

Vom Urknall bis zum Strahlenschutz



Müller, J.; Lesch, H.; Chiu
2005, 39, 100-105

Eine Geschichte über
die Entstehung der chemischen Elemente
und der radioaktiven Strahlung

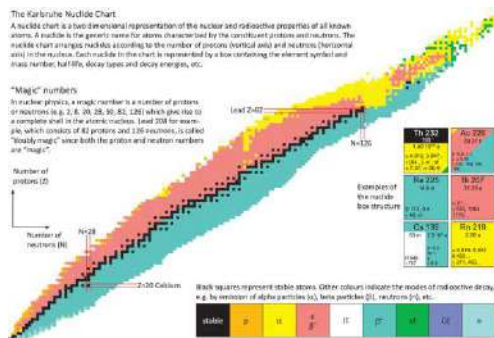
- ❖ wie wir sie verwenden
- ❖ wie wir uns vor ihr schützen

<https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/digitale-medien/animationen/grundlegendes/das-periodensystem-der-elemente/>

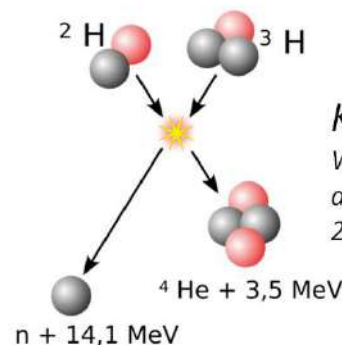
Das Periodensystem der Elemente

Perioden	Hauptgruppen																Nebengruppen									
	I		II												III		IV		V		VI		VII		VIII	
1.	K	Li	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Br	I	At				
2.	He	Ne	Ar	Kr											Xe	Rn										
3.																										
4.																										
5.																										
6.																										
7.																										

Lanthanoide
Actinoide



Sóti, Z.; Magill, J.; Dreher, R.:
Karlsruhe Nuclide Chart – New 10th
edition EPJ Nuclear Sci. Technol. 5, 6
(2019)



Kernfusion
Wikipedia,
abgerufen,
28.07.2025

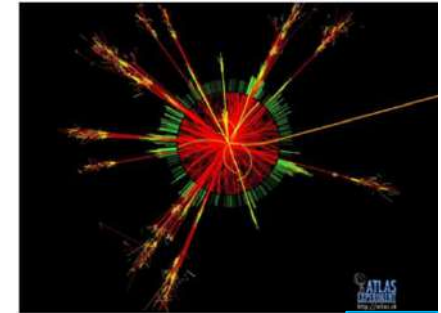


Strahlenschutz KTE Karlsruhe

Urknall

- Wo kommen unsere **chemischen Elemente** her ?
- Wo die stabilen und **radioaktiven Isotope** ?

Diese Fragen versucht die **nukleare Astrophysik** zu beantworten



[1]

Vieles hat man schon erkannt, aber Vieles ist auch noch unklar

Mein Vortrag kann nur ein flüchtigen Blick auf dieses Fachgebiet werfen

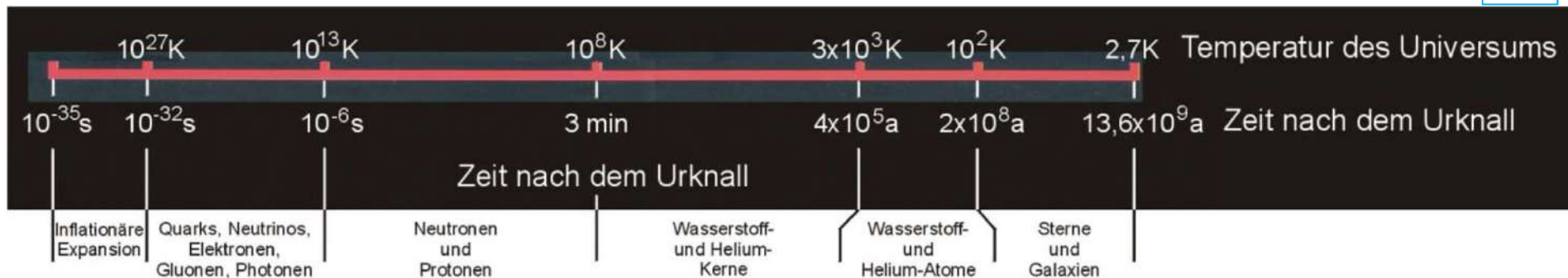
Beim **Urknall** (Big Bang) entstanden **Teilchen** und **Antiteilchen**

Die „zerstrahlten“ (rekombinierten) miteinander unter Energie-Abgabe

Übrig blieb ein Überschuss an „**Elementarteilchen**“ (Bosonen, Quarks, Photonen etc.)

Durch „**Kondensation**“ entstanden: **Protonen** (p^+) und **Neutronen** (n)

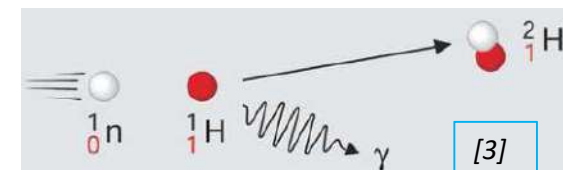
[2]



In der ersten Phase (die ersten 3 Minuten) der ➔ „**Nukleosynthese**“ bildeten sich daraus

durch exotherme **Fusions-Prozesse** die ersten **Atomkerne**:

Protium (H - p), Deuterium (D - pn), Helium (He – p_2n und p_2n_2)

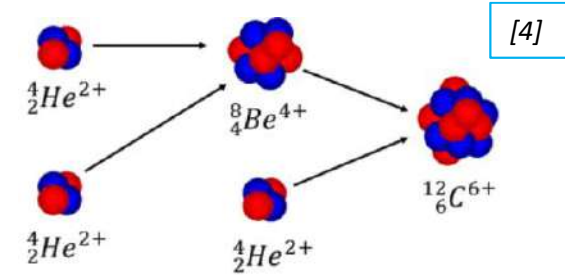


[3]

Fusion

Die Energie aus der Fusion wurde als **Strahlung** abgegeben

→ die ersten Gas-Wolken (Sterne) **leuchteten**



Als die **Temperatur** und damit auch die **Dichte** durch die Expansion des Universums

→ **niedrig genug** war (nach ca. 1 Mio. Jahren), konnten sich **Elektronen** stabil an die

Atomkerne anlagern → die ersten **Elemente** waren da (H, D, He, Li, Be)

roter Riese [5]

Und dann wird es spannend:

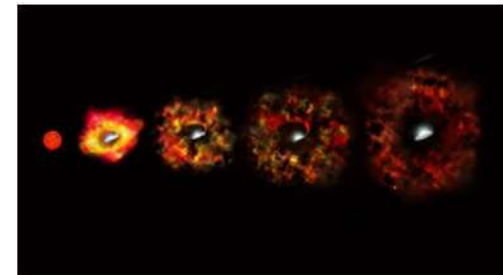
- die exotherme Neutronen-Fusion, erzeugt „**Strahlendruck**“
= die Teilchenwolke „bläht“ sich auf
ein „roter Riese“ entsteht



- aber auch ein Gegenspieler ist da: die **Gravitation** durch die gebildeten Elemente

sind in dieser ersten Fusions-Stufe → **alle Neutronen verbraucht**,

siegt die Gravitation → die Teilchen-Wolke **kollabiert**



kollabierender Stern [6]

Dadurch:

Druck und **Temperatur** im Inneren **steigen** wieder

→ bis sie die **Fusion** von **Wasserstoff** erlauben, und dann auch die **Fusion** von **Helium**

es entstehen die nächst schwereren Elemente (z.B. Helium Brennen → **O, Ne**)

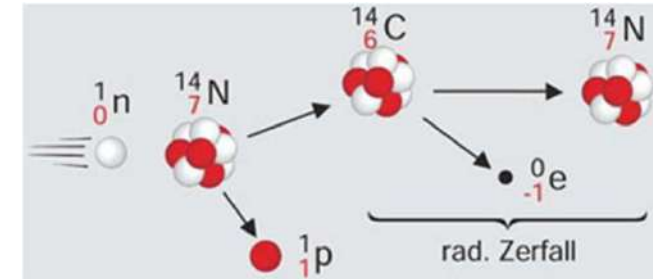
Fusion

- nach **Verbrauch** des Brennstoffs (Ausdehnung):

