

Version Juli 2016

Factsheet

Ionisierende Strahlung

Dipl. Phys. ETH Lisa Pedrazzi, Dr. med. Klaus Stadtmüller

1 Ionisierende Strahlung

Ionisierende Strahlung ist der Sammelbegriff für eine Teilchen- oder Photonenstrahlung, deren Energie ausreicht bei Atomen oder Molekülen Elektronen aus der Atomhülle herauszulösen. Ionisierende Strahlung wird von radioaktiven Quellen ausgesandt, oder entsteht beispielsweise beim Abbremsen eines Elektronenstrahls in einem Material. Die dabei entstehende Bremsstrahlung macht man sich vor allem in der Medizin als Röntgenstrahlung zunutze. Die durch die Herauslösung von Elektronen entstehenden Ionen haben physikalische, chemische und biologische Wirkungen in ihrer Umgebung.

1.1 Physikalische Grundlagen, Einheiten und Messung

Mit den Dosisgrössen soll die Wirkung der ionisierenden Strahlung auf die Materie und im Speziellen auf den menschlichen Körper quantitativ erfasst werden. Dafür gibt es verschiedene Dosisbegriffe:

- Die Ionendosis in Coulomb pro kg (C/kg): Ladungsmenge, welche in 1 kg Luft erzeugt wurde.
- Die absorbierte Dosis in Gray (Gy): Energiemenge der Strahlung, welche in 1 kg Substanz absorbiert wurde.
- Die Äquivalentdosis in Sievert (Sv): absorbierte Energie pro kg Körpergewebe multipliziert mit einem Strahlenwichtungsfaktor, welcher die biologische Wirkung der verschiedenen Strahlenarten berücksichtigt.
- Die effektive Dosis in Sievert: Summe der Äquivalentdosen der einzelnen Organe, multipliziert mit einem Wichtungsfaktor, welcher die unterschiedliche Strahlensensibilität der einzelnen Organe bzw. Gewebe berücksichtigt.

Die effektive Dosis lässt sich sowohl für eine externe wie interne Bestrahlung (bei Inkorporation) berechnen. Diese gewichtete Ganzkörperdosis ist direkt proportional zum Krebsrisiko und deshalb für biologisch-medizinische Betrachtungen die relevante Grösse. Sie ist deshalb auch die für den Strahlenschutz wichtigste Messgrösse.

Für die Messung der in einem äusseren Strahlenfeld akkumulierten effektiven Dosis werden Dosimeter einer anerkannten Personen-Dosimetriestelle eingesetzt.

Die aufgrund einer inneren Bestrahlung resultierende effektive Dosis wird indirekt via Aktivitätsmessung bestimmt. Die Aktivität ist die Anzahl Zerfälle pro Zeiteinheit, die in einer radioaktiven Quelle stattfinden. Die Einheit der Aktivität ist das Becquerel ($1 \text{ Bq} = 1$ Zerfall pro Sekunde). Anhand des durch die Messung bestimmten Radionuklids und deren Aktivität lässt sich mit Hilfe von Stoffwechselmodellen die effektive Folgedosis E_{50} berechnen (die effektive Dosis, die aufgrund einer Aufnahme eines Radionuklids in den Körper im Verlauf von 50 Jahren akkumuliert wird). Die Messintervalle und Messmethoden sind in der Verordnung über die Personendosimetrie (9) geregelt.

