wahrnehmen kann, ergibt den Eindruck einer kontinuierlich fließenden Größe, ähnlich wie beim elektrischen Strom oder wie bei Wasser-Tröpfchen, die in einem großen Fluss zu einem Wasserstrom verschmelzen. Und so wie man beim Wasserstrahlschneiden mit einem dünnen Wasserstrahl unter hohem Druck Stahlbleche durchtrennen kann, obwohl dabei viel weniger Wasser durch die Düse fließt, als durch das riesige Flussbett eines gemächlich dahinfließenden großen Stroms wie dem Amazonas, können auch Strahlenquanten, z.B. die einer Röntgenröhre, eine so hohe Energie haben, dass sie das Gewebe massiv schädigen oder ganz vernichten können, selbst wenn der Gesamtstrom an Strahlungsquanten viel, viel kleiner ist, als beispielsweise der Lichtstrom des sichtbaren Lichts von der Sonne zur Erde. Das wichtige Kriterium, ob ganz grundsätzlich ein Schaden durch Strahlung eintreten kann, entscheidet sich also an der Energie der einzelnen Strahlungsquanten und weniger an der Größe des Strahlungsflusses selbst.

Und nun hat Max Planck auch noch die Umrechnung geliefert, wie man aus der Frequenz einer elektromagnetischen Strahlung die Energie der Strahlungsquanten berechnen kann. Er hat gezeigt, dass die Energie zur Frequenz ganz einfach proportional ist, sich also nach $E = h \cdot f$ berechnet, wenn E die Energie und f die Frequenz ist. Die Proportionalitätskonstante h heißt ihm zu Ehren Planck'sches Wirkungsquantum. Für die Wellenlänge λ der Strahlung gilt: $\lambda = c/f$, wenn c die Lichtgeschwindigkeit ist. Damit stellen alle drei Größen, Frequenz, Wellenlänge und die Beschleunigungsenergie Elektronenvolt, eine völlig äquivalente Möglichkeit dar, die Energie von Strahlungsquanten einer bestimmten Strahlung zu beschreiben und zur Klassifizierung heranzuziehen.

Der Ablauf einer Schädigung von Gewebe durch ionisierende Strahlung ist sehr komplex und sicher auch noch nicht vollumfänglich verstanden. Bei der Untersuchung der Ursachen für die Strahlenschädigung durch die radioaktive Strahlung beim Zerfall instabiler Atome hat man zunächst festgestellt, dass diese ursächlich mit der Fähigkeit einer solchen Strahlung zusammenhängt aus Atomen und Molekülen Elektronen herauszuschlagen (sowohl bei der elektromagnetischen wie bei der Teilchenstrahlung). Diesen Vorgang nennt man Ionisation und die Strahlung, welche diesen Vorgang auslöst ionisierende Strahlung. Die Fähigkeit der Ionisation von Atomen und Molekülen hat die elektromagnetische Strahlung eines Mobiltelefons oder eines Radiosenders, oder auch die Wärmestrahlung z.B. eines großen Holzfeuers (thermische Strahlung) beispielsweise nicht, da deren Energie zu gering ist.

Wenn Atome oder Moleküle durch die Ionisation einzelne Elektronen aus ihrer Hülle verlieren, sind sie nicht mehr elektrisch neutral, sondern tragen eine elektrische Ladung und werden damit zu Ionen. Daraus leitet sich der Begriff der Ionisation ab. In hochreinen Halbleitern kann nun eine energiereiche elektromagnetische Strahlung oder eine Teilchenstrahlung bereits bei einer Energie von etwa 1eV (Wellenlänge 1.2µm, Frequenz 240THz) Elektronen aus Atomen im Kristallgitter freisetzen und damit ionisierend wirken. Bei bestimmten Metallen liegt die Ionisierungsenergie unter 10eV (Cäsium 3.9eV, Lithium 5.4eV), bei Sauerstoff beträgt sie 13.6eV, bei Wasserstoff 13.6eV und beim Stickstoff (Luft) 14.5eV. Sichtbares Licht kann in Kristallen oder an Metalloberflächen also durchaus ionisierend wirken. Bei den meisten organischen Molekülen beträgt die Ionisierungsenergie in der Größenordnung von 10eV. In der Strahlenschutzgesetzgebung gilt elektromagnetische Strahlung aber erst als ionisierend, wenn die Wellenlänge unter 100nm liegt, d.h. ab einer Energie von 12.4eV, egal ob die Strahlung als