→ wieder **Kollabieren** und **Erhitzen**

- bis das **nächst schwerere Element**

→ Fusionsbedingungen erreicht (Kohlenstoff-Brennen)



[3]

Immer schwerere Elemente entstehen

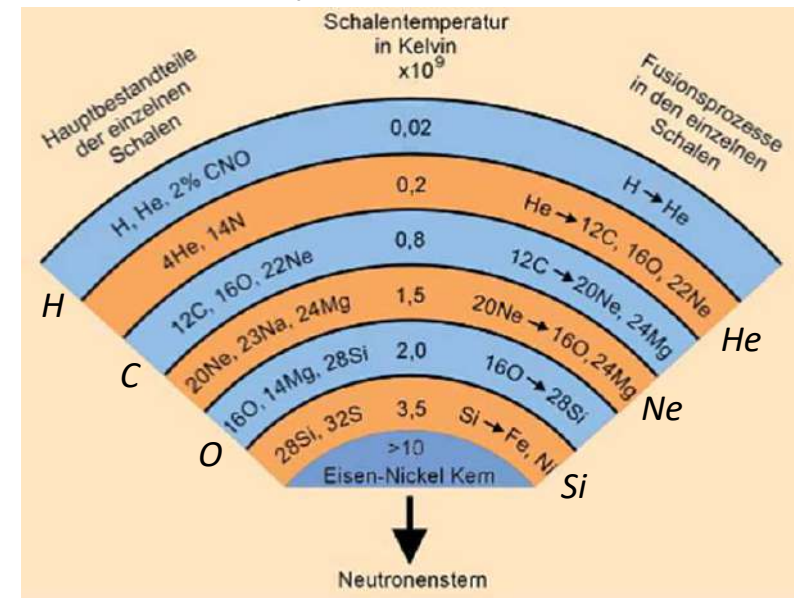
– in mehreren Zyklen

- und: der heiße Kern erhitzt auch die Hülle

- der **Stern brennt** in **Schalen**:

von innen nach außen

$Si \rightarrow O \rightarrow Ne \rightarrow C \rightarrow He \rightarrow H$



Fusionsbrennen bis zur Erzeugung von Fe [4]

Beim Kollabieren **stößt** der Stern

- Teile seiner Hüllen ab
- oder **explodiert** („Supernova“)

Dadurch

→ **verteilen** sich **im All**

- die Materie
- die bis dahin gebildeten **Elemente**



[2]

Neutronen Einfang

Diese zyklischen Fusionsprozesse können weitergehen

→ bis das Element **Fe** entsteht (Si-Fusion)

Fe hat die höchste Energiedichte (mit Ni)

➤ weitere Fusionsprozesse wären
nicht mehr exotherm

➤ für die Entstehung schwerere Elemente
müssen → **andere Prozesse** stattfinden

Transmutation ein Element wird

→ in ein anderes umgewandelt

a) in **roten Riesen**

→ erfolgt **Neutronen-Einfang** (s-Prozess)

Element ${}^m_p\text{A} + n \rightarrow {}^{m+1}_p\text{A} \rightarrow$ **schwerere Isotope** des Elementes A

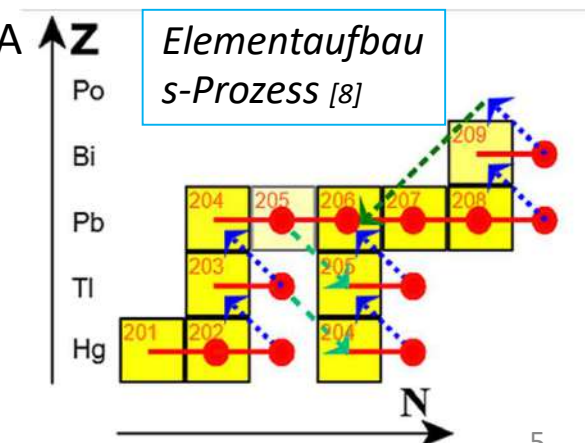
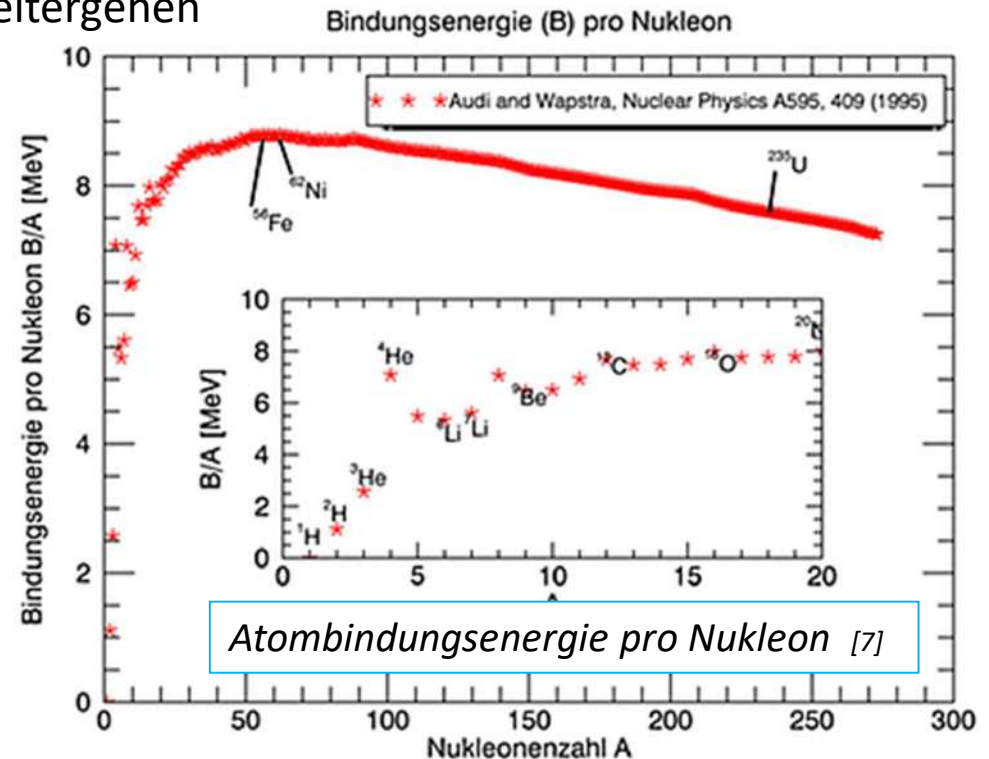
bis A so schwer wird, dass es **instabil** wird und zerfällt

→ ${}^m_p\text{A} \rightarrow {}^m_{p+1}\text{B} + e^-$ ($n \rightarrow p^+ + e^-$)

ein Isotop eines neuen Elementes (B) hat sich gebildet

und ein Elektron wird emittiert (**β^- -Strahlung**)

➤ das geht bis zu den Elementen **Pb** und **Bi**



Transmutation

b) In **Supernovas** entstehen **noch schwerere Elemente**

→ hier ist die Neutronendichte sehr hoch

viele Neutronen treffen quasi gleichzeitig auf einen Atomkern (r-Prozess)

- der ist dann oft **nicht mehr stabil**

- es erfolgt

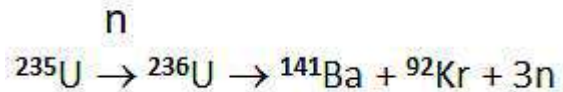
Spontanzerfall (wenn: $n_{\text{Neutron}}/n_{\text{Proton}} > 1,4$)

z.B.: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{137}\text{Cs} + ^{133}\text{Ba}$