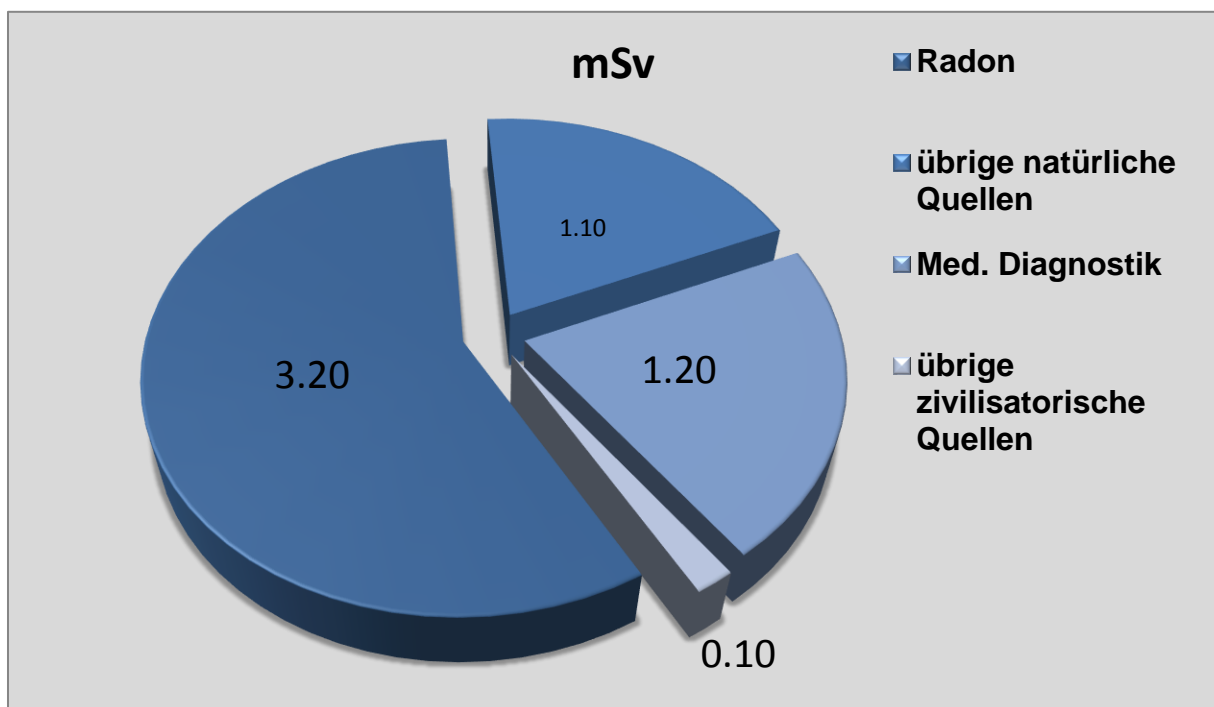
2 Nichtberufliche und berufliche Strahlenexposition

Alle Menschen sind dauernd ionisierender Strahlung ausgesetzt. Die Strahlung stammt dabei aus natürlichen und zivilisatorischen Strahlenquellen.

Aufgrund ihrer Tätigkeit galten in der Schweiz 2014 ca. 96'000 Arbeitnehmende als beruflich strahlenexponiert. Die Mehrzahl arbeitet im Gesundheitswesen.

2.1 Nichtberufliche Exposition

Die nichtberufliche Strahlenexposition erfolgt durch die natürliche Strahlung aus der Umgebung (z.B. Nahrung, Untergrund, Kosmos) und durch die Belastung aus zivilisatorischen Strahlenquellen. Bei letzterer spielt die medizinische Anwendung ionisierender Strahlung gegenüber anderen Quellen in bevölkerungsbezogener Perspektive die weitaus grösste Rolle. Die radioaktiven Einwirkungen aus den oberirdischen Kernwaffenversuchen und aus den Reaktorunfällen (Tschernobyl, Fukushima) sind hinsichtlich ihres Beitrags zur Gesamtstrahlenexposition vernachlässigbar, da sie im Dosisbereich von wenigen Hundertstel mSv liegen.



Figur 1: Mittlere Jahresdosen der schweizerischen Bevölkerung gemäss (1).

2.2 Berufliche Exposition

Als beruflich strahlenexponiert gilt, wer in seiner beruflichen Tätigkeit oder bei seiner Ausbildung durch eine kontrollierbare Strahlung eine effektive Dosis von mehr als 1 mSv pro Jahr akkumulieren kann oder regelmässig in kontrollierten Zonen arbeitet oder ausgebildet wird (3). Personen unter 16 Jahren dürfen nicht beruflich strahlenexponiert werden, für Jugendliche sowie Schwangere und Stillende gelten besondere Schutzbestimmungen.

