

Höhenstrahlung

Der österreichische Physiker Victor Franz Hess postulierte 1912 eine sogenannte „Höhenstrahlung“, um die bei einer Ballonfahrt gemessene höhere elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre und auch die Zunahme der Gammastrahlung in größerer Höhe zu erklären. Für diese Entdeckung – heute als (primäre und) sekundäre kosmische Strahlung bezeichnet – erhielt er 1936 den Nobelpreis für Physik.

Primäre kosmische Strahlung ist eine hochenergetische Teilchenstrahlung, die auf die Erdatmosphäre trifft und nach ihrem Ursprung in solare, galaktische und extragalaktische Strahlung unterteilt wird:

- Solare Strahlung besteht aus dem relativ konstanten Sonnenwind – der von der Erdatmosphäre abgeschirmt wird – und Sonneneruptionen, welche in chromosphärische Eruptionen (Solar Flares) und koronale Massenauswürfe (Coronal Mass Ejections) unterteilt werden.
- Galaktische und extragalaktische Strahlung hat ihren Ursprung außerhalb des Sonnensystems. Diese Strahlung kommt weitgehend isotrop¹ aus allen Raumrichtungen und ist zeitlich konstant. Extrasolare kosmische Strahlung hat eine geringe Teilchenflussdichte und ein weites Energiespektrum von einigen GeV (Giga-Elektronenvolt) bis zu sehr hohe Energien von über 10^{20} GeV. Es wird vermutet, dass Teilchen mit einer Energie von bis zu 10^{18} GeV ihren Ursprung in unserer Galaxie haben und ultrahochenergetische Teilchen mit einer Energie von 10^{18} - 10^{23} GeV von Quellen außerhalb unserer Galaxie stammen. (Zum Vergleich: Im größten Teilchenbeschleuniger der Erde, dem Large Hadron Collider (LHC) in Cern, kann man Teilchen auf Energien bis zu $\sim 10^5$ GeV beschleunigen)

Kosmische Teilchenstrahlung besteht hauptsächlich aus Protonen (~85-87%), Elektronen (~2%) und vollständig ionisierten Atomen (~10-12% Heliumkerne, ~1% schwerere Elemente). Der elektromagnetische Anteil der kosmischen Strahlung – die kosmische Gammastrahlung – wird durch die Erdatmosphäre abgeschirmt und daher nicht zur Höhenstrahlung gezählt.

Diese hochenergetische Teilchenstrahlung trifft auf die Erdatmosphäre und verursacht durch die Wechselwirkung mit den Gasmolekülen – hauptsächlich O_2 - und N_2 -Moleküle – einen kaskadenartigen Teilchenschauer: **sekundäre kosmische Strahlung** (vgl. Abbildung 1). Ein Primärteilchen verursacht einen Schauer mit etwa 10^{11} (100 Milliarden) Sekundärteilchen. Die Luftschauer sind horizontal einige Quadratkilometer groß, vertikal aber nur wenige Meter.

¹ isotrop = nach allen Richtungen hin gleiche physikalische und chemische Eigenschaften aufweisend