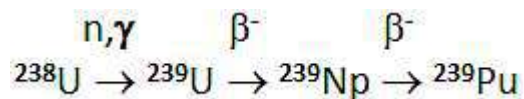
induzierter Zerfall = Kernspaltung

➤ U-235 (**fissile**) mit thermischen Neutronen

→ Kettenreaktion (neue Neutronen)



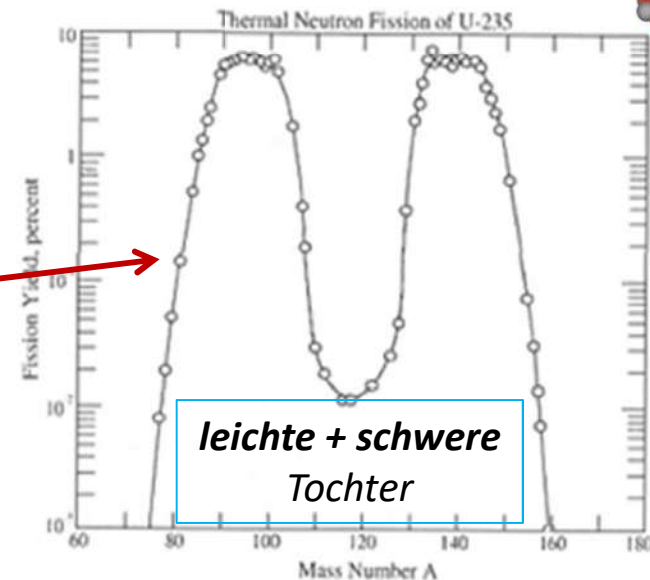
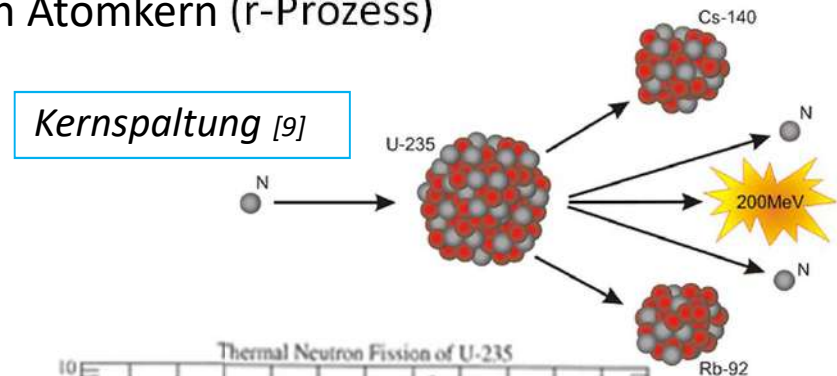
➤ U-238 (**fissionable**) mit schnellen Neutronen



wie s-Prozess

α-Zerfall : aus Pu-238 → U-234 + α-Teilchen

α-Teilchen → bewirken auch wieder Transmutation



Massen-verteilung der Töchter bei durch thermische Neutronen induzierten Spaltung von U-235 [10]

Sterne

Was genau **passiert** ist in erster Linie abhängig von der **Masse / Größe** des **Sterns**

→ **leichte** Sternen brennen nur bis z.B. Kohlenstoff (unsere Sonne)
sie stoßen nur diese **leichten Elemente** ihrer Hüllen ins Weltall

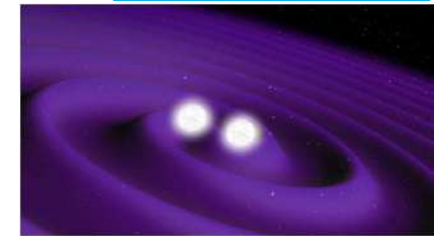
→ **schwere** Sonnen brennen bis zum **Element Fe**
ihre Gravitations-Implosionskraft kann so hoch werden,
das sie explodieren
die **Supernova** schleudert Sternen-Materie ins Weltall

Supernova NGC
1952SS [7]



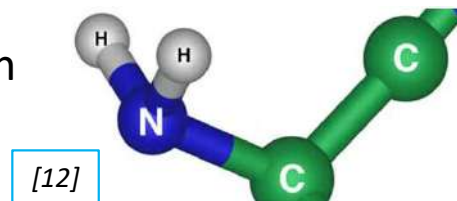
❖ bei der hohen **Neutronendichte** in der Supernova
entstehen Elemente bis **U** und **Th**
oder es werden **α -Teilchen** (He-Kerne) abgespalten oder aufgenommen
z.B. $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$ (**α -Strahlung**)

Neutronenstern
Kollision [11]



Aber auch durch **Sternen-Kollisionen** (z.B. Neutronensterne)
→ entstehen die **noch fehlenden Elemente** unseres Sonnensystems
→ und die Elemente, die wir auf und in unser **Erde** finden

→ diese Elemente reagieren dann
zu **Molekülen**



Das Periodensystem der Elemente

Perioden	Haupt -																- gruppen																				
	I		II														III		IV		V		VI		VII		VIII										
1.	H	He																	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne											
2.	La	Lu	Nebengruppen																Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
3.	M	Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl	Ar																
4.	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																			
5.	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																			
6.	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
7.	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt														
8.	Lanthanoide																		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
9.	Actinoide																		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

[13]

Planeten

Am Ende bleiben: **Sterne** der **nächsten Generation**

→ mit schwereren Elementen angereichert

und

weiße Zwerge, schwarze Löcher, dichte Aschekugeln,

graue Zwerge, Neutronensterne und Gaswolken, planetare Nebel, little Ghosts etc.



Neutronenstern [5]



Orionnebel [7]

Die **nicht mehr** im Stern **gebundene Materie** (Staub, Kristalle, aber auch schon PAK) [15]

kreist um das Zentrum = seine Sonne (Impulserhaltungssatz)

verdichtet sich, „**kollabiert**“ zu einer **Scheibe**

ballt sich zu **Plantesimalen** zusammen

„**räumt**“ seine Umlaufbahn auf → durch gravitations- und elektrostatische Anziehung

→ es entsteht ein **Sonnensystem mit Planeten**,

die alle Elemente enthalten, → die sie „eingesammelt“ haben



Orion
114-426
[14]



Butterfly Nebula
(NGC 6302) [15]



Konservierung des
Drehmomentes

[16]



Elemente

Da die **Planeten** am Anfang noch **sehr heiß** sind
 ist die Materie oft **flüssig**
 die **schweren Elemente** und Verbindungen
 wandern zum **Planeten Kern** (Gravitation)
 → bei unser Erde: der Fe/Ni Kern
 die **leichten Elemente** und Verbindungen
schwimmen auf

→ bei unser Erde die Silikate und andere Minerale in der Erdkruste

Die **Elemente** sind durch ihre **Protonen-Zahl** definiert
 hinter jedem **Feld** des Periodensystems, jedem Element
 verbergen sich aber ganz **viele Isotope**

→ Atome mit der selben Protonen-Zahl aber **unterschiedlicher Neutronen-Zahl**
 wie sie bei der Element-Entstehung gebildet wurden
 da Neutronen-Einfang, Kernverschmelzung und Kern-Zerfall dabei beteiligt waren,
 → finden wir **alle möglichen Isotope** aller möglichen Elemente
 auch die **primordialen Radionuklide**

Darum

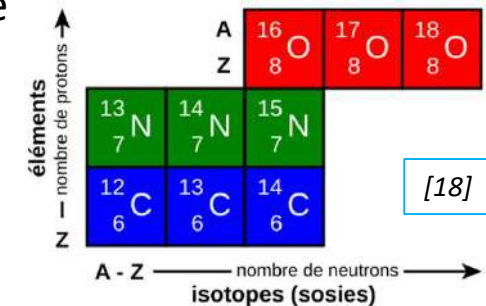
→ sind die „**Atommassen**“ keine ganzen Zahlen: **Mittelwerte** der Isotopenmassen



[5]



Nephelin, (Na,K)[AlSiO₄]
 [17]



[18]

Atom-
masse

35,45
 Cl
 17

Ordnungszahl

Isotope

Die **Isotope** eines Elementes stellt man

In der **Nuklidkarte** dar

jedes **Feld** im **Periodensystem**

→ ist eine **Zeile** in der **Nuklidkarte**
das leichteste Element (unten links):



➤ **schwarze** Felder sind **stabile** Isotope

➤ **alle anderen** sind **instabil**

○ **gelbe** Felder → α -Strahler (He-Kerne)

○ andere Felder → andere Strahlung

wie β^+ (e^+), β^- (e^-), EC (e^- Einfang), n

○ die ganz schweren Elemente

haben nur instabile Isotope

Alle **bunten Isotope** sind **radioaktiv**

Damit

ist auch fast **alle Materie** im Weltall und unser Planet **radioaktiv**

z.B. finden wir in der Erdkruste 2,3 ppm U (-238, -234) und 8 ppm Th-232

→ zusammen: 5 % der natürlichen Humandosis

The Karlsruhe Nuclide Chart

A nuclide chart is a two dimensional representation of the nuclear and radioactive properties of all known atoms. A nuclide is the generic name for atoms characterized by the constituent protons and neutrons. The nuclide chart arranges nuclides according to the number of protons (vertical axis) and neutrons (horizontal axis) in the nucleus. Each nuclide in the chart is represented by a box containing the element symbol and mass number, half-life, decay types and decay energies, etc.

