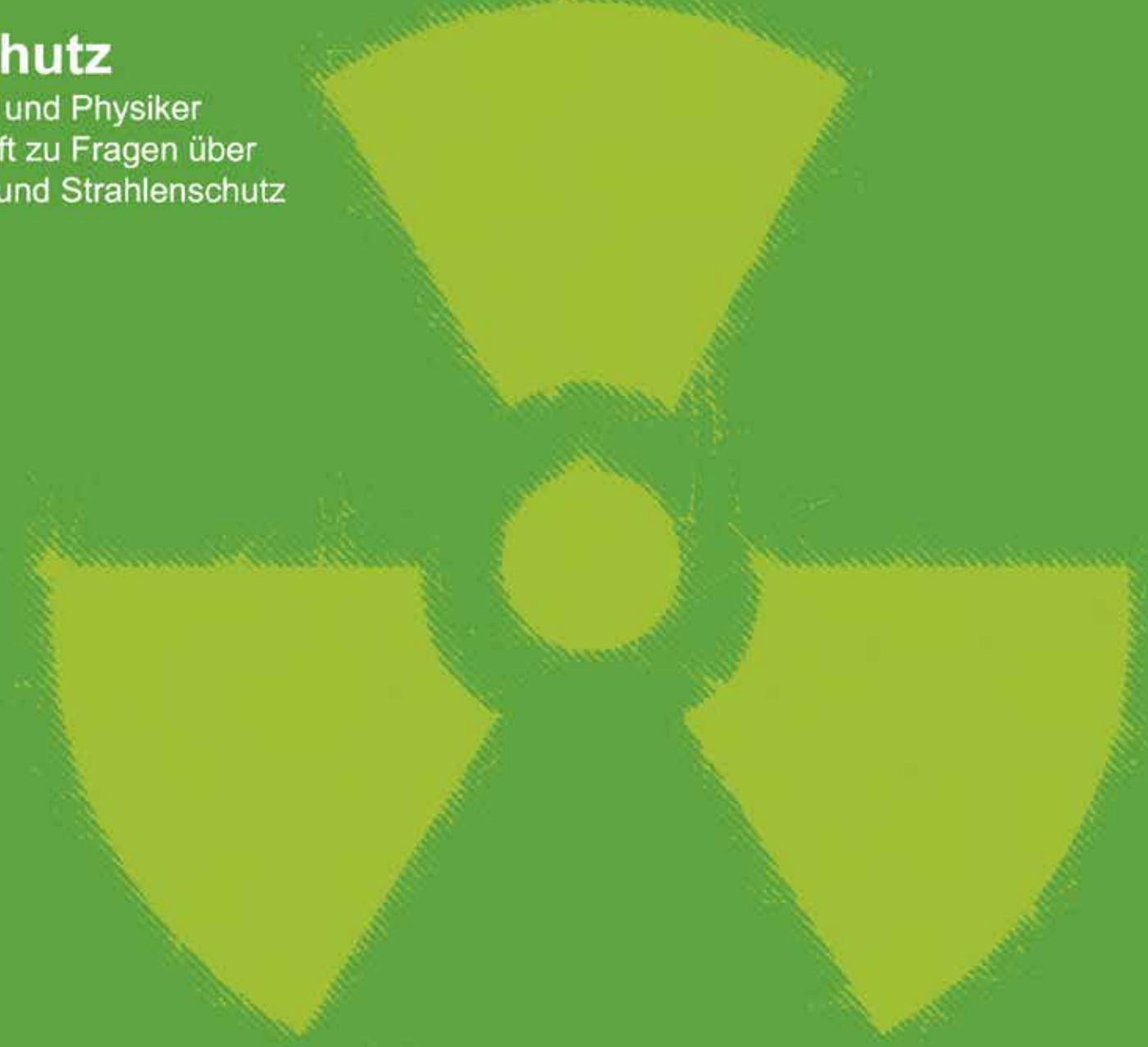


## Strahlenschutz

Physikerinnen und Physiker  
geben Auskunft zu Fragen über  
Radioaktivität und Strahlenschutz