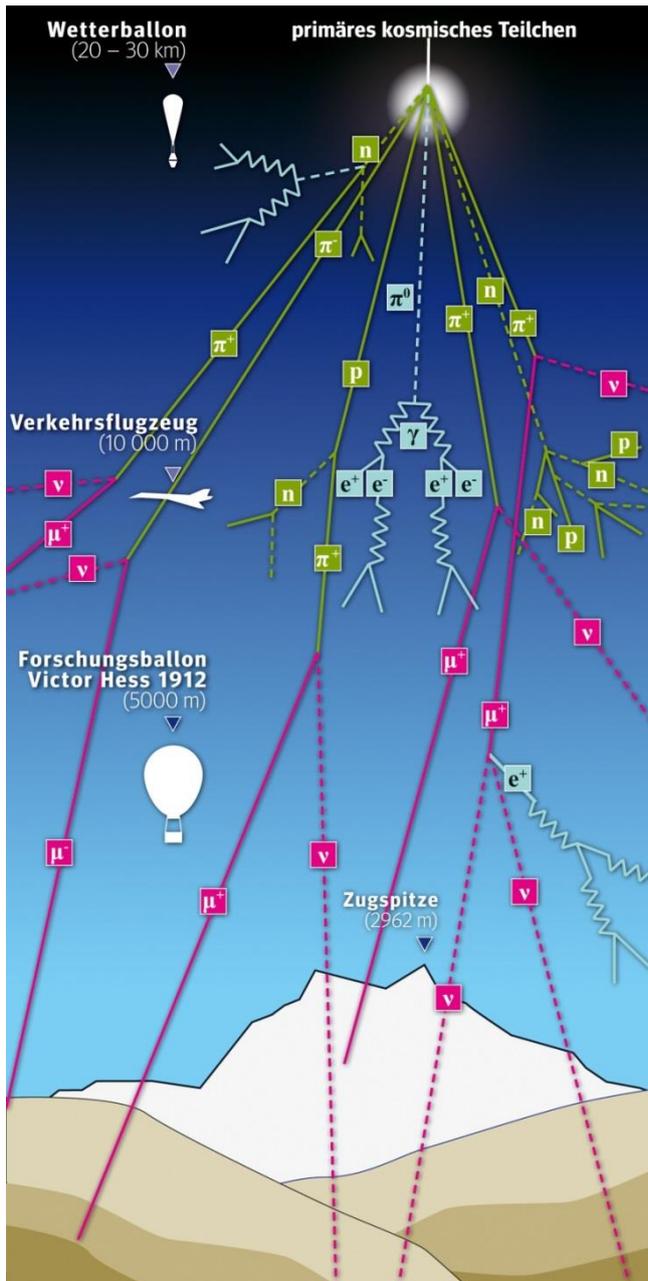


Abbildung 1 [Abb1]: Ein Teilchenschauer besitzt

- eine weiche elektromagnetische (blau) Komponente, unter anderem durch den Zerfall von Pionen (π^0) und der Zerstrahlung von Positron (e^+) - Elektron (e^-) - Paaren
- eine harte myonische (μ^+, μ^-) (pink) Komponente
- eine hadronische (grün) Komponente, die vorwiegend Protonen (p) und Neutronen (n) enthält.

Das komplexe Zusammenspiel primärer und sekundärer kosmischer Strahlung führt zur Absorption der primären Strahlung mit zunehmender Eindringtiefe, während die sekundäre Strahlung zunimmt. Der daraus resultierende Verlauf der Strahlungsdosis hat in etwa 12-20 km (See-)Höhe sein Maximum – das sogenannte **Pfotzer Maximum**. Unter dieser Höhe nimmt die Gesamtstrahlungsintensität exponentiell ab.

Das Erdmagnetfeld schützt uns, indem es kosmische Strahlung abschirmt. Die stärkste Abschirmung ist am geomagnetischen Äquator und die schwächste an den geomagnetischen Polen. Die Stärke dieser Abschirmung wird als Abschneidestufigkeit (geomagnetic cutoff-rigidity) bezeichnet. Damit ist die Mindestenergie gemeint, die ein auf die Atmosphäre treffendes Teilchen benötigt, sodass der resultierende Teilchenschauer die Erdoberfläche noch erreicht.

Strahlenreports

Fliegendes Personal ist Strahlung ausgesetzt. Diese ist im Durchschnitt vergleichbar oder höher, als jene, welche andere strahlenexponierte Personen in Medizin, Technik und Industrie erhalten (vgl. Abbildung 2).