Eine berufliche Exposition kann vorhanden sein aufgrund der gezielten Anwendung ionisierender Strahlung in der Industrie, in Kernanlagen oder im Gesundheitswesen. Beispiele dafür sind Arbeiten

- mit radioaktiven Stoffen als Marker bei biochemischen Untersuchungen
- mit Bestrahlungsgeräten für Materialprüfungen und -bearbeitung
- in Kernanlagen
- mit Bestrahlungsgeräten oder Nukliden in der Medizin

Sie kann aber auch durch berufliche Tätigkeiten im Umfeld erhöhter natürlicher Strahlung oder durch verschleppte Strahlenquellen auftreten.

Beispiel dafür sind Arbeiten

- beim Tunnelbau und im Bergbau
- mit längeren Aufenthalten in unterirdischen Hohlräumen
- in der Abfallwirtschaft
- in der Luftfahrt

Dabei gelten heute diese Arbeitnehmende gemäss o.g. Definition als nicht beruflich strahlenexponiert im Sinne des Gesetzes.

2.3 Möglichkeiten einer Exposition

Wenn die Strahlenquelle sich ausserhalb des menschlichen Körpers befindet kann es zu einer äusseren Bestrahlung kommen, die je nach Art der Strahlung mit vollständiger Energieübertragung in den Körper unterschiedlich tief eindringt (Prinzip der Strahlentherapie) oder diesen ganz durchdringt und dabei mit dem durchstrahlten Gewebe in Wechselwirkung tritt (Prinzip des Röntgens).

Die andere Möglichkeit der Exposition ist die innere Bestrahlung aufgrund einer Inkorporation. Dabei nimmt der exponierte Organismus die radioaktiven Stoffe durch Inhalation, Ingestion oder durch die Haut (beschädigt oder unbeschädigt) in sich auf. Je nach Radionuklid und chemische Verbindung werden diese dann im Organismus eingelagert (Strontium in die Knochen), passiv verteilt (Tritium im Körperwasser) oder sie wird in die Stoffwechselforgänge integriert und kann sich dabei im Körper unterschiedlich verteilen. Ein Beispiel sind die Jodisotope die entweder therapeutisch gezielt oder nach unfallartiger Freisetzung in den Organismus aufgenommen und in der Schilddrüse konzentriert werden. Die Schilddrüse ist in diesem Fall sozusagen das "Zielorgan" des Jodisotops.

Es kann auch vorkommen, dass aus einer Strahlenquelle radioaktive Nuklide oder Moleküle freigesetzt werden. Diese können sich in Partikelform am Körper oder in der Bekleidung festsetzen und verursachen damit eine Kontamination mit der Möglichkeit einer äusseren und auch einer inneren Bestrahlung.

2.4 Sonderfall Radon

Radon ist ein natürliches radioaktives Edelgas und entsteht als Folgeprodukt in der Zerfallsreihe von Uran, das von Natur aus im Boden vorhanden ist. Die Radonfolgeprodukte sind auch radioaktiv, haften an Schwebeteilchen in der Luft und können somit inhaliert werden. Die Strahlung von Radon und insbesondere von seinen Folgeprodukten kann zu einer Schädigung der Lunge führen. Radon gilt nach dem Rauchen als zweithäufigste Ursache von Lungenkrebs.

Radon ist geruch- und farblos und kann sich in Räumlichkeiten aufkonzentrieren. Daher ist der beruflich bedingte Aufenthalt an Orten mit hohen Radonkonzentrationen mit einer Strahlenbelastung verbunden, auch wenn die Mitarbeitenden gemäss aktueller Gesetzeslage nicht als beruflich strahlenexponiert gelten. Für die Radonkonzentration am Arbeitsplatz gilt zurzeit ein über die monatliche Arbeitszeit gemittelter Grenzwert von 3'000 Becquerel/m² (StSV, Art. 110).