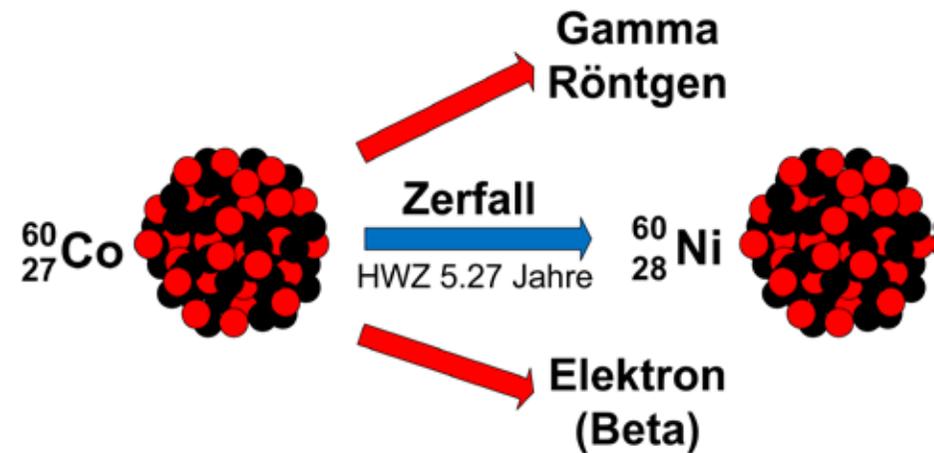


# Radioaktivität

**Die Radioaktivität wurde 1896 von Becquerel am Uran entdeckt.**

Radioaktivität ist die Eigenschaft bestimmter Atomkerne, sich in einen stabileren Zustand und somit in andere Atomkerne umzuwandeln. Dabei senden sie eine charakteristische Strahlung aus. Radioaktive Elemente (Radionuklide) kommen natürlich vor. Die Maßeinheit für Radioaktivität ist Becquerel oder Anzahl der Zerfälle pro Sekunde. Die alte Einheit Curie (benannt nach Marie und Pierre Curie) entspricht 37 Mrd. Becquerel oder der Aktivität von einem Gramm Radium.

Beispielsweise zerfällt Radium-226 unter Aussendung von Alphastrahlen, während Iod-131 oder Kobalt-60 Betastrahlen emittiert. Bei diesen Beispielen wird außerdem Gammastrahlung emittiert.



Quelle | Bild: Radioaktiver Zerfall von Kobalt zu Nickel © Öko-Institut e.V.

Wenn wir in Jahrmilliarden denken könnten ...

Irgendwann ist theoretisch kein radioaktiver Stoff mehr vorhanden, weil sie sich alle in stabile Stoffe umgewandelt haben!

# Mülltrennung

- **Hochradioaktive Abfälle** erzeugen aufgrund ihrer hohen Aktivität erhebliche Zerfallswärme.
- **Mittelradioaktive Abfälle** erfordern Abschirmungsmaßnahmen, aber kaum oder gar keine Kühlung.
- **Schwachradioaktive Abfälle** erfordern bei Handhabung oder Transport deutlich geringere Abschirmung.

Die Mülleigenschaften erfordern unterschiedliche Behandlung.



Quelle | Bild: Raltheber

# Halbwertszeit

Atomkerne wandeln sich verschieden schnell in andere Kerne um. Die Zeit, in der sich in einer vorgegebenen Menge die Hälfte der Atomkerne umwandelt, wird Halbwertszeit genannt.

Also ist nach 10 Halbwertszeiten noch  $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = 1/1024$  eines radioaktiven Elements vorhanden.

Es sind Halbwertszeiten von mehreren Milliarden Jahren bis zu millionstel Sekunden bekannt.

Beispiel: Plutonium 239 (entsteht als Aktinid im Kernreaktor) hat eine Halbwertszeit von ca. 24.000 Jahren. Von einem Kilogramm ist nach 10 Halbwertszeiten (240.000 Jahre) noch ein Gramm erhalten.

## Überlegt einmal:

Was hat die Menschheit eigentlich vor 2.400 Jahren gemacht?

Könnt Ihr Euch vorstellen, was für eine Gesellschaft wir in 100 Jahren haben werden?

Wie sah die Welt vor 240.000 Jahren aus?



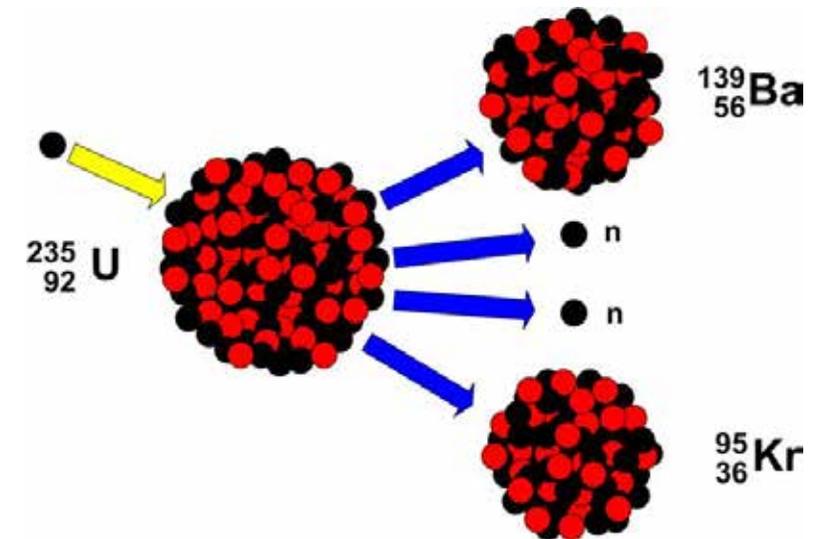
Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.