UV-Licht oder Röntgenstrahlung oder als radioaktive Gammastrahlung bezeichnet wird. Das liegt daran, dass man im Strahlenschutz biologisches Gewebe und keine Halbleiterkristalle oder Photozellen betrachtet.

Durch die Ionisation verändert sich nicht nur die elektrische Ladung, sondern auch das chemische Reaktionsvermögen. Durch die Ionisation können sich die Moleküle auch aufspalten. Dieser Vorgang wird bei wässrigen Lösungen als Radiolyse bezeichnet. Insbesondere das Wasser der Gewebezellen spaltet sich in hochreaktive Radikale auf, die nach der Aufspaltung starke Zellgifte darstellen. Dazu gehören zum Beispiel Sauerstoffradikale (reactive oxygen species, ROS). Solche Radikale schädigen das Erbgut der Zelle, die DNA, so dass Mutationen entstehen können. Die ionisierende Strahlung kann aber auch direkt Elektronen aus den Molekülen der DNA herausschlagen, so dass die Moleküle, aus denen die DNA besteht, direkt ionisiert werden. Die Folge ist dann oft ein Aufbrechen der Moleküle, so dass Strangbrüche und Basendefekte entstehen können. Nun gibt es allerdings zahlreiche Reparaturmechanismen des Immunsystems, welche solche Defekte reparieren können, welche die Schädigung rückgängig machen, nur darf eben die Rate an Defekten nicht zu hoch werden. Erst dann, wenn Defekte nicht mehr repariert werden können, kommt es bei der Zellteilung zu einer Vererbung einer fehlerhaften Erbinformation, was schließlich zu Mutationen der Zellen und damit zu einer Krebsinzidenz führen kann.

Die radioaktive Alpha- oder Beta-Strahlung, die beim Zerfall instabiler Atome wie Kalium, Uran und Thorium entsteht, stellt eine Teilchen-Strahlung dar, deren Energie meist deutlich höher liegt als 1keV. Sie hat daher genauso die Eigenschaft, den Zellen eines Gewebes Zellschäden zuzufügen, wie eine elektromagnetische Strahlung vergleichbarer Energie. Bei äußerer Bestrahlung mit Teilchenstrahlungen besteht der Unterschied zu den elektromagnetischen Strahlungsarten im Wesentlichen aber im Eindringverhalten in den Körper. Dies gilt auch für andere Teilchenstrahlungen ganz hoher Energie, die bei einem radioaktiven Zerfall nicht mehr auftauchen. Das sind z.B. Teil der kosmischen Strahlung (Höhenstrahlung), die vor allem von der Sonne erzeugt wird, oder werden technisch in Teilchen-Beschleunigern erzeugt, wie z.B. die Protonenstrahlung. Die Protonenstrahlung wird beispielsweise in der Medizin bei der Tumortherapie benutzt. Protonenstrahlung dringt bei hoher Energie gut in das Gewebe ein. Das Eindringen stoppt dann aber in einer von der Energie abhängigen Tiefe abrupt, und die Strahlenschäden entstehen dann vorwiegend in dieser Tiefe. Dieser Mechanismus wird jetzt dazu genutzt Tumorzellen sehr lokal in einer gewählten Tiefe zu zerstören und so bei einer Erkrankung heilend zu wirken.