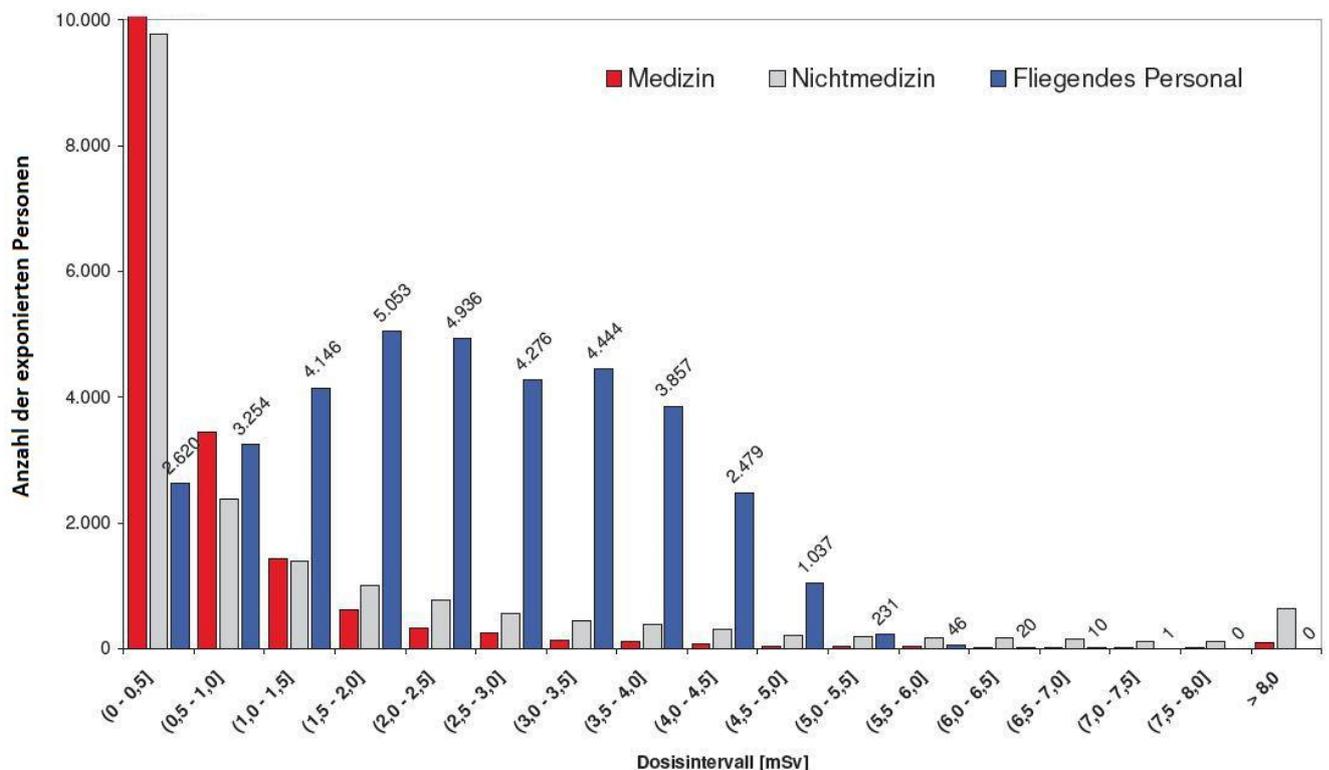


Abbildung 2 [Abb2]: Dosisverteilung beruflicher Strahlenexposition im Jahr 2009 in Deutschland: Medizinisches, nicht-medizinisches sowie fliegendes Personal

Die Internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection, ICRP) legte Empfehlungen über Dosisgrenzwerte vor. Diese wurden 1996 mittels einer Richtlinie–Council Directive 96/29/EURATOM – europarechtlich verankert, welche in nationales Recht umgesetzt wurde. Aktuell gilt in Österreich die Allgemeine Strahlenschutzverordnung – AllgStrSchV BGBl. II Nr. 191/2006 [2]. Konkrete Bestimmungen für das fliegende Personal sind in eine eigene Verordnung (Strahlenschutzverordnung fliegendes Personal BGBl. II Nr. 235/2006 [3]) gefasst. In dieser Verordnung ist fliegendes Personal als beruflich strahlenexponierte Personengruppe erfasst, für die die

Strahlungsdosis am Arbeitsplatz gemessen und errechnet werden muss. Dazu ist die Ermittlung der Strahlendosis in einer nach ISO 17025 akkreditierten Messstelle Pflicht.

Für Austrian Airlines und die meisten heimischen Bedarfsflugunternehmen führt diese Berechnung in Österreich die Firma IASON [4] durch. Bei FlyNiki ist eine interne Abteilung der Air Berlin für die Dosisermittlung zuständig. Im Gegensatz zu Österreich ist dies nach deutschem Recht möglich.