Arbeitsplätze mit potentiell hohen Radonkonzentrationen befinden sich insbesondere:

- in Wasserwerken
- im Untertagebau
- in Militäranlagen

3 Biologische Wirkung ionisierender Strahlung

Die Energie ionisierender Strahlung reicht aus chemische Bindungen zu spalten bzw. Moleküle zu ionisieren. Dies geschieht entweder direkt durch Partikelstrahlung oder indirekt durch Energieübertrag von Photonen (Gammastrahlung, Röntgenstrahlung) oder von schnellen Neutronen auf Elektronen und Atomkerne der körpereigenen Moleküle

3.1 Stochastische und Deterministische Strahlenwirkungen

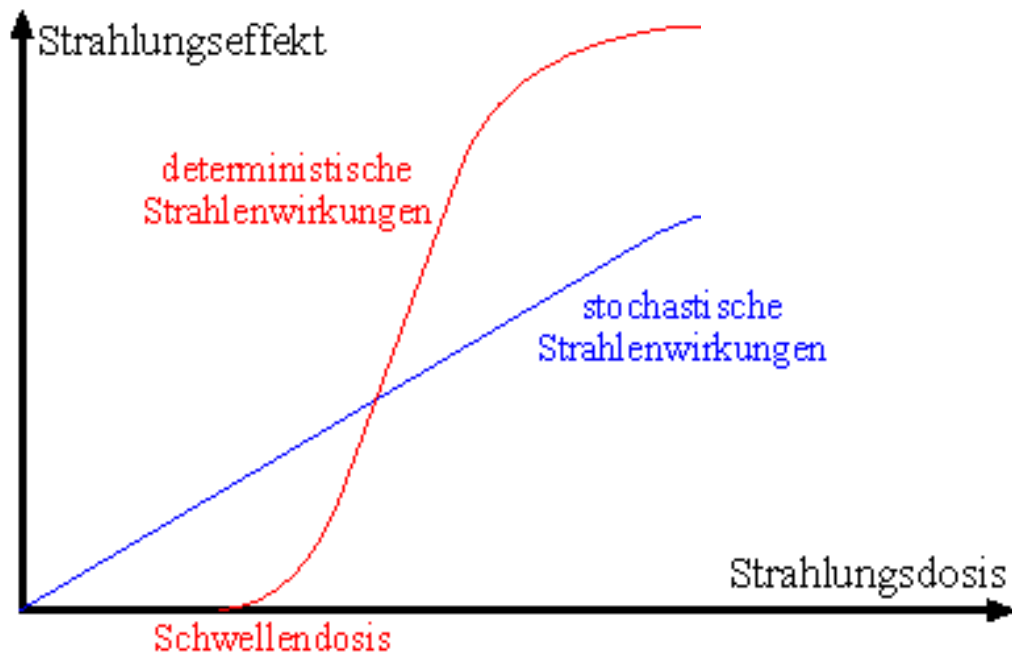
Die oben genannten biologischen Mechanismen liegen den beiden Arten von Strahlenschäden zugrunde, die man unterscheidet:

stochastische Strahlenwirkungen:

Dies sind die Folgen der DNA-Schädigungen, vor allem maligne Tumore (11). Für stochastische Wirkungen gibt es keinen Schwelleneffekt, allerdings hängt die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von der Dosis ab.