# Energiefreisetzung

Bei der Verbrennung von einem Kilogramm Kohlenstoff zu  $\text{CO}_2$  entstehen 9,1 Kilowattstunden Energie und bei der vollständigen Spaltung von einem Kilogramm Uran-235 entstehen 24 Millionen Kilowattstunden Energie. Das ist 2.637.363 mal so viel.

Die Energie bei der Kernspaltung setzt sich zusammen aus: Bewegungsenergie der Spaltprodukte und der Neutronen, Energie der Gamma-Strahlung, Energie aus radioaktivem Zerfall und Energie der Neutrinos.

**93% der Energie** werden bei der Spaltung freigesetzt Die restlichen 7% entstehen erst in der Folgezeit durch radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte (Nachzerfallswärme).



Quelle | Bild: Spaltung von Uran 235 in Barium und Krypton © Öko-Institut e.V.

$$E = m \cdot c^2$$

Einstein entdeckte, dass Masse und Energie ineinander umwandelbar sind. Bei Atomspaltung wird die Masse z.T. als Energie frei.

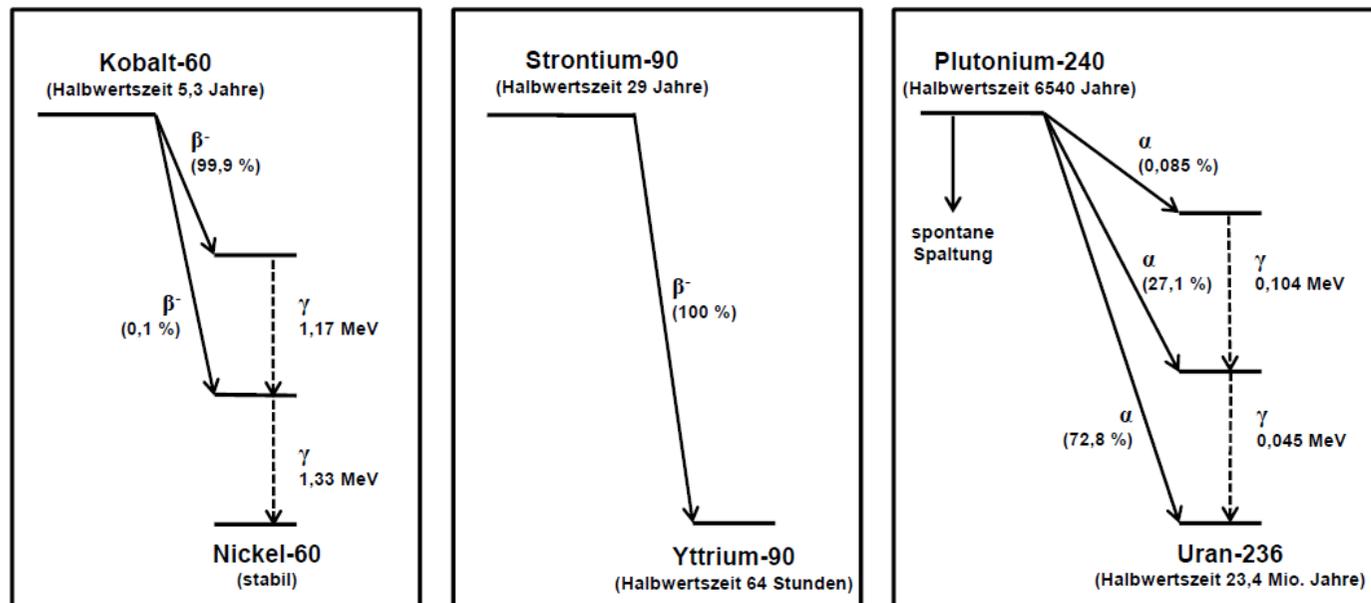
# Strahlung beim Zerfall von radioaktiven Atomkernen

**Alpha:** Meist sind es schwere Atomkerne, die beim Zerfall ein Alphateilchen ausstoßen. Das Alphateilchen besteht aus zwei Neutronen und zwei Protonen. Es entspricht also einem Heliumkern. Alpha-Strahlung ist eine Teilchenstrahlung.