"Magic" numbers

In nuclear physics, a magic number is a number of protons or neutrons (e.g. 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126) which give rise to a complete shell in the atomic nucleus. Lead 208 for example, which consists of 82 protons and 126 neutrons, is called "doubly magic" since both the proton and neutron numbers are "magic".

Number of protons (Z)
Number of neutrons (N)

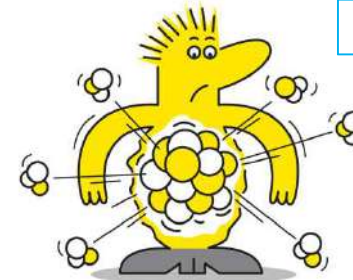
Black squares represent stable atoms. Other colours indicate the modes of radioactive decay, e.g. by emission of alpha particles (α), beta particles (β), neutrons (n), etc.



Mr. Stable



Mr. UnStable



[20]

Pechblende

[21]



Radioaktivität

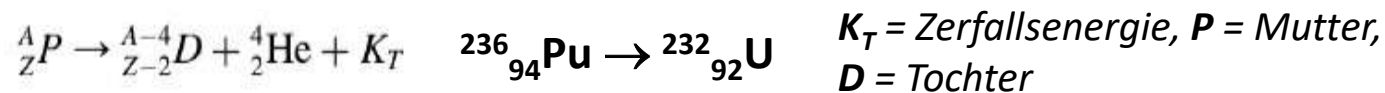
Was ist eigentlich „**Radioaktivität**“ ?

→ ein Atomkern zerfällt unter Abgabe von Strahlung

a) **Teilchenstrahlung**, die kinetische Energie auf die Umgebung überträgt

– **direkt ionisierend**, meist unter Bildung eines anderen Elementes

z.B. α -Zerfall – ein He-Kern (α -Teilchen) wird abgegeben



β^+ -Zerfall – ein Positron wird abgegeben (bei β^- -Zerfall – ein Elektron)



b) **Photonen** z.B. γ -Strahlung = Röntgen-Strahlung oder c) **Neutronen**

deren Energie wird durch Atome absorbiert – **indirekt ionisierend**

Die **Nuklidkarte** sagt uns → welches Nuklid wie zerfällt und welche Strahlung es abgibt

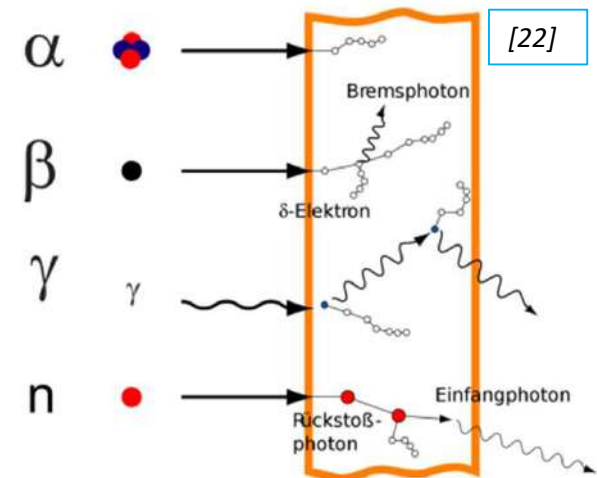
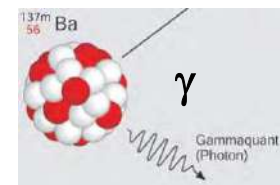
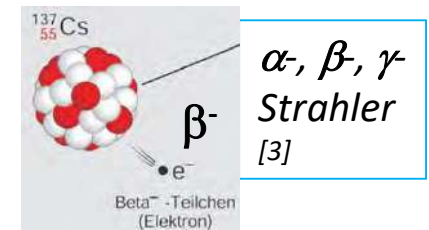
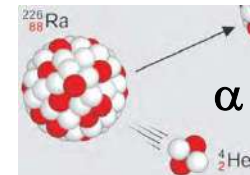
und was **bewirkt** radioaktive Strahlung ?

aller radioaktiven Strahlung ist gemeinsam:

- sie ist so **hochenergetisch**
- gibt ihre Energie auf so kleinem Raum ab

→ dass die Umgebung **ionisiert** wird

Ionisation bedeutet – **Zerstörung/Veränderung** von Materie



Ionisation

Was bedeutet das für uns Menschen ? Wie kann sich das auswirken ?

Lesen Sie bitte die beiden folgenden Texte

→ die mir ein Kollege netterweise zur Verfügung gestellt hat [23]

Uas- dun toFrbidlugn hegörne
zu dne gurndlegenedn
gufAabne eds Raklsrureh
Unstitits rüf Hectonlogei.
Der Fortbuldingsauftrga wird
zu eienm weesentlichen Tiel
vom Fortbildnugszentrum für
Techink und Umwelt whar-
genommen, das beriets 1961
als Schule für Kerntechnik
gegründet wurde.

Aus- udn Fortbildugn gehören
zu nde grundelgenden
Aufgaebn eds Karlsrhuer
Instutits für Tecnologie.
Der Frotbildungsautfrag wrid
zu eienm wesnetlichen Teil
vmo Fortbildugnszentrum für
Tecnihik und Umewlt wahr-
genmomen, das rebeits 1961
als Schule frü Kerntehcnik
ggerünedt wurde.

Ionisation

Uas- dun toFrbidlugn hegörne
zu dne gurndlegenedn
gufAabne eds Raklsrureh
Unstitits rüf Hectonlogei.
Der Fortbuldingsauftrga wird
zu eienm weesntlichen Tiel
vom Fortbildnugszentrum für
Techink und Umwelt whar-
genommen, das beriets 1961
als Schule für Kerntechnik
gegründet wurde.

Aus- udn Fortbildugn gehören
zu nde grundelgenden
Aufgaebn eds Karlsruher
Instutits für Tecnologie.
Der Frotbildungsauftrag wrid
zu eienm wesnetlichen Teil
vmo Fortbildugnszentrum für
Tecnihik und Umewlt wahr-
genmomen, das rebeits 1961
als Schule frü Kerntehcnik
ggerünedt wurde.