Der französische Physiker Louis de Broglie hat schließlich noch herausgefunden, dass man auch einer Teilchenstrahlung eine Frequenz zuordnen kann, und er und weitere Physiker haben erkannt, dass Teilchenstrahlungen vergleichbare Eigenschaften zu elektromagnetischen Strahlungsarten haben. Man spricht daher bei Strahlungsquanten von einem Dualismus von Wellen und Teilchen und benutzt nun den Begriff der Quanten für Beides. Das heißt, wenn man insbesondere hochenergetische Photonen- und hochenergetische Teilchenstrahlungen vergleicht, verschwindet der Unterschied, wie sie erzeugt wurden, und die Wirkungen, wie beispielsweise die Ionisation sind vergleichbar. Deswegen betrachtet man auch im Strahlenschutz beide Strahlungstypen hinsichtlich ihrer schädigenden Wirkung auf biologisches Gewebe auf eine Weise, die quantitativ vergleichbar sein soll. Um diese Vergleichbarkeit hat sich vor allem der schwedische Medizinphysiker und Strahlenschützer Rolf Sievert bemüht. Deswegen hat diese Größe, die den biologischen Schädigungs-Effekt in vergleichbarer Weise beschreibt, die „Pseudoeinheit“ Sievert bekommen.

Nun hat man allerdings bei der Ursachenforschung zum UV-strahlungsinduzierten Hautkrebs festgestellt, dass auch eine UV-Strahlung, die gerade noch keine Ionisation in biologischem Gewebe erzeugen kann, und der Strahlenschutzgesetzgebung nach als nicht-ionisierend bezeichnet wird,

dennoch Krebs induzieren kann. D.h. die Fähigkeit zur Ionisation ist offensichtlich nicht genau das, was eine Strahlung zur krebserzeugenden Strahlung macht. Bei der UV-Strahlung liegt es daran, dass diese bereits so viel Energie hat, dass Atome und Moleküle so stark angeregt werden, dass sogenannte photochemische Reaktionen in Gang kommen, welche Moleküle aufspalten und genauso Radikale (ROS) erzeugen können, die dann die DNA auf indirekte Weise schädigen oder die DNA auch ganz direkt schädigen können genau wie eine ionisierende Strahlung auch. Letzteres geschieht vor allem durch die Erzeugung von Pyrimidin-Schäden (Bildung von Cyclobutan-Pyrimidin-Dimeren, „CPDs“). Insbesondere die UV-B Strahlung zwischen 280 und 315nm ist für diese „photoinduzierte“ Bildung von Zyklo-Butan-Dimeren zwischen den DNA-Strängen verantwortlich, welche auf verschiedene Weisen zu Mutationen führen können. Sie blockieren zum Beispiel die Prozesse zur Replikation der Zellinformation bei der Zellteilung und zur Transkription der DNA-Informationen im Zellkern. Diese Replikation wird zur Genexpression benötigt, um z.B. an Ribosomen die in der DNA codierten Proteine zu synthetisieren.

Die energiereichen UV-Photonen mit ihrer hohen Energie können zusätzlich auch noch sogenannte Photoaddukte bilden, die als „hoch-mutagen“ gelten, also sehr häufig zu Mutationen führen. Die genaue Wirkungsweise solcher Photoaddukte bei Mutationen ist aber derzeit noch Gegenstand der Forschung und ist noch nicht vollumfänglich verstanden.

Zu allem Übel hat man schließlich auch noch eine immun-supprimierende Wirkung der UV-Strahlung in den Zellen der Haut nachweisen können. D.h. die hohe Energie der UV-Strahlung lähmt auch das Reparaturfähigkeit des Immunsystems. Die Tatsache, dass die DNA laufend einer großen Zahl an schädigenden und mutagenen Einflüssen ausgesetzt ist, nicht nur durch Strahlung aller Art, sondern auch durch aggressive Chemikalien und durch andere toxische Stoffe, beweist, dass der menschliche Körper ein äußerst effizientes Reparatur-System besitzt, das beim gesund lebenden Menschen, der sich zudem auch vor zu übermäßiger UV-Strahlung richtig schützt, alle perfekt mit hoher Rate ablaufen und die so das Überleben sicherstellen. Forscher schätzen die Schadenshäufigkeit am Erbgut im Körper auf 10^4 – 10^6 Schäden pro Tag und Zelle. Bei etwa 10^{12} Zellen im menschlichen Körper müssen daher täglich Schäden in einer Größenordnung von 10^{16} bis 10^{18} repariert werden. Dass das beim gesunden Menschen richtig funktioniert ist eine gewaltige Leistung.