IASON arbeitet mit dem Programm IASON F.R.E.E – Flight Route Effective Dose Estimation [5].

Das dem Flug-Code IASON-FREE zugrunde liegende Rechenmodell beruht auf einem analytisch deterministischen Verfahren, welches die 6-dimensionale Boltzmann-Gleichung mittels eines mathematischen Ansatzes löst.

Um die Strahlenreports zu berechnen werden von den Flugbetrieben jeden Monat folgende Daten übermittelt:

- eine komplette Personalliste des fliegenden Personals
- Datenfiles der durchgeführten Flüge, mit Waypoints, Zeiten, Stepclimbs etc.
- eine Auflistung der jeweils von jedem Mitarbeiter im betreffenden Monat durchgeführten Flüge (inklusive DHC- und Positionierungsflüge). Flüge auf Fremdairlines, für die keine genauen Flugdaten vorliegen, werden auf Basis einer Großkreisrechnung mit Standardprofilen durchgeführt, entweder mit den aktuellen Flugzeiten (sofern vorhanden) oder aber mit den Standard-Blockzeiten.

In einem mehrstufigen Verfahren wird die Dosis jedes einzelnen Fluges berechnet und die entsprechende Dosis jedem daran beteiligten Mitarbeiter auf sein Dosiskonto in einer Datenbank „gebucht“. Dabei werden alle zur Dosisberechnung relevanten Aspekte berücksichtigt:

- Änderung der kosmischen Strahlung durch die unterschiedliche abschirmende Wirkung des Sonnenwindes über den Sonnenfleckzyklus
- Daten zum kompletten Strahlenfeld in der Atmosphäre

Kurzzeitige Änderungen der kosmischen Strahlung durch Sonneneruptionen könnte das Programm zwar berechnen, im Falle von Erhöhungen der Dosis durch Sonneneruptionen werden laut österreichischer Strahlenschutzverordnung die zusätzlichen Dosisbestandteile jedoch von einem Expertengremium abgeschätzt und bei den betroffenen Flügen hinzugefügt.

Die über den ganzen Berechnungsmonat summierte Dosis wird sowohl an die jeweiligen Flugbetriebe als auch an das nationale Dosisregister gemeldet. Die Flugbetriebe sind verpflichtet die jeweiligen Strahlenreports an ihre Mitarbeiter weiterzuleiten. Im Falle von Austrian ist für jeden Mitarbeiter der individuelle monatliche Report im Intranet – unter HR/ESS/BORD – abrufbar.

Grundsätzlich darf die effektive Dosis gemäß Allgemeiner Strahlenschutzverordnung bei beruflich strahlenexponierten Personen über einen Zeitraum von 12 aufeinander folgenden Monaten nicht mehr als 20 Millisievert (mSv) betragen. Der Grenzwert für die Lebensdosis liegt bei 400 mSv. [6]

Die berechnete Strahlungsdosis erhält fliegendes Personal zusätzlich zu der üblichen Exposition durch die Umgebung. Die mittlere Strahlenexposition der österreichischen Bevölkerung liegt bei ~4,2 mSv pro Jahr, davon stammen ~2,8 mSv aus natürlichen Strahlenquellen (~1 mSv kosmische und terrestrische Strahlung am Boden, 0,3 mSv Nahrung – Ingestion natürlicher Radionuklide, ~1,5 mSv Luft – Inhalation von Radon und seiner Folgeprodukte) und ~1,4mSv aus zivilisatorischen Strahlenquellen (~1,3 mSv Medizin, ~0,1 mSv sonstigen Quellen, davon <0,02 mSv Forschung und Industrie, <0,01mSv Folge von Kernkraftwerkunfällen und Kernwaffenversuchen). [5]

Auswirkungen der Strahlung auf den Menschen

Trifft ionisierende Strahlung auf einen Organismus, gibt sie auf getroffene Atome und Moleküle Energie ab. Dabei werden Moleküle ionisiert und chemische Bindungen aufgebrochen. Dadurch bilden sich Radikale (Moleküle mit ungepaarten Elektronen, die sehr reaktionsfreudig sind), die biologische Schäden anrichten können. In der Zelle eines Säugetieres werden diese zum größten Teil durch zellinterne Mechanismen repariert. Findet eine falsche oder keine Reparatur statt, kommt es zum Zelltod oder zu einer Zellveränderung.