**Beta:** In einem Atomkern wandelt sich ein Neutron in ein Proton oder umgekehrt um. Dabei entstehen Elektronen oder Positronen, die als Teilchen-(Beta-)Strahlung abgegeben werden.

**Gamma:** Bei Zerfallsprozessen wird darüber hinaus masselose Energie in Form von Gamma-Strahlung frei.

Bei der Spaltung von Atomkernen werden außerdem Neutronen als Neutronenstrahlung frei.



Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.

Die Heliumkerne der Alpha-Strahlung sind viel größer als Elektronen der Beta-Strahlung.  
Können Sie daraus Schlüsse ziehen?

# Charakterisierung von Strahlungsarten

**Alpha-Strahlung:** wirkt nur auf kurze Entfernung. Sie kann Haut nicht gut durchdringen und einfach abgeschirmt werden. Sie ist aber sehr gefährlich, wenn sie über Atemluft, Nahrung oder Wunden aufgenommen wird.

**Beta-, Gamma- oder Neutronenstrahlung** dringen auch über große Entfernung in den Körper ein.

**Beta-Strahlung** kann durch wenige Millimeter dicke Schichten Metall oder Beton abgeschirmt werden.

**Gamma-Strahlung** kann den menschlichen Körper durchdringen und gibt dabei einen Teil ihrer Energie ab. Abschirmung gelingt nur durch sehr dicke Schichten aus Beton oder Wasser.

**Neutronen** haben in Luft eine sehr hohe Reichweite, die aber in Wasser und Materie stark verringert wird.

## Beispiel:

Im Brennelementbecken eines Kernkraftwerkes schirmen mehrere Meter Wassersäule die gelagerten abgebrannten Brennelemente ab. Die Becken sind nach oben offen.



Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.

# Strahlung ≠ Strahlung

Bei der Erfassung der Strahlungswirkung wird unterschieden:

- die Strahlungsenergie (wie stark die Strahlung ist),
- die Strahlungsart (bei Gamma-Strahlung ist 1 Gray = 1 Sv, für Neutronenstrahlung ist die biologische Wirkung größer),
- ob die Strahlung von außen auf den Menschen oder von innen wirkt, wie sie aufgenommen wurde und wie lange sie im Körper bleibt (biologische Halbwertszeit),
- auf welche Organe die Strahlung wirkt.

Um die Wirkung von Strahlung vergleichbar zu machen, wird die Strahlungsenergie mit Qualitätsfaktoren gewichtet. Das Ergebnis wird mit verschiedenen Dosisbegriffen in der Einheit Sievert (Sv) angegeben. Wenn beispielsweise in Zeitungsartikeln von Dosis für Menschen gesprochen wird, ist meist die Äquivalentdosis in Sievert gemeint.

Bei der äußeren Strahlenbelastung geht es um die Strahlung, die von außen wirkt. Bei der inneren wird unterschieden, ob die Aufnahme über die Nahrung oder die Atemluft erfolgt. Nimmt ein Körper Radionuklide auf, verbleibt das Nuklid einige Zeit im Körper und gibt über seine Aufenthaltszeit Strahlung ab, die auf das Gewebe wirkt.

Die Strahlungsenergie, die auf uns wirkt, wird in Joule/kg oder Gray angegeben.

Mit Sievert (Sv) wird ausgedrückt, wie die absorbierte Strahlungsenergie biologisch wirkt.

# Natürliche Strahlenbelastung

Der Mensch wird durch natürliche Radioaktivität belastet. Dabei macht die innere Belastung durch Radium und seine Folgeprodukte (wie das Edelgas Radon) den größeren Anteil aus, da es sich hier um ein sehr häufiges Element in der Erdkruste handelt. Zusätzlich zu der natürlichen Strahlung sind viele Menschen durch Flüge und Röntgenstrahlen belastet (zivilisatorische Strahlenbelastung).

*„Alle Lebewesen sind permanent ionisierender Strahlung aus natürlichen Quellen ausgesetzt. Diese umfassen die kosmische Strahlung, kosmogene und terrestrische Radionuklide (...). UNSCEAR, die Expertenkommission der Vereinten Nationen, hat geschätzt, dass die natürliche Strahlenexposition im weltweiten Mittel 2,4 mSv im Jahr beträgt mit einem typischen Bereich zwischen 1 und 10 mSv pro Jahr. Die Lebenszeitdosen liegen zwischen 100 und 700 mSv. Zusätzliche Strahlenexpositionen können als niedrig bezeichnet werden, wenn sie im Bereich der natürlichen Strahlenexposition von einigen mSv pro Jahr liegen.“*

*(Strahlenschutzkommission 2006)*

An einem durchschnittlichen Ort in Deutschland wirken auf eine Person 2,1 Millisievert (mSv) natürliche Strahlung und 1,9 Millisievert (mSv) zivilisatorische Strahlung pro Jahr (Daten von 2010 gemäß BfS).