Schließlich hat das gut funktionierende Immunsystem auch noch eine finale Waffe gegen irreparable strahlungsinduzierte Zellschäden. Wenn es nämlich erkennt, dass die Erbinformation nicht repariert werden kann, dann kann das Immunsystem per Kommando auch einen Zelltod auslösen (Apoptose), so dass die Zelle als defekt aussortiert wird. Das zeigt sehr deutlich, wie vielfältig und effizient der Schutz des Immunsystems vor Zelldefekten ist, und es legt nahe, dass man das Immunsystem durch ungesunde Lebensweise besser nicht lahmlegen sollte.

Man kann somit feststellen, dass Strahlungsquanten einer elektromagnetischen Strahlung (Photonen-Strahlung) ab der Energie von etwa 4eV (UV-Licht) genügend Energie haben, um bei äußerer Bestrahlung den Zellen der Haut auch ganz ohne eine Ionisation Schäden zufügen zu können. 4eV entsprechen dabei einer Wellenlänge von etwa 300nm oder grob einer Frequenz von 1000 Terahertz. Unterhalb dieser Energie kann elektromagnetische Strahlung den Zellen zwar durchaus Energie zuführen, sie aber nicht mehr in der Erbinformation schädigen. Das ist der Grund, warum man von Funkwellen, von Wärmestrahlung und von sichtbarem Licht auf physikalische Weise keine Schädigung eines Gewebes erwarten kann, auch wenn die Bestrahlungsstärke hoch ist. Eine Ausnahme wäre vielleicht noch eine mit einem Laser erzeugte Strahlung, deren Photonendichte so immens hoch ist, dass bei der Absorption so viel Wärme entsteht, dass sich das Gewebe so erhitzt, dass die Zellflüssigkeit verdampft und die festen Gewebsanteile dann schließlich verbrennen. Aber erst ab den Wellenlängen des UV-B-Lichts ist die Energie der einzelnen Strahlungsquanten (Photonen) hoch genug, so dass entweder eine Ionisation auftritt oder photochemische Reaktionen in Gang gesetzt werden, und so

Zellschäden entstehen können, die durch Zellmutationen zu einer Karzinogenese (Krebsinzidenz) führen können, sofern dann auch gleichzeitig das Immunsystem versagt, das solche Schäden normalerweise beseitigt. Deswegen gehört die UV-Strahlung genau wie die Röntgenstrahlung und die radioaktive Gammastrahlung zu den krebserzeugenden Strahlungsarten innerhalb der Kategorie der elektromagnetischen Strahlung, selbst dann, wenn sie als nicht-ionisierend (in biologischem Gewebe) bezeichnet wird. Das heißt die Energie der Strahlungsquanten ist tatsächlich das Entscheidende, was eine Strahlung zu einer potenziell schädlichen Strahlung macht und nicht die Frage, ob eine Strahlung ionisierend ist oder nicht. Das sollte man sich beim Vergleich von dem in der Bevölkerung meist als harmlos empfundenen Sonnenlicht und einer als sehr gefährlich geltenden radioaktiven Strahlung klarmachen.

Unter den Strahlungsarten der UV-Strahlung ist es insbesondere die UV-B Strahlung, welche die Epidermis der Haut durchdringen und dann die obere Dermis (Lederhaut) erreichen kann. Es ist auch diejenige Strahlung, die gleichzeitig genügend Energie hat ($> 4\text{eV}$), damit dort tatsächlich Strahlungsschäden entstehen. Die UV-A Strahlung erreicht dieses Energie-Kriterium nur annähernd und die UV-C Strahlung wird zu einem großen Teil bereits in der Erdatmosphäre absorbiert, der Rest der UV-C Strahlung wird von der Hornhaut absorbiert, die aus abgestorbenen Zellen besteht und daher nicht mehr gegen Strahlenschäden sensibel ist.