Zelltod

Der Zelltod ein natürlicher Prozess im Zyklus einer differenzierten Zelle. Die Zelle verliert ihre Teilungsfähigkeit und stirbt nach Ablauf ihrer Lebensdauer. Ist eine große Anzahl an Zellen aufgrund von Strahlung betroffen, ergeben sich deterministische Strahlenschäden (z.B. Strahlenkrankheit). Damit sich schädliche Effekte manifestieren bedarf es einer Schwellendosis, bevor ausreichend Zellen sterben und das betroffene Gewebe seine Funktion verliert. Die Schwere des Schadens steigt ab der Schwellendosis proportional zu der Dosis. Grundsätzlich wird die Schwellendosis für deterministische Strahleneffekte durch die Exposition von Höhenstrahlung bei fliegendem Personal nicht erreicht. In der Schwangerschaft sind allerdings teratogene (fruchtschädigende) Schäden nicht auszuschließen, da die Schwellendosis für Strahlenschäden bei Embryonen deutlich niedriger ist.

Zellveränderung

Die Zelle teilt sich, vererbt aber die veränderte DNA an die Tochterzellen weiter. Die Folge sind *stochastische Strahlenschäden*. Sie treten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erst Jahre oder Jahrzehnte nach der Exposition auf. Für sie gibt es vermutlich keine Schwellendosis. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Schadens ist proportional zur Dosis. Die Höhe der Dosis beeinflusst dabei nicht die Schwere der Erkrankung, sondern nur die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens. Die stochastischen Strahlenschäden sind entscheidend bei niedrigen Dosen und zur Abschätzungen des Strahlenrisikos im Strahlenschutz. Sie haben ähnliche Auswirkungen wie zufällige, spontan entstandene DNA-Veränderungen, die durch Mutationen die Entstehung von Krebs oder auch Erbkrankheiten bewirken können.

Um das Strahlungsrisiko abzuschätzen werden internationale epidemiologische Feldstudien durchgeführt, sogenannte Kohortenstudien, die versuchen das Risiko quantitativ darzustellen. Um

möglichst aussagekräftige Resultate zu erhalten ist es wichtig, eine möglichst große Personengruppe über einen langen Zeitraum zu beobachten. Einige ausgewählte Studien sind im Anhang angeführt: [7], [8], [9], [10].

Das Auftreten von bzw. die Sterblichkeit an Krebserkrankungen der Probanden wird im Verhältnis zu nationalen Krebs /Sterberegistern, als *SIR (Standard Incident Ratio)* bzw. *SMR (Standard Mortality Ratio)* angegeben.

Sämtliche großen Feldstudien für fliegendes Personal ergeben für alle Krebsarten – bis auf Hautkrebs – SIR/SMR-Faktoren von ungefähr 0,8 – 1,2. Der Wert 1 entspricht der statistisch gleichen Häufigkeit wie bei der Referenzbevölkerung. Werte unter 1 können sich – abgesehen von den statistische Schwankungen – durch ein ausgeprägtes „healthy worker syndrom“ erklären, da bei fliegendem Personal die Mitarbeiter am Karriereanfang aus einem weit überdurchschnittlich gesunden Pool rekrutiert werden, regelmäßige Routineuntersuchungen (Flugarzt) Pflicht sind und überdurchschnittlich viel fliegendes Personal sportlich aktiv ist. Bei Hautkrebs (vor allem maligne Melanome) wurden statistisch signifikante SIR-Werte zwischen 1,8 und 5,1 und SMR-Werte zwischen 1,3 und 1,9 festgestellt.