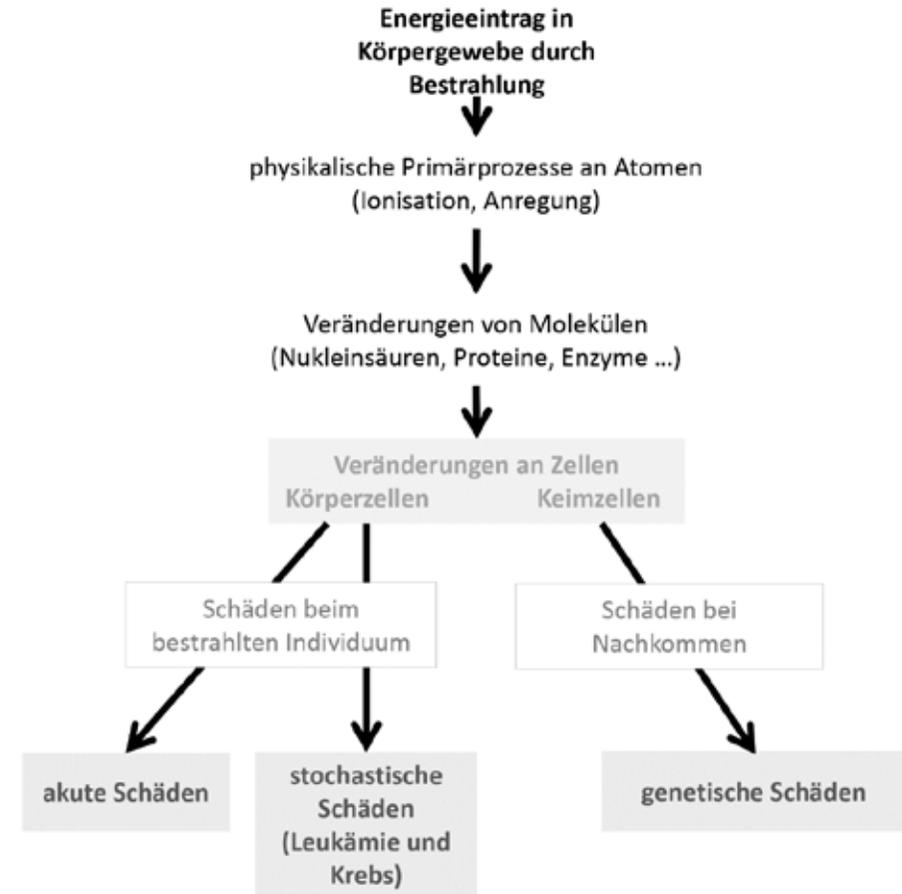


Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.

# Strahlenfolgen im Überblick

„Die Wechselwirkung ionisierender Strahlung (...) mit lebender Materie kann Zellen schädigen, wobei diese sterben oder verändert werden können. (...) Man unterscheidet deterministische Schäden, (Bei hohen Strahlendosen: Zusammenhang zwischen Schwere der Erkrankung und Dosis), und stochastische Schäden (Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens und Dosis). Zu den deterministischen Schäden gehören Fröhschäden wie Hautrötung, Haarausfall, akute Strahlenkrankheit. Auch Fehlbildungen nach Bestrahlung im Mutterleib sind deterministische Schäden. Stochastische Schäden sind Krebserkrankungen bei den bestrahlten Individuen und genetische Schäden bei deren Nachkommen. Bisher wurde für derartige Schäden kein Schwellenwert der Dosis beobachtet. Es wird angenommen, dass ionisierende Strahlung die Krebshäufigkeit proportional zur Strahlendosis und zur spontanen Inzidenzrate erhöht.“

(Strahlenschutzkommission 2006)



Quelle | Bild: © Öko-Institut e.V.

Effekte radioaktiver Strahlung sind Ionisation, Radikalbildung und Strangbrüche an der DNS.  
Genetische Schäden wirken sich erst bei den Nachkommen und bis zu zwei Generationen aus.

# Dosis und Schädigung – nun mal konkret ...

Bei stochastischen Schäden ist das statistische Auftreten von Folgen, wie Krebs, abhängig von der Dosis. Je höher die Dosis, desto mehr Leute bekommen Krebs. Dabei gibt es keine Untergrenze für das Risiko!