❖ der **linke** Text ist, zumindest am Anfang, → kaum lesbar

❖ der **rechte** Text ist → problemlos lesbar

In beiden Texten sind gleich viele Fehler und die gleiche Art von Fehlern

❖ links „**auf kleinem Raum**“

❖ rechts **statistisch** verteilt

➤ links bildet das Gehirn „falsche“ Wörter

➤ rechts korrigiert das Gehirn automatisch, und **lernt** dabei ständig

Zellschädigung

→ so ist es mit der Ionisation von Zellen auch:
menschliche Chromosomen können

➤ leichte „Fehler / Störungen“ **kompensieren**

der Organismus wird dadurch **trainiert** = immunisiert

➤ starke Störungen nicht mehr

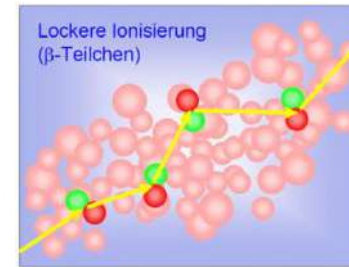
→ es können Strahlenschäden und Krebs entstehen (Bruch der Doppelhelix)

Wie stark die Ionisation (Zerstörung) ist

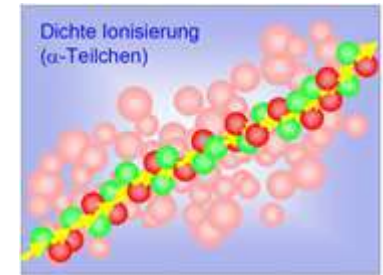
- hängt vom Radionuklid ab → seiner **Zerfallsart** und **-Energie**

- und **welche Chromosomen** getroffen werden

- ❖ die Haut ist unempfindlicher als z.B. das Knochenmark oder die Fortpflanzungsorgane



schwache Ionisation
- durch β [23]



starke Ionisation
- durch α [23]



Darum müssen wir wissen, **wieviele** und **welche Radioaktivität** vorhanden ist

→ wir müssen sie also **messen**

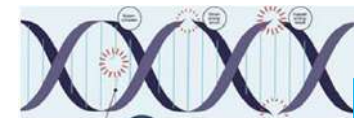
wie wird Radioaktivität gemessen ? → als Zerfälle pro Sekunde (**Bequerel**)

1 Bq = 1 Zerfall/sec, z.B. 1 Bq/L Pu-238 = $6,7 \times 10^{-15}$ mol/L

jeder menschliche Körper strahlt ständig mit **6.000 – 10.000 Bq**

→ überwiegend durch natürlich vorhandenes K-40, C-14

das war auch während der **Evolution** so – **das tut uns also nichts**



Dosis

D.h. man muss die Strahlung, ihre Schädlichkeit, **bewerten**

❖ nach der **Menge** an **Energie**,

die beim Auftreffen auf ein Material übertragen wird

= **Dosis** in **Gy** (Gray)

❖ und der **Wirkung**, die diese Energie ausübt (Wirkungsfaktoren)

- am Ort des Auftreffens

- bei der Art des getroffenen Materials

= **Personen-Dosis**, Organ-Dosis etc. in **Sv** (Sievert)

Die **Dosisleistung** ist

→ die Summe an Dosis über die Bestrahlungs-Zeit

Sv/Zeiteinheit

Die **Strahlenschutz-Verordnung** (StrlSchV)

definiert in Deutschland

für **jedes Nuklid**

→ welche **Aktivitätsmenge**

noch **nicht schädlich** ist

→ die Tabelle der „**Freigrenzen**“ (FG)



[26]



Personen-Dosimeter [23]



Radionuklid	Freigrenze in Bq	Freigrenze, uneingeschränkte Freigabe von festen u. flüssigen Stoffen in Bq/g	Aktivität HRQ in TBq	Oberflächenkontamination in Bq/cm ²
1	2	3	4	5
H-3	1 E+9	1 E+2	2 E+3	1 E+2
Be-7	1 E+7	1 E+1	1	1 E+2
Be-10	1 E+6	1 E+2	3 E+1	

NORM

Woher kommt die Strahlung,
die auf uns Menschen einwirkt ?

➤ aus der **Natur**

1) NORM (Natural Occuring Radioactive Material)

○ aus der Erde (Radioaktivität der Gesteine)

= terrestrische Strahlung = ca. 0,4 mSv/a

je nach dem, wo man wohnt, über Granit mehr als auf Kalk

→ vor 1,5 – 2 Mrd. Jahren war sie so hoch, das es **natürliche Kernreaktoren** gab (Oklo)

○ aus der Luft

- aus Sonnenwinden und durch Aktivierung (T, C-14, Be-7)

- durch Gase in der Atmosphäre (Rn-Emanation 1,1 mSv/a)

- durch Höhenstrahlung (Langstreckenflüge) ca. 0,3 mSv/a

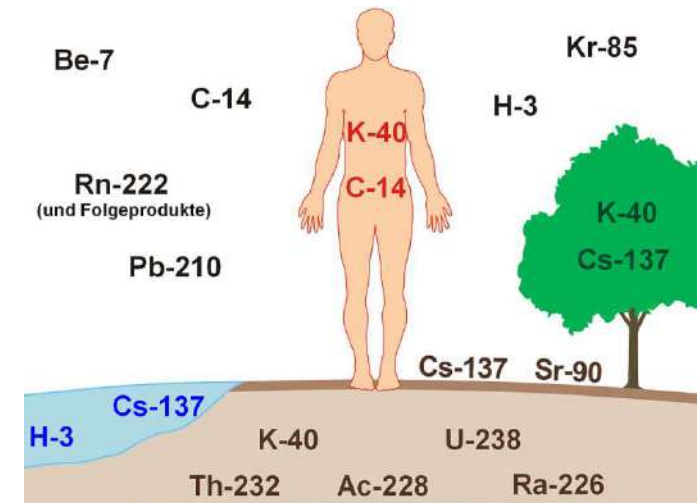
2) T-NORM für technische Zwecke angereicherte NORM-Nuklide

➤ **künstliche Radionuklide** (z.B. auch für **medizinische Anwendungen**)

durchschnittliche Belastung ca. 1,9 mSv/a [4]

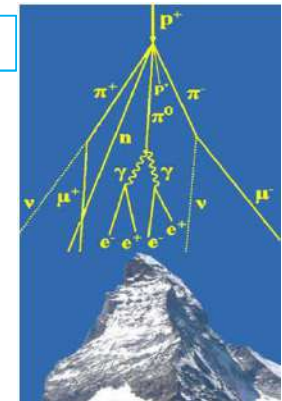
Lange Zeit wusste der **Mensch nichts** von dieser Radioaktivität

→ bis Marie Curie Uran und Radium aus der Pechblende abtrennte



[23]

[23]



[27] Hulton
Archive /
Getty
Images

Anfänge

Und dann kam ein **Hype**

Anfang des letzten Jahrhunderts wurden der Radioaktivität

→ **magische Kräfte** zugeschrieben z.B. Verjüngung

es gab

Radium- und Thorium-Seifen und -Cremes

- die α -Strahlung (He-Kerne) wird zum Glück
→ durch die Haut zurück gehalten

aber es ging noch weiter

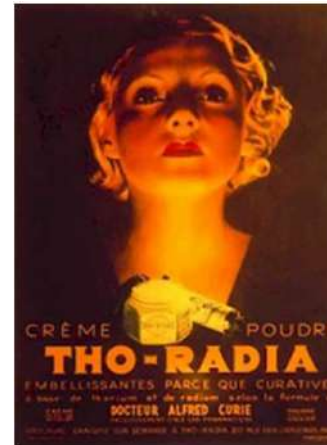
Ra-Schokolade

- da wird **Inkorporiert** (in den Körper aufgenommen)
- die α -Strahler sind im Körper
→ treffen auf die empfindlichen Organe

zu vielfältiger Nutzung regte auch das **Leuchten** an

→ direkte oder indirekte – Lumineszenz von radioaktiven Strahlern

- Thorium **Glühstrümpfe**
- **Uranglas** und Lasuren
- leuchtende **Zifferblätter** (H-3, Ra)



„Frischer Teint, weniger Falten“

in 100 g Creme:

- 0,5 g Thoriumchlorid
2 E+03 Bq, FG = 1 E+03 Bq
→ noch ganz o.k.

aber:

- 0,35 mg Radium
1,3 E+07 Bq, FG = 10 Bq

→ **rosa Teint**
war damals modern [28]



[29]



Thorium
Glüh-
strumpf
[29]



Uranglas [30]

Strahlenschutz

Dass das alles doch **nicht so doll** war,

→ merkte man erst **Jahre später**

Frauen in der **Uhrenindustrie**

spitzten ihre Pinsel mit dem Mund an

→ bekamen **Zungenkrebs**



tödlicher
Pinselfstrich
Chicago Daily
Times [27]