Eine starke Schwäche der Feldstudien besteht darin, dass der Lifestyle nicht oder nur unzureichend mitberücksichtigt wird. Zum Beispiel wird oft nicht unterschieden, wie viele Teilnehmer in der Studie rauchen. Rauchen hat eine SMR von über 10 bei Lungenkrebs, aber auch bei vielen anderen Krebsarten, sowie bei Herz- und Gefäßerkrankungen und liegt damit statistisch um Größenordnungen über den Auswirkungen der Strahlenbelastung. In keiner der genannten Studien werden Ernährungs- und Bewegungsgewohnheiten beachtet. Für die Entstehung von Hautkrebs hat außerdem ein Freizeitverhalten mit exzessiver Sonnenexposition einen sehr großen Einfluss. Ein weiterer Faktor, der uns im Berufsleben begleitet, ist der unregelmäßig Schlaf- und Biorhythmus. Insbesondere kann durch Schichtarbeit und Jetlag der Melatoninhaushalt gestört werden. Dieses Hormon ist einerseits für den Schlafrythmus wichtig und fungiert andererseits als wichtiges Antioxidans, das potentiell krebserregende freie Radikale bindet.

Durch alle diese Faktoren ist es faktisch schwer möglich, etwas über die Auswirkung von Strahlenbelastungen von unter 20 mSv auszusagen, da die Ursachen nicht differenzierbar sind.

Die ICRP geht deshalb in einer sehr konservativen Abschätzung davon aus, dass bei einer Exposition von 1000mSv (=1Sv) das allgemeine Risiko an Krebs zu erkranken um 5% erhöht wird. Linear betrachtet entspräche das bei einem allgemeinen Krebsrisiko von 25%, welches jeder Mensch hat, eine Steigerung auf 25,5%, wenn man von einer 35 Jahre langen Flugkarriere mit einer Höhenstrahlungsdosis von 5mSv pro Jahr ausgeht.

Infobox: Grundlagen zur Strahlenphysik

Strahlung kann nach ihren Bestandteilen, ihrer Quelle oder ihrer Wirkung unterschieden werden.

Nach den Prinzipien der Quantenphysik hat jede Strahlung auf Grund des Welle-Teilchen Dualismus sowohl Wellen – als auch Teilchencharakteristika.

Dennoch ist es sinnvoll, den Ausdruck Teilchenstrahlung (oder Korpuskularstrahlung) als Oberbegriff für Strahlung zu verwenden, deren Bestandteile eine von Null verschiedene Masse haben. Teilchenstrahlung unterscheidet man nach der Sorte der Teilchen, aus denen sie besteht, beispielsweise Alphastrahlung (Heliumkerne), Betastrahlung (Elektronen oder Positronen) oder Neutronenstrahlung.

Elektromagnetische Strahlung (oder Wellenstrahlung) besteht aus Photonen, deren Masse Null ist. Die Energie von elektromagnetischen Wellen hängt von ihrer Wellenlänge ab. Wellen mit kürzerer Wellenlänge schwingen mit höherer Frequenz und haben höhere Photonenenergien.

Ionisierende Strahlung

Als ionisierende Strahlung wird Teilchen- oder elektromagnetische Strahlung bezeichnet, die in der Lage ist, Elektronen direkt oder auch über Zwischenreaktionen aus einem Atom oder Molekül herauszulösen. Dazu werden Ionisationsenergien von mehr als 5 Elektronenvolt (eV) benötigt. Die von uns betrachtete Strahlenexposition bezieht sich ausschließlich auf den ionisierenden Strahlenanteil.

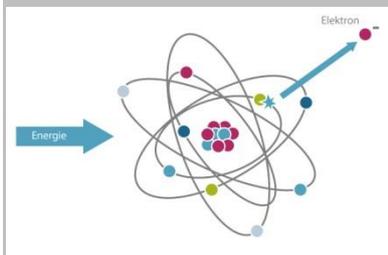


Abbildung 3 [Abb3]: Ionisation eines Atoms

Nichtionisierende Strahlung

Dagegen sind Radio-, Radar- und Mikrowellen, Infrarotstrahlung oder sichtbares Licht keine ionisierende Strahlung, da sie nicht die Mindestenergie besitzen, um Moleküle dauerhaft zu verändern oder gar zerlegen zu können. Beispiele aus unserem Alltag sind sichtbares Licht, UV-A, UV-B Strahlung, Radio-, Fernsehstrahlung, Handystrahlung, WLAN,... . Nichtionisierende Strahlung kann somit Materie nur wärmen, das heißt die Brownsche Molekularbewegung erhöhen, aber keine Elektronen aus ihrem Verband lösen. Allerdings kann Wärme zu Verbrennung führen, wie zum Beispiel Mikrowellenstrahlung oder Sonnenbrände, die sehr wohl biologische Auswirkungen haben. Dazu ist jedoch eine entsprechend hohe Energiedichte (=Energie pro Raumvolumen eines Stoffes) notwendig.