Diese Erkenntnis hat schließlich dazu geführt, dass man die Behörden, die sich um den Strahlenschutz durch ionisierende Strahlung kümmern, nun ebenfalls beauftragt hat, sich auch dem Schutz vor nicht-ionisierenden Strahlung zu kümmern, und dabei vor allem um die UV-Strahlung. Da sich der Genuss des Sonnenlichtes aber nicht so leicht gesetzlich regulieren lässt, wie z.B. der Umgang mit radioaktiven Quellen und Röntgenanlagen, und weil die Erkenntnis, dass die UV-Strahlung genauso Krebs erzeugen kann, noch relativ neu ist, ist der gesetzlich geregelte Strahlenschutz zur UV-Strahlung noch vergleichsweise jung und bisher noch sehr überschaubar. Eine Pflicht zum Sonnenschutz im Freibad oder am Strand wird es vermutlich auch in Zukunft nicht so schnell geben. Dennoch redet man immerhin von derzeit 4100 Menschen im Jahr in Deutschland, die an Hautkrebs sterben, was hauptsächlich der UV-Strahlung zuzuschreiben ist. Das ist deutlich mehr als die Anzahl der Personen, die durch den Einfluss ionisierender Strahlung, also vor allem an radioaktiver Strahlung sterben. So ordnet man beispielsweise nur etwa 2100 Sterbefälle pro Jahr in Deutschland den Auswirkungen des natürlich radioaktiven Gases Radon zu, das unbemerkt aus uranhaltigen Böden unbemerkt in Häuser eindringt.

Aber auch im Falle der Schädigung der Haut durch UV-Strahlung ist es so, dass sich die Biologie über die Evolution hinweg an die natürliche Strahlungssituation auf der Erde angepasst hat. Da die Sonnenstrahlung für die Pflanzenwelt auf Grund der Photosynthese eine unabdingbare Voraussetzung ist, aber auch für den Menschen aus vielen indirekten Gründen eine Lebensvoraussetzung darstellt (z.B. die Vitamin-D Synthese), verfügen biologische Organismen eben ein Immunsystem, welches genau wie bei Schäden durch die ionisierende Strahlung mit seiner Vielzahl an hocheffizienten Reparaturmechanismen, auch das Überleben unter dem Einfluss des erbgutschädigenden Sonnenlichts sicherstellt. Beim Menschen ist dies zunächst bei schonender Anpassung an eine zunehmende UV-Belastung die Bildung von Pigmenten wie beispielsweise dem Melanin, das als körpereigener UV-Schutz wirkt. Melanin wandelt die UV-Strahlungsenergie sehr effizient in harmlose Wärme um. So hat es sich ergeben, dass selbst in Äquatornähe wo die UV-Belastung naturgemäß höher ist, Menschen zumindest im statistischen Sinne und im Vergleich zu anderen Lebewesen ein hohes Lebensalter erreichen (sofern eine gute Ernährung und eine gesunde Lebensweise sichergestellt sind).

Dass das Immunsystem des Menschen eine wesentliche und notwendige Rolle dabei gespielt hat, dass sich die Weltbevölkerung trotz des krebserregenden UV-Strahlungsanteils im Sonnenlicht über die

Evolution hinweg gut entwickelt hat, kann man an Kindern beobachten, bei denen das Immunsystem krankheitsbedingt die strahlungsinduzierten Zellschäden eben nicht reparieren kann. Dabei steht die „Mondscheinkrankheit“ (Xeroderma pigmentosum) als plakatives Beispiel im Vordergrund. Sie tritt nur sehr selten auf Grund eines angeborenen genetischen Defekts auf, und führt dazu, dass diese Kinder sich überhaupt nicht im Sonnenlicht aufhalten können, ohne dass sich Hautentzündungen und Hautkrebs bildet. Der Grund dafür ist, dass der genetische Defekt dazu führt, dass sich bei diesen Kindern die DNA-Reparaturenzyme nicht aufbauen können, so dass die durch den UV-Strahlungsanteil im Sonnenlicht induzierten Strahlenschäden nicht repariert werden können. Da diese Krankheit bisher nicht geheilt werden kann, bleibt die Lebenserwartung dieser Kinder gering. Dies zeigt nun überdeutlich, dass beim gesunden Menschen die Reparaturfähigkeit des Immunsystems das Überleben sicherstellt.