Das war

die **Geburtsstunde des Strahlenschutzes**

- man lernte **Strahlung gezielt** zu **messen**
- und seine **Wirkung** zu **quantifizieren**



[31]

Dabei wurde auch klar:

→ radioaktive Strahlung ist **nicht per se** **schädlich**

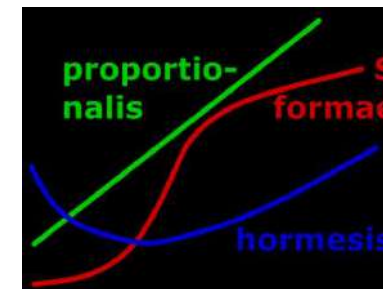
Aber: da sie die selben Defekte hervorruft wie andere Schadstoffe
aus der Luft, der Nahrung oder Viren, Bakterien, Gifte

→ kann man die **Wirkung kleiner Mengen** (Dosen)
nicht messen → **gut oder böse ?**



Die Bestimmung ihrer Wirkung und Gefährlichkeit

→ ist immer mit **großen Unsicherheiten** behaftet



Hormesis:
„was uns
nicht
umbringt,
macht uns
stärker“ [32]

Risiko

Z.B.: Radon als Tochter des primordialen U-238

schädlich oder heilsam ?

die **Radon-Heilstollen** in Baden-Baden

→ Behandlung von Atemwegserkrankungen, Rheuma

❖ von den Römern errichtet

❖ noch heute in Betrieb

heutiger Referenzwert (Rn-Obergrenze) = **300 Bq/m³** Atemluft

Experimentell leitet man die Strahlenwirkung auf den Menschen

○ aus Messungen nach Ereignissen mit **hohen Strahlendosen** ab (Hiroshima, Fukushima)

○ und berechnet die **Organdosis** aus bekannten Element-Organ Transferfaktoren

→ auch das alles mit hoher Unsicherheit verbunden

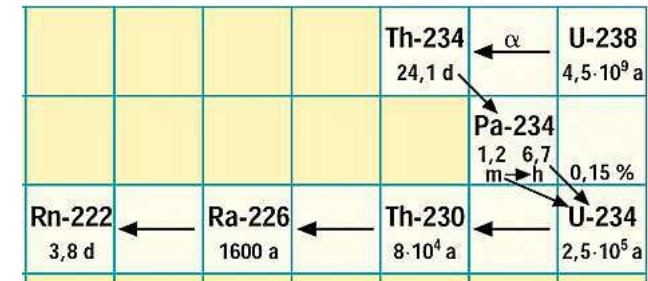
Woraus ergeben sich dann die „**unbedenklichen Aktivitäten**“ = Freigabewerte ?

➤ **allgemein:** für Gefahren durch Arbeitstätigkeit **akzeptiertes** (zusätzliches)
tödliches Risiko = 0,1 % pro Jahr

➤ für **radioaktive Strahlung:** Risiko auf tödlichen Krebs: 0,005 % pro mSv

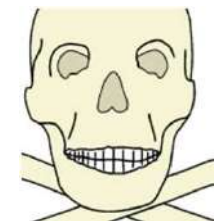
➤ **normale** Durchschnitts-Belastung in der BRD ca. 4 mSv/a

→ **0,02 % zusätzliches Risiko**, 0,01 % aus natürlicher Radioaktivität



U-238 Zerfallsreihe [23]

Radon-Stollen [33]



Tod

Anwendung von NORM

Wo **nutzen** wir **natürliche Radioaktivität** ?

geologische und biologische **Altersbestimmungen**

a) Kenntnis der **Ausgangskonzentration** der radioaktiven Mutter

Messung der **aktuellen Konzentration** der Mutter oder der Tochter

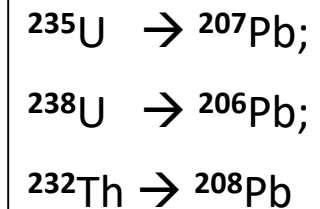
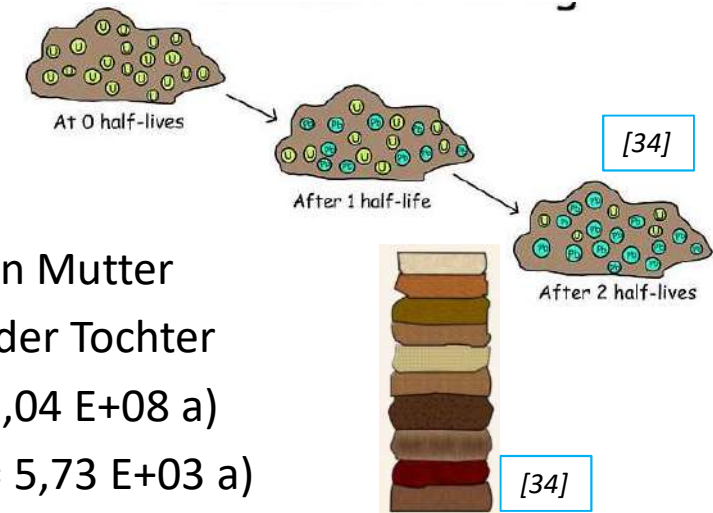
- Uran-Blei Datierung: $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ (Halbwertszeit = $7,04 \text{ E}+08 \text{ a}$)
- Kohlenstoff-14 Methode: $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$ (Halbwertszeit = $5,73 \text{ E}+03 \text{ a}$)

b) Altersbestimmung auf Grund der **unterschiedlichen Dauer** des **Zerfalls**

in jeder Zerfalls-Reihe der primordialen Nuklide (**Geochronologie**)

Messung der **Konzentrations-Verhältnisse** von der **Mutter** (primordial)

$\leftrightarrow$ zum **stabilen Endprodukt** der Zerfallsreihe



Konventionelle Eigenschaften der schweren, radioaktiven Elemente

$\rightarrow$ führen zu der „**Nebenwirkung**“ Radioaktivität (auch TNORM)

heutige Verwendung:

- Thorium in Schweißdrähten (hohe Temperatur)
- Uran-Munition (hohe Durchschlagskraft)
- Uran-Katalysatoren für verschiedene Reaktionen

$\rightarrow$ Wasserspaltung, Alkohol-Synthese, Ammoniak-Synthese



WIG,
Wolfram/Th
Induktions-
Schweißen

[35]



Uran-
Munition [36]

Belastung durch NORM

und wo **stört** uns **natürliche Radioaktivität** ?

❖ in Gebäuden

→ nicht gasdichte Kellerböden führen zu Rn Emanation

❖ in Wasserwerken

→ Anreicherung von Rn Folgeprodukten in den Luft-Filtern

❖ bei Langstreckenflügen

→ das Flugpersonal wird durch Höhenstrahlung belastet

❖ bei Geothermie-Kraftwerken

→ U Folgeprodukte reichern sich in den Wärmetauschern an

❖ im Bergbau

→ in Gas- und Grubenwasser-Leitungen = Scales mit Uran-Folgeprodukten

Alle **natürliche** Strahlung (NORM)

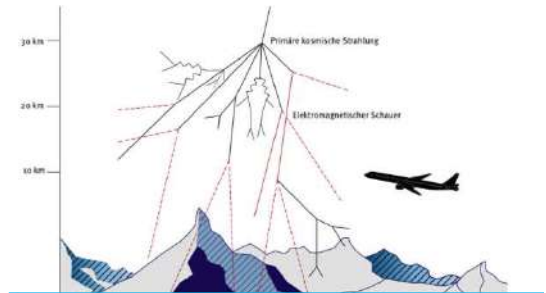
→ überwachen **Bund** und **Länder** = **Umweltüberwachung**

Für alle Strahlung bei **technischer Verwendung** (auch TNORM)

→ ist der **Betreiber** verantwortlich = der **Strahlenschutz-Verantwortliche**

→ jeder Betrieb, der mit Radioaktivität oberhalb der Freigrenzen umgeht,

→ muss seine Emissionen überprüfen = **Umgebungsüberwachung**



[37] Einfluss der kosmischen Strahlung auf den Menschen



Scales in einer Rohrleitung
DOE, USA [38]



[24]

Verwendung von Radioaktivität

Alle gemessenen Daten fließen in das **IMIS** ein

→ das „Integrierte Mess- und Informationssystem“ des BfS
(Bundesamt für Strahlenschutz)

Jeder kann ständig im Internet die aktuelle Dosisbelastung sehen

Ganz **explizit geregelt** (StrlSchG, StrlSchV etc.)

ist die Anwendung und Überwachung **künstlicher Radionuklide**

→ die „anthropogene Strahlenbelastung“

➤ die Auflagen sind extrem hoch

Wo **verwenden** wir denn heute **Radioaktivität** ?