Die natürliche Strahlenbelastung beträgt im Mittel ca. 2,4 mSv/a. Dieser ist ein Mensch durchschnittlich 70 Jahre ausgesetzt. Das Risiko in Deutschland aufgrund natürlicher Radioaktivität an Krebs zu erkranken beträgt ca. 1%.

## Zu den Strahlenschäden hoher Dosen

Eine Dosis von 7.000 mSv gilt als direkt tödlich. Bei einer Dosis über 200-300 mSv Ganzkörperbestrahlung treten direkte Strahlenschäden auf (Veränderungen des Blutbildes, Erbrechen, Entzündungen).

## Grenzwerte – nun mal konkret ...

Der Grenzwert für Personen, die strahlenexponiert arbeiten, liegt in Deutschland bei derzeit 20 mSv/a. Sie gehen damit ein viel höheres Risiko ein, an Krebs zu erkranken. Statistisch erkrankt eine Person von 900 mehr an Krebs, als es natürlich wäre. Ab welcher Strahlung es gefährlich wird, ist umstritten.

Mit dem in Deutschland gültigen Grenzwert von 1 mSv/a aus genehmigten Anlagen – wie Atomkraftwerken – wird ein gewisses Risiko an schwerwiegenden Erkrankungen akzeptiert. Das Risiko beträgt  $5,6 \cdot 10^{-5}$  pro mSv, wir akzeptieren also eine schwerwiegende Erkrankung auf 18.000 belastete Personen.

*Im Zeitraum 1952 bis 1990 wurden 5.275 Fälle von Bronchialkrebs durch ionisierende Strahlung als Berufskrankheit beim Uranbergbau in der Wismut anerkannt.*

*(Chronik der Wismut 1999)*

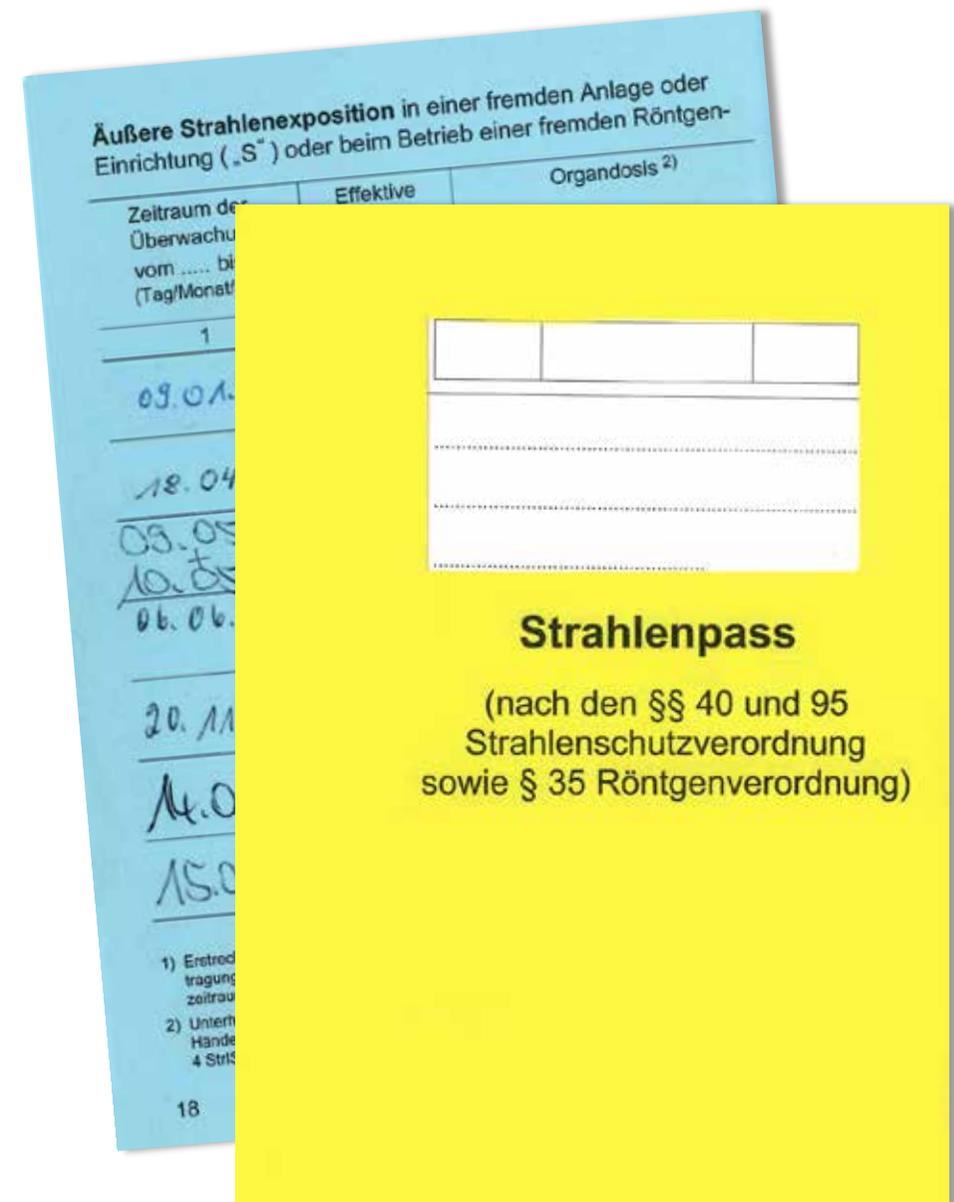
Spätschäden können nach Jahren und Jahrzehnten auftreten. Hierbei handelt es sich meist um Krebs, aber auch um Herz-Kreislaufkrankungen.