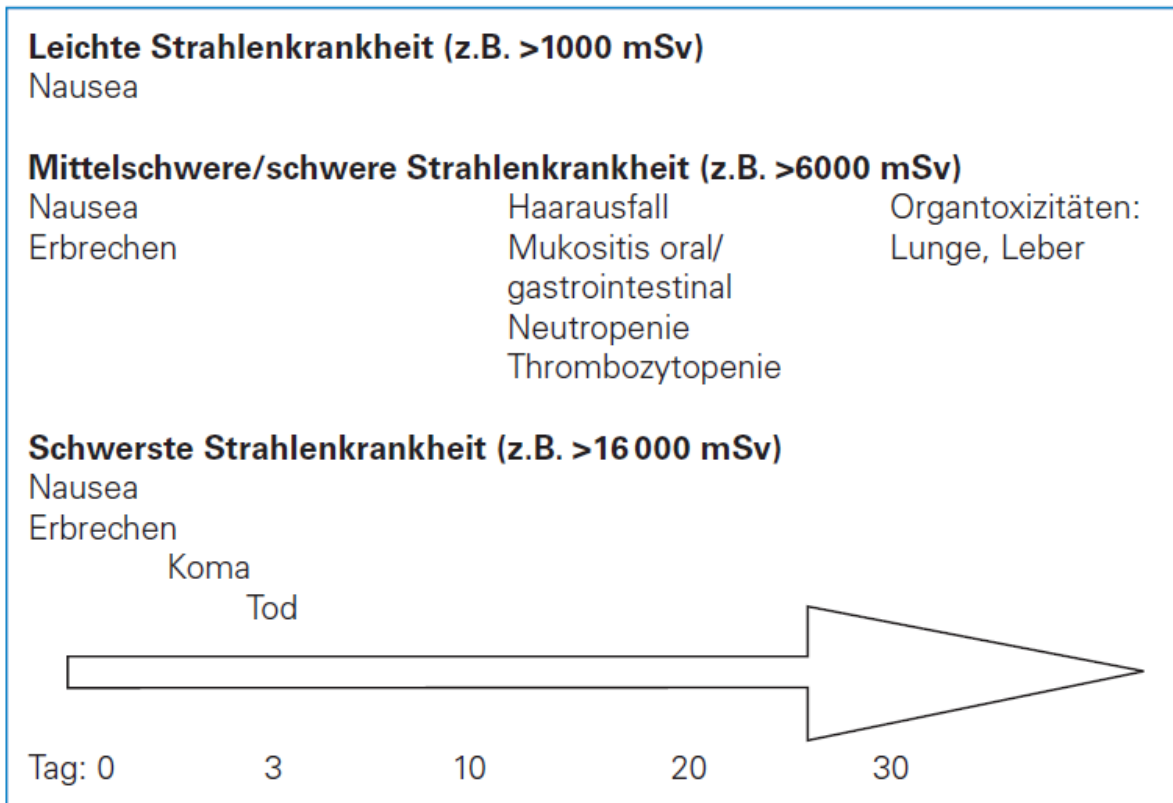
deterministische Strahlenwirkungen (akute Strahlenkrankheit):

Folgen der Schäden an allen Zellstrukturen der bestrahlten Körperteile oder des Gesamtorganismus. Eine Wirkungsschwelle für objektive gesundheitliche Schädigungen ist vorhanden. Ionisierende Strahlen führen eher nicht zum sofortigen Zelltod sondern zum Verlust der Teilungsfähigkeit.



3.2 Strahlenunfall und Behandlung (Überblick)

Der Beginn und Verlauf der Gesundheitsstörungen sind im Wesentlichen von der absorbierten Dosis und damit vom Anteil der funktionierenden Zellen sowie von der noch erhaltenen Fähigkeit der geschädigten Zellen zur Reparatur abhängig. Je höher die absorbierte Dosis desto rascher treten unterschiedliche Störungen als Syndrom auf. Dabei sind die Gewebe im Körper unterschiedlich strahlensensibel: Je kürzer die Lebenszeit der Funktionszellen in den Organen und je kleiner der Pool der gesunden Stammzellen desto schneller entwickelt sich der Funktionsschaden des Organs. Aus diesem Grund bezieht man beim medizinischen Management eines Strahlenunfalls nicht nur die Höhe der Dosis ein, sondern versucht in der auf die Notfallversorgung folgende Phase auch mittels eines komplexen Systems von organspezifischen Scores den individuellen Status eines Verletzten zu berücksichtigen. Stehen nach unfallartigen Ereignissen mit der Folge eines schweren Strahlensyndroms mit Multiorganversagen eingreifende therapeutische Entscheidungen an (z.B. Stammzelltransplantation), so stehen auch IT-gestützte Expertensysteme zur Verfügung (5;6).



Figur 3: Strahlenkrankheit - Symptome und deren zeitliche Abfolge

4 Schutz der Arbeitnehmenden vor ionisierender Strahlung in der Schweiz

Der Gebrauch von und der Umgang mit ionisierenden Strahlen ist in der Schweiz genauso wie in anderen Ländern stark reguliert (2;3;9;).