➤ natürlich für die **Energie-Gewinnung**

❖ **Kernspaltung** in Kernkraftwerken

setzt die bei Elemententstehung gespeicherte Energie wieder frei

❖ in **Fusions**-Reaktoren

wollen wir die Vorgänge in unserer Sonne nachbilden -das H- und He-Brennen

❖ **Transmutation** könnte uns helfen langlebige Radionuklide in kurzlebige zu verwandeln

in Beschleunigern, wie beim CERN, laufen dazu Versuche

→ auch hier lässt sich ggf. in Zukunft Energie gewinnen

Ortsdosis-
leistung BRD

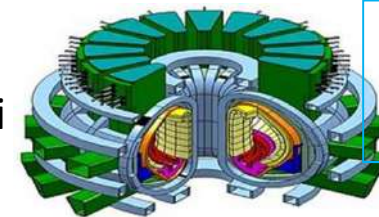
<https://www.imis.bfs.de/geoportal/>



[24]



*PuO₂-Pellet
Zerfallsglühen
[39]*



*Fusions-
Reaktor
[40]*



*Protonen-
Beschleuniger
[41]*

Medizin

Nicht wegzudenken sind Radionuklide aus der **Medizin**

➤ „**nukleare Theragnostik**“

❖ jedes **Medikament** am Markt

wird mit H-3 und C-14 dotierten Präparaten getestet (Tierversuche)

→ um mit **Szintigraphie** den **Metabolismus** zu untersuchen

❖ **Röntgenstrahlung** (aus Röntgenröhren oder von γ -Strahlern)

hilft **Schädigungen** an Knochen, an Zähnen zu detektieren

❖ **β -Strahler** helfen die **Funktion von Organen** zu prüfen

z.B. Tc-99 Schilddrüsen Szintigraphie

❖ **α - und β -Strahlung** wird zur Zerstörung von **Krebszellen** eingesetzt

Die **neusten Forschungen** gehen dabei folgenden Weg

- Moleküle werden designed, die spezifisch an bestimmte Krebszellen andocken

- diese werden gekoppelt mit Molekülen, die mit bestimmten Elementen dotiert sind

→ wenn diese Elemente verschiedene Isotope haben (γ - und α -Strahler)

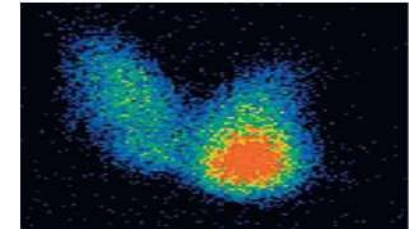
- kann man von außerhalb des Körpers sehen, **wo** der Tumor ist (γ)

- und ihn gleich (kleinräumig) **zerstören** (α)

- solche speziellen Nuklide werden z.B. in **Zyklotronen** hergestellt

- oder aus ihren Mutternukliden „**gemolken**“

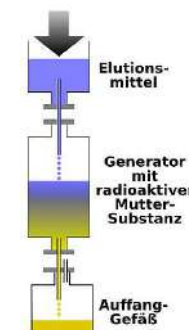
medizinischer
Seed KIT



Szintigramm [23]



Röntgenaufnahme
Hellerhoff [28]



Nuklid-
Generator
[42]

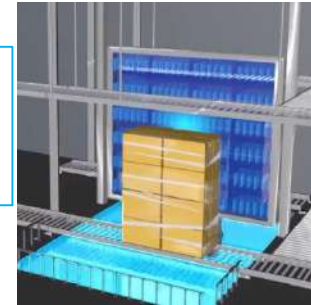
Technik

Aber auch sonst werden Radionuklide **technisch vielfältig eingesetzt**:

- **γ - und β -Strahlung** zur **Sterilisation**

- von medizinischen Instrumenten
- von Gemüse und Verpackungen

*γ -Sterilisation
von Paletten
[43]*



- **α -Strahler** für **Rauchmelder**

z.B. Am-241 → Messung der Schwächung der α -Strahlung in der Luft

→ sehr empfindlich

- **γ -Strahlung** für **Füllstandsmessung, Partikelzählung** etc.

z.B. mit Co-60 (umschlossenes System)

γ -Strahlung durchdringt sonst nicht optisch durchlässige Materialien

Messung der unterschiedlichen Dichte zweier Medien

→ durch die unterschiedliche Schwächung der γ -Strahlung

- **Neutronen** für **Füllstandsmessung, Korngrößenmessung, Messung der Spannungszustände** in Materialien

z.B. im Flugzeugbau

→ Neutronen dringen tief ins Material ein

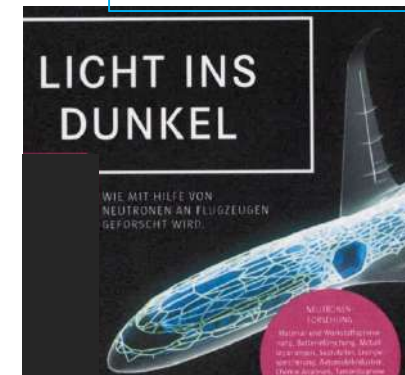
- **Dotierung** vom Medien zur **Verbrauchsmessung**

z.B. H-3 Dotierung von Ölen

*Rauch-
melder
[44]*



*tiefe Einblicke
mit Neutronen
[45]*



Technik

- **Aktivierung** von Materialien zur **Verschleißmessung**

z.B. Co-60, Fe-55 → Aktivierung der äußeren Schicht eines Anlagenteils

Messung der Strahlung des Abriebs beim Verschleißtest (Tribologie)

z.B. Co-60 Aktivierung der Schamotte von Hochöfen zur Rest-Dicken-Bestimmung

Messung des Co-60 Gehaltes im Stahl

- **Aktivierung** von Materialien zur **Kavitationsmessung**

z.B. H-3 Aktivierung in Ultraschallbädern

- **Radionuklidbatterien** sind sehr **langlebig**

z.B. U-235 → Pu-238 + Energie (nach 38 a noch 56 % Leistung)

→ alle Satelliten (auch Voyager etc.) werden damit bestückt

- radioaktive Strahlung kann anorganische oder organische Verbindungen

→ zur **Lumineszenz** anregen

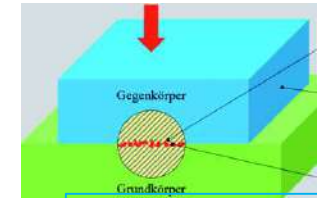
z.B. H-3 (Tritium) in langlebige **Lampen**

H-3 Gas gefüllte Gasrohre, die mit Szintillatoren ummantelt sind

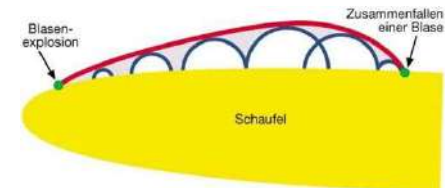
- **Analytik** von **Spurenelementen** mit radioaktiven Strahlern

➤ Neutronen-Aktivierungsanalyse

➤ Röntgenfluoreszenz



Tribologie [46]



Kavitationsblasen [47]



H-3 Schlüsselanhänger [48]

Grenzwerte

Darum gibt es **Grenzen** für **zusätzliche radioaktive Strahlung**

durch technische Verwendung von Radioaktivität (Ganzkörperdosis)