# Der Strahlenpass

„Kernkraftwerksmitarbeiter ... sind regelmäßig ionisierender Strahlung ausgesetzt. Um die Beschäftigten vor den Auswirkungen ... zu schützen, gelten (...) Grenzwerte. Sie legen fest, welche Dosis eine Person maximal erhalten darf. Die Einhaltung der Grenzwerte wird z.B. durch Messungen (...) kontrolliert. Wer in wechselnden Betrieben tätig wird (...) muss darüber hinaus einen Strahlenpass besitzen. (...) Der Strahlenpass enthält (...) Angaben zur (...) bisherigen Dosis des Beschäftigten. Der Beschäftigte legt dem jeweiligen Betrieb vor Beginn der Tätigkeit seinen Strahlenpass vor. Der Betrieb überprüft dann, dass durch die geplante Tätigkeit keine Grenzwerte überschritten werden können. Nach Ende des Einsatzes trägt der Betrieb die Dosis für den Beschäftigten in den Strahlenpass ein(...)

Damit enthält der Strahlenpass nach Abschluss der Tätigkeit die aktuellen Informationen zur bisherigen Dosis.“

(Begriff der Woche, GRS 2011)



## Noch mehr Strahlengefahren

Eine Gefahr ist die Anreicherung von Radionukliden über die Nahrungskette. Es gibt Elemente, die ausgeschieden werden, wenn sie im Überfluss vorhanden sind, und solche, die unbegrenzt aufgenommen werden, wenn sie vorhanden sind. Sind sie in Nutztieren oder Pflanzen bereits angereichert, werden sie in hohen Dosen vom Menschen aufgenommen.

Einbau von Radionukliden in den Organismus: Manche Radionuklide verhalten sich aufgrund der chemischen Ähnlichkeit wie Stoffe, die der Körper benötigt. So kann beispielsweise Radium statt Calcium im Knochen eingebaut dauerhaft strahlen.

### Beispiel:

Das bayrische Umweltamt warnt immer noch Jagdleute davor, mit Cäsium belastetes Wild in den Handel zu bringen. Es gibt eine Verpflichtung, vor dem Verkauf die Radioaktivität messen zu lassen. Das Cäsium stammt aus dem Unfall in Tschernobyl. (<http://www.lfu.bayern.de>)



Quelle | Bild: Rattgeber

# Strahlenschutz

Um sich vor Strahlung zu schützen, gibt es folgende Maßnahmen:

## **Bleibt nicht so lange in der Nähe der Strahlenquelle!**

- Arbeitseinsätze müssen so geplant werden, dass die Dosis möglichst gering bleibt. Neben einem Grenzwert ist das Prinzip „as low as reasonably achievable“ (ALARA) einzuhalten.

## **Geht nicht so nah heran!**

- Im Kernkraftwerk werden beispielsweise Gebäudebereiche als Kontrollbereich oder sogar als Sperrbereich gekennzeichnet, je nach Höhe der möglichen Strahlenbelastung.

## **Packt alles gut ein!**

- Die abgebrannten Brennelemente werden in dicken gusseisernen Behältern wie dem Castor gelagert. Diese Behälter übernehmen die Abschirmung.

Englische Beschreibung des Verhaltens nach einer Atomexplosion von 1980:

*“Even the safest room in your home is not safe enough. You will need to block up windows in the room, and any other openings, and to make the outside walls thicker, and also to thicken the floor above you, to provide the strongest possible protection against the penetration of radiation.*

*Protect and Survive,  
(<http://www.atomica.co.uk>)*

## **Es gilt:**

Je höher die Strahlendosis, desto höher das Risiko für Strahlenschäden. Bei niedrigen Dosen ist die Beziehung zwischen der Dosis und der möglichen Wirkung nicht geklärt. Mehrheitlich wird ein linearer Verlauf angenommen.