Was den körpereigenen Schutz durch die normale Reparaturleistung des Immunsystems anbelangt, wird damit auch klar, dass diese nur bis zu einer gewissen Rate an Strahlungsdefekten gewährleistet ist. Insbesondere bei sensibler und schwach pigmentierter Haut führt eine intensive Sonnenbestrahlung schnell zur Überlastung der Reparaturmechanismen. Dies ist völlig vergleichbar zu einer Situation, wo eine radioaktive Bestrahlung weit über die Exposition gegenüber der normalerweise natürlich vorhandenen Radioaktivität hinausgeht. Unter diesen Umständen gerät auch das gesunde Immunsystem in eine Überlastungssituation und ist nicht mehr in der Lage Strahlungsdefekte an der Zellsubstanz zu reparieren oder die irreparabel geschädigten Zellen auszusondern, so dass defekte Erbinformation bei der Zellteilung vererbt wird und es zu Mutationen und Entartungen kommen kann, die dann die Krebsinzidenz bewirken können. Daher muss sich auch der gesunde Mensch vor einer übermäßigen UV-Bestrahlung genauso schützen, wie vor einer übermäßigen radioaktiven Bestrahlung. Dies ist im normalen, natürlichen Umfeld einfacher als bei der radioaktiven Strahlung, da die natürliche UV-Strahlung immer zusammen mit sichtbarer Sonnenstrahlung auftritt und sich zumindest grob an der Intensität des sichtbaren Lichts abschätzen lässt. Ausnahmen sind technische UV-Strahlungsquellen wie UV-Laser und sowie Hochleistungs-UV-LEDs im UV-B und UV-C Bereich. Was aber zunehmend zur Bedrohung wird, ist der Klimawandel. Erführt offensichtlich zu einer Zunahme der UV-Belastungen auf der Erde, die unerwartet sind und die jetzt von vielen Menschen nicht mehr richtig eingeschätzt werden (z.B. Niedrig-Ozon-Ereignisse im Frühjahr).

Die völlige Unsichtbarkeit der Röntgenstrahlung und der radioaktiven Strahlung erhöht durch die völlig fehlende Wahrnehmungsfähigkeit die Gefahren für die Bevölkerung massiv im Vergleich zum UV-Strahlungsanteil im Sonnenlicht, dessen Gegenwart man am sichtbaren Strahlenanteil zumindest erahnen kann. Zudem haben die Anwendung von Atomwaffen, die Unfälle in Nuklearanlagen sowie die unkontrollierte industrielle Verwendung von radioaktiven Substanzen (z.B. Leuchtfarbe) bereits zu immensen Schäden in der Bevölkerung geführt. Das hat die anfänglich sehr positive Wahrnehmung der radioaktiven Strahlung als Wundermittel für die Gesundheit und in der Medizin zu Zeiten von Madame Curie doch ziemlich in das Gegenteil geändert. Selbst in der friedlichen Anwendung der Kernenergie und in der Medizin hat man die Gefährlichkeit der technisch erzeugten radioaktiven Strahlung und die Notwendigkeit für einen speziellen Strahlenschutz mittlerweile erkannt. Infolge dessen haben auch staatliche Institutionen eine recht strikte gesetzliche Strahlenschutz-Gesetzgebung etabliert, die heute weitestgehend international vereinheitlicht ist. Es wurden dabei sehr konservative Grenzwerte etabliert, welche die medizinischen und technisch-industrielle Nutzung ionisierender Strahlung ziemlich stark limitieren. Bei den Grenzwerten orientiert man sich dabei an der biologischen Wirkung einer Strahlung und ordnet ihr einen unter allen Strahlungsarten vergleichbaren Dosiswert zu („Äquivalentdosis“ in der Einheit Sievert), welche die biologische Wirksamkeit im schädlichen Sinne beschreibt. Allerdings bezieht sich diese strikte und dosisorientierte Strahlenschutz-Gesetzgebung