4.1 Bewilligung und Aufsicht für Betriebe

Ein Unternehmen, das in der Schweiz mit ionisierender Strahlung umgeht oder das Beschäftigte in einem anderen Betrieb als seinem eigenen (z.B. Personalverleiher) als beruflich strahlenexponierte Personen einsetzt braucht eine behördliche Bewilligung. Diese wird nur erteilt, wenn u.a. im Betrieb ein Strahlenschutz-Sachverständiger mit einer anerkannten Ausbildung im Strahlenschutz vorhanden ist. Die Bewilligungsbehörden sind:

- Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) im Gesundheitswesen, Forschung und Industrie
- Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) für den Bereich der Kernanlagen

Bei der Aufsicht über die Durchführung des Strahlenschutzes kommt als zusätzliche Institution noch die Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva) ins Spiel, die für Industrie und Gewerbe, sowie für private Forschungsinstitute die Aufsichtsbehörde ist.

Das BAG übt die Aufsicht über die Anwendung ionisierender Strahlen im Gesundheitswesen und in der öffentlichen Forschung aus. Das ENSI ist Aufsichtsbehörde für den Strahlenschutz in Kernanlagen. Abzugrenzen davon ist die Aufsicht über Umsetzung der sonstigen Bestimmungen zur Verhütung von Unfällen und Berufskrankheiten, deren Aufsichtsorgane in der Verordnung über die Verhütung von Unfällen und Berufskrankheiten geregelt sind.

4.2 Persönliche Dosimetrie

Der Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen (siehe 2.2.) aus kontrollierbaren Strahlenquellen ist auf 20mSv/Jahr Ganzkörperexposition festgesetzt. Die Teilkörperdosisgrenzwerte sind 150 mSv/Jahr für die Augenlinse und 500 mSv/Jahr für Haut, Hände oder Füsse. Bei beruflich strahlenexponierten Personen ist die Exposition mit einer geeigneten persönlichen Dosimetrie zu erfassen und die Belastungswerte sind durch eine anerkannte Personendosimetriestelle zu bestimmen. Die Dosiswerte erhält der Bewilligungsinhaber zur Kenntnis.

Der Strahlenschutzsachverständige des Betriebes addiert am Jahresende, oder beim Ausscheiden der betroffenen Person aus dem Beschäftigungsverhältnis die Monatsdosen und überträgt die kumulierte Dosis in das persönliche Dosisdokument. Der Arbeitnehmende erhält das Dokument bei Bedarf (z.B. Auslandseinsatz) ausgehändigt.

Bei der Überwachung von Arbeitnehmenden mit Gefährdung durch eine Inkorporation (Radionuklidanwendungen wie Labor oder Nuklearmedizin) wird die Dosimetrie mittels eines Biological Monitorings des Urins ergänzt.

In der Schweiz werden alle Daten der persönlichen Dosimetrie im Zentralen Dosisregister (ZDR) gesammelt und dort mindestens 100 Jahre aufbewahrt.

4.3 Arbeitsmedizinische Vorsorge

4.3.1 Allgemeines

Die medizinische Überwachung von beruflich strahlenexponierten Arbeitnehmenden ist in Art. 13 des Strahlenschutzgesetz gesetzlich geregelt und liegt in der Kompetenz der Suva. Die arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen der Suva haben gemäss Artikel 70 der VUV (10) das Ziel Unfälle und Berufskrankheiten zu verhüten.

Bei der arbeitsmedizinischen Vorsorge auf der Grundlage von VUV Art 70ff kann lediglich eine mögliche Selbstgefährdung Berücksichtigung finden. Aspekte der Betriebssicherheit oder der Fremdgefährdung fliessen beim Eignungsentscheid der Suva nicht mit ein (z.B. Herzinfarktrisiko eines Reaktoroperateurs im Kernkraftwerk wegen zu hohem Blutdruck). Diese Aspekte hat der Anlagenbetreiber zu berücksichtigen und auf der Grundlage einer betrieblichen Risikoanalyse und den daraus abgeleiteten Anforderungen an die Mitarbeitenden zu klären. Im Bereich der Kernanlagen regeln auch noch die "Verordnung über die Anforderungen an das Personal von Kernanlagen" (VAPK) und die "Verordnung über die Betriebswachen von Kernanlagen" (VBWK) gewisse Aspekte und fordern eine ärztliche Beurteilung.