Achtung: Auch geringe Strahlung birgt ein Risiko!

Die drei Prinzipien werden auch mit AAA abgekürzt für Aufenthaltszeit – Abstand – Abschirmung.

Welche der drei Prinzipien findet ihr in dem Zitat wieder?

# Warum sind abgebrannte Brennelemente so gefährlich?

Abgebrannte Brennelemente klingen etwa fünf Jahre unter Wasser ab. Dann sind Wärmeabgabe und Strahlung soweit gesunken, dass sie in einen Behälter umgesetzt werden können. Auch dann ist es im Inneren des Behälters ein paar Hundert Grad Celsius warm, an der Oberfläche bis zu 80 Grad.

*„Bei der Kernspaltung des Urans entstehen Produkte, die sich nicht mehr für die Energiegewinnung nutzen lassen und diese sogar behindern. Für den menschlichen Organismus sind sie umso gefährlicher. So kann das gasförmige Jod-129 in der Schilddrüse eingelagert werden, Strontium-90 in den Knochen.“*

*(Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, Endlagerausstellung)*

*„Würde jemand auf die Idee kommen, den (...) Behälter zu öffnen, wäre er durch die Brennelemente einer so hohen direkten Strahlung ausgesetzt, dass durch verbrennungsähnliche Schäden schließlich der Tod eintreten würde.“*

*(Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, Endlagerausstellung)*

# Strahlenschutz und Skandale um den Castorbehälter

**Alle abgebrannten Brennelemente werden in Deutschland in so genannten Transport- und Lagerbehältern (z.B. Castorbehälter) zwischengelagert.**

*„Transporte aus den Wiederaufarbeitungsanlagen (...) bringen hochradioaktive Reststoffe (...) mit geschmolzenem Glas vermengt und in Kokillen abgefüllt. (...) Andere enthalten abgebrannte Brennelemente.“*

*(Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, Endlagerausstellung)*

**Die Sicherheitsprinzipien gelten auch hier. Den atomaren Abfall umgibt 40 cm Gusseisen. So genannte „Moderatorstäbe“ schirmen gegen Neutronen ab. So wird der Grenzwert für die Strahlenbelastung an der Behälteroberfläche unterschritten.**

*„PR – Gau! Techniker (...) starrten ungläubig auf den Geigerzähler. Die radioaktive Strahlung an einem der Castor-Behälter übertraf die erlaubte Grenze um fast das Doppelte.“*

*(Focus – Magazin 1998)*

**Die Behälter waren bei der Beladung unter Wasser an ihrer Oberfläche mit den im Wasser enthaltenen Radionukliden verschmutzt worden.**

*„Feinste radioaktive Teilchen hatten sich während der Unterwasserprozedur auf der grün lackierten Außenhaut der gusseisernen Ungetüme abgesetzt. (...) die Umweltministerin Angela Merkel (CDU) [stoppte] erschrocken den Transport.“*

*(Der Spiegel 1998)*

Erst als der Kontakt mit kontaminiertem Wasser durch einen maßgeschneiderten, wasserdichten Überzug komplett vermieden werden konnte, wurden sie wieder aufgenommen.

## Zum Weiterdenken: Der Castor als Heizung

In einem Internetforum wird überlegt, ob es nicht sinnvoll wäre, die gefüllten und warmen Castorbehälter zur Heizung von Einfamilienhäusern zu nutzen.

Wie hoch wären die Strahlengefahren für Menschen, die ihr Einfamilienhaus mit einem gefüllten Castor-Behälter im Keller heizen würden?

Das Internetforum vom Spektrum der Wissenschaft schreibt:

*„Aus der Wikipedia entnehme ich, dass die Dosisleistung eines Castor-Behälters an der Oberfläche 0,35 Millisievert pro Stunde (mSv/h) beträgt. Davon entfallen 0,25 mSv/h auf Neutronenstrahlung der Rest dürfte größtenteils Gammastrahlung sein. Das Jahr hat etwas weniger als neuntausend Stunden, also kommen wir auf drei Sievert pro Jahr für jemanden, der sein ganzes Leben auf der Oberfläche eines Castor-Behälters verbringt. Das ist in jedem Fall viel zu viel. Faustregel: Ein Sievert erhöht das Lebens-Krebsrisiko etwa von 25% auf 30%. Wer also ein Jahr auf dem Castor verbringt, fällt nicht gleich tot um, wird aber ein deutlich erhöhtes Krebsrisiko und vermutlich auch höheres Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen haben.“*