bisher nur auf ionisierende Strahlungsarten mit einer Wellenlänge unter 100nm bzw. einer Energie oberhalb 12.4eV. Sie deckt damit die UV-Strahlungsarten UV-B und UV-C nicht ab. Das bedeutet aber nicht, dass intensives Sonnenlicht weniger schädlich ist. Lediglich die Verwendung einiger technischen UV-Quellen sind bisher gesetzlich reguliert. So dürfen z.B. nach der derzeitigen UV-Schutz-Verordnung (UVSV) Jugendliche keine Solarien besuchen. Es wurde auch die sonnenbrandwirksame Bestrahlungsstärke der in Solarien eingesetzten Strahlenquellen beschränkt, nicht aber deren Benutzungsdauer. Man konnte aber in den letzten Jahren beobachten, dass die gesetzliche Regulierung der Verwendung von technischer UV-Strahlung auch international gesehen zunimmt.

Um nun für die biologische Wirksamkeit energiereicher Strahlung noch ein besseres Gefühl zu bekommen, kann man sich noch klarmachen, dass der amerikanische Strahlenschützer Mutscheller 1925 auf Grund eigener Untersuchungen mit Röntgenstrahlung vorgeschlagen hatte, eine Toleranzdosis von weniger als 1%, welche innerhalb von 30 Tagen eine Hautrötung hervorruft, als Grenzwert festzulegen. Diese Festlegung einer „Toleranzdosis“ beruhte auf der Feststellung, dass diese Dosis über längere Zeit toleriert werden konnte, ohne zu sichtbaren Schäden zu führen. Eine solche Hautrötung (Erythem) tritt typischerweise bei einer Äquivalentdosis von mehr als 1Sv auf und liegt damit um mehr als eine Größenordnung über den heute zulässigen Grenzwerten für die Bevölkerung. Bei Freizeitaktivitäten im UV-haltigen und daher krebserregenden Sonnenlicht dagegen wird vor allem von jungen Menschen häufig gedankenlos riskiert, dass es zu einer solchen Hautrötung kommt oder sich sogar ein massiver Sonnenbrand und Verbrennungssymptome einstellen, wenn z.B. kein Sonnenschutz auf die Haut aufgetragen wurde. Dabei ist es bei den Spätfolgen in Form eines Hautkrebses ziemlich egal, ob dieser durch eine übermäßige Röntgen-Strahlung (bzw. radioaktive Strahlung) oder durch eine übermäßige UV-Bestrahlung hervorgerufen wurde. Nur ist die Bewertung der Gefährlichkeit der unterschiedlichen Strahlungstypen bei den Menschen sehr unterschiedlich.