Im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchung der Suva wurden ab 1963 alle beruflich strahlenexponierte Personen regelmässig untersucht und die gewonnenen Befunde beurteilt. Weil sich im Laufe der Jahre zeigte, dass erstens überhaupt wenige Berufskrankheiten wegen ionisierender Strahlung entstehen und diese noch viel seltener durch eine Vorsorgeuntersuchung erkannt wurden, stellte die Suva im Jahr 2016 die flächendeckende medizinische Untersuchung ein. Nach Unfällen mit erhöhter Exposition gegenüber ionisierenden Strahlen oder auf Anordnung von Durchführungsbehörden entscheidet die Abteilung Arbeitsmedizin der Suva individuell über medizinische Untersuchungen.

5 Störfälle im Betrieb - Dosisüberschreitungen

Auch im Regelbetrieb einer Anlage mit ionisierender Strahlung oder bei Aufenthalt in strahlungsbelasteten Bereichen müssen sich Arbeitnehmende durch Schutzausrüstung und Verhalten gegen vermeidbare Belastungen schützen. Dabei finden die 4-A Prinzipien des Strahlenschutzes Anwendung:

- Abstand vergrössern
- Abschirmung verwenden
- Aufenthaltszeit verringern
- Aufnahme (von Radionukliden) vermeiden

Dennoch kann es zu regelwidrigen Zuständen mit erhöhter Strahlenbelastung kommen, die als "Störfälle" bezeichnet werden.

Ein Störfall liegt dann vor, wenn eine Anlage vom bestimmungsgemässen Betrieb abweicht und die Sicherheit beeinträchtigt wird (gemäss StSV, Anhang 1). Es werden drei Kategorien von Störfälle definiert:

- Wenn eine Überschreitung des Jahres-Dosisgrenzwertes für nichtberuflich strahlenexponierte Personen (1 mSv) ausgeschlossen werden kann, dann spricht man von technischem Störfall;
- Bei einem radiologischen Störfall muss hingegen mit einer Überschreitung des Dosisgrenzwertes für nichtberuflich strahlenexponierte Personen oder eines Immissionsgrenzwertes (gemäss Art. 102 der StSV) gerechnet werden;
- Ein Strahlenunfall liegt vor, wenn bei einem radiologischen Störfall eine Person eine effektive Dosis von mehr als 50 mSv akkumuliert hat.

Schon bei Verdacht auf eine unzulässige Strahleneinwirkung sind Massnahmen von den Betroffenen und vom Betrieb zu treffen:

Sofortmassnahmen

Die Notdienst wird falls notwendig innerhalb weniger Minuten alarmiert (Sanität, Polizei oder Feuerwehr). Die Bestrahlung muss nach Möglichkeit unterbrochen werden (Anlage ausschalten, Strahlenquelle abschirmen, Verlassen des Gefahrenbereiches, usw.). Im Brandfall (sofern ohne Risiko möglich) muss das Feuer gelöscht und die Strahlenquelle aus dem Gefahrenbereich entfernt werden. Gefährdete Personen und sich selbst in Sicherheit bringen und eventuelle lebensrettende Erste Hilfe Massnahmen durchführen. Der Gefahrenbereich muss provisorisch abgesperrt werden.

Bewältigung und Meldung an die Aufsichtsbehörde

Ausschliesslich bei innerbetrieblichen, technischen Störfällen, die durch die betriebsinternen Stellen beherrscht werden können und keinerlei Gefahr bei Verzögerung vorliegt, genügt eine umgehende Meldung an die Aufsichtsbehörde während der regulären Arbeitszeit.

Alarmierung

Bei einem Störfall, den der Betrieb selbst nicht mehr beherrschen kann, orientiert er die Alarmstelle der Nationalen Alarmzentrale (ASN), welche die Nationale Alarmzentrale (NAZ) alarmiert. Von dieser wird eine Pikett-Organisation betrieben. Ein Fachmitarbeiter für den Strahlenschutz kann von der ASN jederzeit erreicht werden. Er ist für Lagebeurteilung, Entscheid über Sofortmassnahmen und Orientierung anderer Stellen zuständig.

Je nach Entscheid der NAZ wird durch die ASN eine Einsatzgruppe aufgebildet. Dies kann z.B. das Strahlenschutzpikett des Paul Scherrer Institutes (PSI) in Würenlingen sein.