(Teilchen-)Energie und Teilchen-(Energie-)Flussdichte

Die (Teilchen-)Energie bezeichnet die Gesamtenergie eines Teilchens bzw. einer Welle. Sie wird üblicherweise in Elektronenvolt (eV) angegeben und kann, wenn es zu einer Wechselwirkung mit einem anderen Teilchen kommt, vollständig oder zum Teil übertragen werden.

Die Teilchenflussdichte (auch Strahlungsflussdichte) ist ein Maß für die Strahlungsintensität. Grob skizziert ist es die Anzahl der Teilchen/Wellen, die in einem Zeitintervall durch eine Fläche strömen.

Ein Beispiel für sehr hohe Teilchenenergie und sehr niedrige Flussdichte ist die galaktische Strahlung; Es treffen pro Zeiteinheit nur sehr wenige Teilchen auf die Atmosphäre, welche aber sehr hohe Einzelenergien haben. Ein Beispiel für niedrige Energie und hohe Flussdichte ist die Strahlung des

Mikrowellenherdes; niedrigerenergetische Mikrowellenstrahlung erwärmt ein kleines Volumen über kurze Zeit stark.

Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass zwischen einem einfallenden Teilchen und einem anderen Teilchen eine bestimmte Wechselwirkung wie z. B. ein Streuprozess oder eine Reaktion stattfindet. Der Wirkungsquerschnitt von einer bestimmten Strahlung ist ein wichtiger Faktor für ihre die (biologische) Wirksamkeit.

Strahlung mit großem Wirkungsquerschnitt kann leicht abgeschirmt werden, da sie schon mit den ersten Atomschichten interagiert. Zum Beispiel wird Alphastrahlung durch ein Blatt Papier oder die äußerste Hautschicht(Hornschicht) schon abgeschirmt, allerdings ist das Einatmen von Alphastrahlung sehr schädlich, da sie dann direkt auf die Lungenbläschen trifft. Strahlen mit sehr kleinem Wirkungsquerschnitt können viel Materie passieren ohne physikalische oder biologische Effekte auszulösen. Am biologisch wirksamsten ist Strahlung mit einem „mittleren“ Wirkungsquerschnitt, der statistisch eine gewisse Eintrittstiefe erlaubt und gleichzeitig eine hohe Wechselwirkungswahrscheinlichkeit in der eindringenden Materie hat. Bei der Messung von Strahlung als Umgebungsäquivalentdosis (siehe Dosisgrößen) wird unter anderem dem Wirkungsquerschnitt unterschiedlicher Strahlung Rechnung getragen.

Dosisgrößen oder „Was ist ein Sievert“

Um die Auswirkung von ionisierender Strahlung in Materie zu beschreiben, benötigen wir physikalische Dosisgrößen.

Die Energiedosis D ist die über die gesamte Bestrahlungsdauer aufgenommene Energie /Bewegungsenergie aller Sekundärteilchen bezogen auf die bestrahlte Masse m.

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dV}$$

Die physikalische Einheit der Energiedosis ist das Gray [Gy=J/kg]

Da allerdings verschieden Strahlungsarten sehr unterschiedliche biologische Wirkungen haben, verwenden wir im Strahlenschutz die Äquivalenzdosis H und die effektive Dosis D_{eff} .

Die Äquivalenzdosis H ist die Energiedosis multipliziert mit dem sogenannten Qualitätsfaktor Q_K , der die biologische Wirksamkeit der jeweiligen Strahlung D_K abbildet.

$$H = \sum_k Q_K \cdot D_K$$

Die effektive Dosis D_{eff} berücksichtigt zusätzlich die Empfindlichkeit der menschlichen Organe und Gewebe gegenüber der jeweiligen Strahlung. Dazu wird die Äquivalenzdosis für jedes Organ gewichtet und aufsummiert

$$D_{eff} = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T \sum_K w_T Q_{T,K} D_{T,K}$$

Da die effektive Dosis nicht direkt gemessen werden kann, wird die sogenannte Umgebungsäquivalentdosis $H^*(10)$ verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Dosismessung in einer gewebeäquivalenten Kugel mit 30 cm Durchmesser in einer Tiefe von 10mm.