Ein anderer Aspekt, um die biologische Wirksamkeit der UV-Strahlung im Vergleich zur ionisierenden Strahlung zu beurteilen, ist die technische Anwendung von energiereicher Strahlung zur Sterilisation und Entkeimung. Alle krebserregenden Strahlungsarten werden für diesen Zweck eingesetzt. Allerdings haben die strikten gesetzlichen Regulierungen für die ionisierende Strahlung in einigen Staaten dazu geführt, dass diese nicht mehr ökonomisch für diesen Zweck eingesetzt werden kann. So dürfen in Deutschland nach der Lebensmittelbestrahlungsverordnung lediglich noch getrocknete aromatische Kräuter und Gewürze, die mit ionisierender Strahlung behandelt wurden, angeboten bzw. verkauft werden. In anderen EU-Staaten ist dies noch erlaubt. Die Bestrahlung mit ionisierender Strahlung hat hierbei den Zweck die Haltbarkeit der Lebensmittel zu erhöhen, weil Pilze und Fäulnisbakterien, durch die die Strahlung sehr effizient abgetötet werden ohne das Lebensmittel (Obst, Gemüse) sichtbar zu schädigen. Die UV-C Strahlung wird dagegen immer umfangreicher zur Luft- und Wasserentkeimung eingesetzt. Die Covid-19 Pandemie hat in dem Bereich der technischen Anwendung von UV-Strahlung für diesen Zweck einen weiteren Auftrieb beschert vor allem auch weil sie gesetzlich noch nicht stark reguliert ist. In Reinstwasser- und Trinkwasseranlagen sowie in Luftaufbereitungsanlagen von Krankenhäusern und in Reinräumen wird vor allem das intensive UV-C Licht von Quecksilberdampflampen (254nm) zur Entkeimung verwendet. Laut Angaben der Hersteller können biologische Keime, wie Bakterien und Viren, sowie Pilzsporen durch Bestrahlung mit UV-C Strahlung aus Quecksilberdampflampen mit sehr hoher Effizienz (bis zu 90%) in der Luft bzw. in klarem Wasser abgetötet werden, wobei stets als Wirkprinzip die Schädigung der Erbsubstanz und der Ribosomen (Proteinsynthese) solcher Keime im Vordergrund steht. Da im Zuge der Covid-19 Pandemie zunehmend auch offene UV-C Lampen zur Entkeimung mit beachtlicher Strahlungsleistung auf den Markt kamen und Fälle von Sonnenbränden und anderen Haut- und Augenschäden bei den Anwendern auftraten, sahen sich Behörden gezwungen, zumindest sehr deutlich vor dem Gebrauch zu warnen. Zu einer gesetzlichen Regelung kam es jedoch bisher nicht.

Wenn man nun die Methodik der Festlegung einer Organ-Äquivalentdosis für die Haut über den gesamten spektralen Bereich der energiereichen und krebserzeugenden Strahlung anwenden würde, ohne die UV-Strahlung auszuschließen, dann käme man vermutlich schnell zu dem Ergebnis, dass für viele Menschen der jährliche Grenzwert für die Haut-Organosis von 50mSv pro Jahr bereits im Frühjahr und Sommer durch die üblichen Freizeitaktivitäten und das Sonnenbaden weit überschritten wäre, auch wenn die Wintermonate relativ strahlungsarm verlaufen. Auch gemessen an den tatsächlichen Krebsinzidenzen (laut Robert-Koch Institut bei Hautkrebs derzeit etwa 300000 pro Jahr in Deutschland) müsste die Bevölkerung eigentlich viel mehr Angst vor dem natürlichen Sonnenlicht als vor radioaktiver Strahlung haben, sofern diese natürlichen Ursprungs ist.

Für nicht natürliche Strahlungsquellen, und für Kernkraftwerke und Atomwaffen, deren Strahlungsintensität die Reparaturmechanismen des Immunsystems sofort überfordern, muss man allerdings noch ganz andere, weitergehende Betrachtungen zu den Risiken der Fehlbedienung, des Unfallrisikos und der Handhabung des sehr stark strahlenden Atommülls anstellen. An der Stelle muss man sich bei der radioaktiven Strahlung zumindest in Friedenszeiten auf den gesetzlichen Schutz vor ionisierender Strahlung entsprechend der relativ strikten Strahlenschutzverordnung verlassen. Die gesetzliche UV-Schutz-Verordnung dagegen steckt dagegen noch sehr in den Kinderschuhen. Eine international anerkannte Dosis-Wirkungsbeziehung, auf die sich eine solche UV-Schutzverordnung stützen könnte, gibt es beispielsweise noch nicht. Was aber die natürlichen Quellen von radioaktiver Strahlung anbelangt, so kann man zumindest bei der statistischen Betrachtung von Krebsinzidenzen sehr klar sagen, dass das Sonnenlicht mit seinem UV-Strahlungsanteil die weitaus größere Bedrohung der Bevölkerung darstellt, welche wegen des Klimawandels auch noch weiter anwachsen könnte.