Zuerst unter der Leitung der Einsatzgruppe, dann nach Anweisung der Aufsichtsbehörde wird der Störfall behoben. Dekontamination, Entsorgung und weitere Massnahmen können angeordnet werden. Unterstützen können diese Arbeiten auch die Lieferanten der Strahlenquellen, denn sie verfügen oft über spezielle Abschirmbehälter, Werkzeuge und das notwendige Fachwissen.

Dosimetrie

Die anlässlich des Störfalles akkumulierten Dosen der betroffenen Personen sind anhand der Expositionszeit und der Dosisleistung abzuschätzen. Die Dosimeter, falls vorhanden, sind der Dosimetriestelle zur Auswertung zu übergeben.

Sind Arbeitsnehmende betroffen, muss die Suva, Abteilung Arbeitsmedizin über die getroffenen Massnahmen informiert werden. Sie ordnet eventuelle Folgeuntersuchungen an und überprüft die weitere Eignung für die berufliche Strahlenexposition.

Folgende Massnahmen sind zu treffen:

- Liegt die abgeschätzte akkumulierte Dosis zwischen 50 und 250 mSv so wird eine ärztliche Kontrolle vorgeschrieben (möglichst innerhalb von 24 Stunden);
- Bei Dosen zwischen 250 und 1000 mSv muss innerhalb von 24 Stunden eine Abklärung einer möglichen Schädigung in einem Regionalspital durchgeführt werden;
- Wird eine Dosis von mehr als 1000 mSv akkumuliert, so ist unverzüglich eine Einweisung in ein Universitätsspital oder ein Spital mit strahlentherapeutischen Einrichtungen notwendig.

Weitere detaillierte Informationen für spezielle Fragestellungen finden sich in der Suva Broschüre "Der Strahlenunfall" (9).

6 Quellenverzeichnis

- 1) Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz
Ergebnisse 2011. Bundesamt für Gesundheit. Liebefeld
BAG-Publikationsnr. VS 04.12 40EXT1208 1'000 df-kombi 287731
- 2) Strahlenschutzgesetz SR 814.50; Stand 1.1.2007
http://www.admin.ch/ch/d/sr/c814_50.html
- 3) Strahlenschutzverordnung SR 814.501; Stand 1.1.2012
http://www.admin.ch/ch/d/sr/c814_501.html
- 4) National Research Council, 2006. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation. National Academy of Sciences.
<http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=030909156X>
- 5) Koenig et al.: Medical treatment of radiological casualties: current concepts. Ann Emerg Med. 2005; 45: 643-652.
- 6) Weinstock et al.: Radiologic and nuclear events: contingency planning for hematologists/oncologists. Blood 2008; 111: 5440-5445.
- 7) Passweg et al: Medizinische Folgen der Strahlenexposition, Strahlenkrankheit und deren Behandlung.
Schweiz Med Forum 2011; 11:512-514
- 8) Verordnung über die Personendosimetrie SR 814.501.43; Stand 1.1.2008
http://www.admin.ch/ch/d/sr/814_501_43/index.html
- 9) Der Strahlenunfall.
Suva Reihe Arbeitsmedizin Nr. 21. Suva Nr. 2869/21
- 10) Verordnung über die Verhütung von Unfällen und Berufskrankheiten
SR 832.30; Stand 1.Juli 2010
http://www.admin.ch/ch/d/sr/c832_30.html
- 11) A review of human carcinogens. Part D: Radiation / IARC Working group on the evaluation of carcinogenic risks to humans (2009: Lyon, France)

Kontaktadressen:

Suva
Abteilung Arbeitsmedizin
Fluhmattstr. 1
6002 Luzern
Tel.: +41 41 419 52 78

Suva
Abteilung Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz
Bereich Physik
Rösslimattstr. 39
6002 Luzern
Tel.: +41 41 419 61 33

Bundesamt für Gesundheit
Abteilung Strahlenschutz
3003 Bern
Tel.: +41 31 322 96 14

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
Industriestrasse 19
5200 Brugg
Tel.: +41 56 460 84 00