Diese bewerteten Größen H und D_{eff} haben, ebenso wie die nicht bewerteten Energiedosen, die Einheit J/kg. Um sie jedoch als bewertete Dosen auszuzeichnen, werden sie im internationalen Maßsystem in der physikalischen Einheit Sievert ($Sv = J/kg$) angegeben.

$1Sv=1000mSv=1000000\mu Sv$

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Herrn **Cpt. Dipl.Ing. Michael Schneider**, Lab Director von IASON, Pilotenkollege und *Vereinigung Cockpit* - Mitglied, bedanken. Er hat überaus detailliertes Material über das Programm IASON FREE zu Verfügung gestellt. Seine Erklärungen zur Entstehung der Strahlenreporate waren eine unabdingbare Hilfe.

Empfehlung

Eine der anschaulichsten und ausführlichsten Darstellung zu Strahlendosen stammt aus einem wissenschaftlichen Comic. XKCD ist ein webcomic von Randall Patrick Munroe, einem Physiker und ehemaligen NASA Mitarbeiter. Und auch wenn es sich hierbei nicht um einen wissenschaftliche Arbeit handelt, ist die Graphik sehr gut recherchiert (siehe Primärquellen/*sources*).

<https://xkcd.com/radiation/>

Quellenverzeichnis

- [1] Experimental and Computational Assessment of Aircrew Radiation Exposure, Diplomarbeit Georg Eigelsreiter, 29. April 2011

Um in die Literaturliste in diesem Artikel übersichtlich zu lassen, habe ich nicht alle Primärquellen aufgezählt. Sie sind vollständig in der *Bibliography* meiner Diplomarbeit angeführt.

- [2] Strahlenschutzverordnung fliegendes Personal BGBl. II Nr. 235/2006 vom 22. Juni 2006
- [3] Allgemeine Strahlenschutzverordnung – AllgStrSchV, BGBl. II Nr. 191/2006, vom 22. Mai 2006
- [4] IASON GmbH, Homepage: <http://www.iason.eu/> (1.3.2016)
- [5] IASON FREE, <http://www.iason.eu/produkte/flugdosimetrie.html> (1.3.2016)
- [6] AGES, Strahlenbelastung in Österreich, Stand: 02.01.2015
<http://www.ages.at/themen/strahlenschutz/strahlenbelastung-in-oesterreich/> (1.3.2016)

Feldstudien

- [7] M. Blettner et al, Mortality from cancer and other causes among male airline cockpit crew in Europe, <International Journal of Cancer> ||106(6)||, 946 (2003).
- [8] I. Langner et al, Cosmic radiation and cancer mortality among airline pilots: results from a European cohort study (ESCAPE), <Radiation and Environmental Biophysics> ||42(4)||, 247 (2004).

[9] H. Zeeb et al, Mortality from Cancer and Other Causes among Airline Cabin Attendants in Europe: A Collaborative Cohort Study in Eight Countries, <American Journal of Epidemiology> ||158(1)||, 35 (2003).

[10] T. HALDORSEN, J.B. REITAN, U. TVETEN, Cancer incidence among Norwegian airline pilots, <Scandinavian Journal of Work, Environment & Health> ||26(2)||, 106 (2000).

Abbildungen

[Abb1] Einführung kosmische Teilchen, Physik.Begreifen, Schülerlabor in Zeuthen,

http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/grundlagen/einfuehrung/index_ger.html
(1.3.2016)

[Abb2] Berufl. Strahlenexposition des fliegenden Personals in Deutschland 2004 -2009, BFS-SG-15/11.

[Abb3] Ionisierende Strahlung, Medizinische Strahlung verstehen,

<http://www.medizinischestrahlung.de/fakten-zum-thema-strahlung/was-ist-strahlung/ionisierende-strahlung/>
(1.3.2016)