- für nicht strahlenexponierte Person < **1 mSv/a = 0,005 %** zusätzliches Risiko
- **beruflich strahlenexponiertes** Personal < **20 mSv/a = 0,1 %** tödliches Risiko (akzeptiert)

➔ darauf muss der Strahlenschutz ausgelegt werden

bei allen Anwendungen von natürlicher und künstlicher radioaktiver Strahlung

Durch:

- Verwendung von Abschirmungen
- Arbeiten im Abstand (fernhandelt)
- Verkürzung der Aufenthaltszeit im Strahlungsfeld
- Reduktion der Aktivitätsmenge (auch Substitution)



Daneben gilt im Strahlenschutz immer

➔ das **ALARA** Prinzip ➔ „As Low As Reasonable Achievable“

D.h. der Strahlenschutz steht immer im Spannungsfeld zwischen

➔ der **Gesundheit** und der **Ökonomie**

Medizinische Anwendungen ➔ weichen von all diesen Vorgaben ab

➔ sie sind durch **Rechtsverordnungen** geregelt



Aktuelle Situation

Zusammengefasst: **radioaktive Belastung** heute in der BRD [50]

Natürliche Strahlenexposition

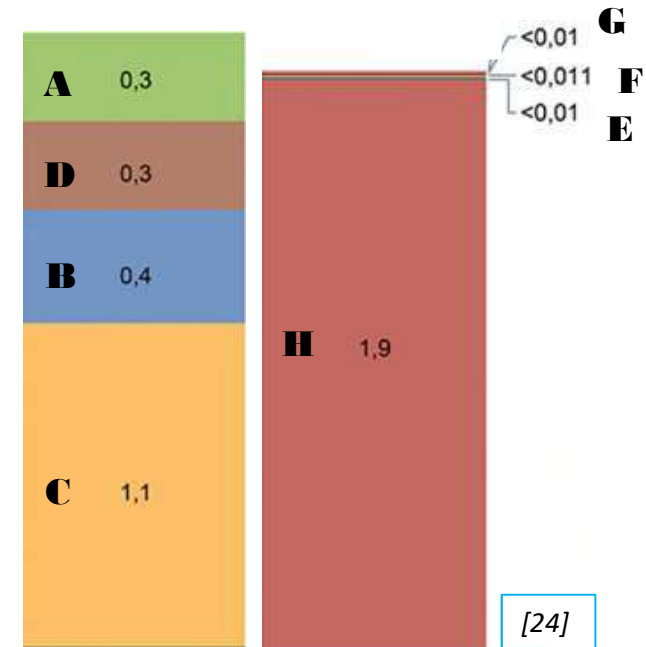
Wert in mSv

- **A** kosmische Strahlung (auf Meereshöhe) 0,3
- **B** terrestrische Strahlung 0,4
- **C** Inhalation von Radonprodukten
(Hauptsächlich in Wohnräumen) 1,1
- **D** Ingestion natürlicher radioaktiver Stoffe
(besonders C-14 und K-40; auch Uran) 0,3
- **gesamt** 2,1

Zivilisatorische Strahlenexposition

Wert in mSv

- **E** Fallout von Kernwaffenversuchen 0,01
- **F** Reststrahlung vom Tschernobyl Unfall 0,011
- **G** von kerntechnischen Anlagen 0,01
- **H** medizinische Anwendungen 1,9
- **gesamt** circa 1,9



Fukushima: Folgedosis bis zum 80sten Lebensjahr

- Präfektur Fukushima 1,1 - 11 mSv
- benachbarte Präfekturen 0,2 - 4 mSv
- übriges Japan 0,1 - 0,6 mSv [UNSCEAR-Report 2013]

[23]



[24]

Fazit

Die **Elemente** unserer Erde wurden überwiegend **im Weltall** gebildet

nicht alle Isotope der Elemente sind stabil

→ deshalb ist **Radioaktivität** allgegenwärtig

Radioaktive Isotope zerfallen unter Abgabe ionisierender Strahlung

→ diese **Strahlung** kann menschliche Zellen schädigen

darum wird radioaktive Strahlung gemessen, überwacht und begrenzt

→ das ist die Aufgabe des **Strahlenschutzes**

Die **hohe Energie** der radioaktiven Strahlung

➔ führt zu ihrer **technischen Anwendung** in vielen Bereichen

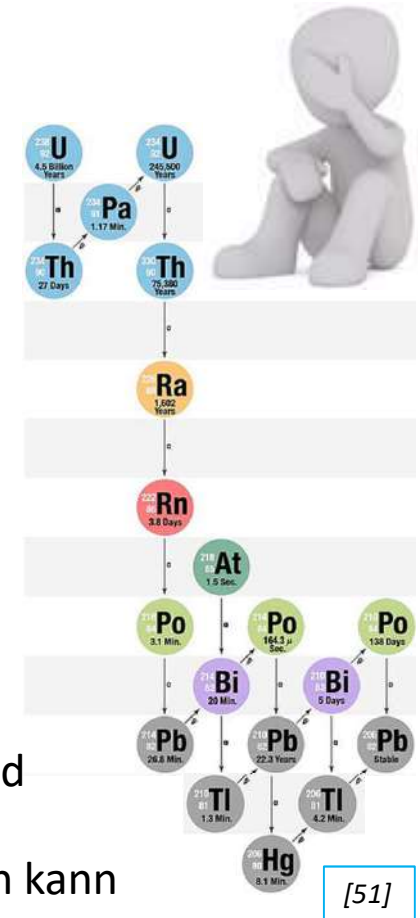
neben der Energiegewinnung ist die **Medizin** das größte Anwendungsfeld

Positiv ist, das radioaktive Strahlung sehr **empfindlich gemessen** werden kann

→ dadurch ist ihre Anwendung relativ sicher

chemische Schadstoffe sind viel schwieriger zu überwachen

**Ich danke für ihre Aufmerksamkeit
und hoffe auf eine rege Diskussion**



Literatur

- [1] HZDR Dresden: Forscher Tage - "Nukleare Astrophysik - Eine Reise durch die Elemente, Foto: Den Teilchen auf der Spur ©Copyright: CERN, 15.08.23 bis 16.08.23, <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=61073&pNid=0>
- [2] J.Müller, H.Lesch: Vom Urknall bis zum roten Riesen, Die Entstehung der chemischen Elemente, Chemie in unserer Zeit, 39, 100-105, 2005
- [3] M.Volkmer: Radioaktivität und Strahlenschutz, Kernenergie Basiswissen, Informationskreis KernEnergie, UbiaDruck Köln , 2006, DAfF Kernenergie im Dialog, 2013
- [4] T.Scherbel, M.Michelsen: Die Entstehung der Elemente – Kernumwandlung, Seminar PC, AC, Universität Bayreuth, SS 2013
- [5] DPG: Welt der Physik, Entstehung der Elemente, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/hadronen-und-kernphysik/elemententstehung-und-erzeugung/entstehung-der-elemente/>, z.B. Solar Dynamics Observatory/NASA, abgerufen: 21.07.2025
- [6] P.Heeren: Supernova: Ein Stern verschwindet – ein schwarzes Loch entsteht, Spektrum der Wissenschaft, 29.05.2017, z.B. kollabierender Stern gebiert schwarzes Loch NASA/ESA/P.Jeffries (STScI) (Ausschnitt)
- [7] Wikipedia: „Nukleosynthese“, z.B. Hippler, 2016: Atomkernbindungsenergien pro Nukleon, EcodeLuz CC By-SA 4.0 Datei; J.Hetser et al.: Supernova NGC 1952SST, NASA, [http://gallery.spitzer.caltech.edu/imagegallery/image.php?](http://gallery.spitzer.caltech.edu/imagegallery/image.php?image_name=sig06-028), image_name=sig06-028, 2006, gemeinfrei, abgerufen 21.07.2025

Literatur

- [8] Wikipedia: „s-Process“, z.B. R&R Gtrs - Own work, based on (1973). "Abundance of the Elements in the Solar System". Space Science Review 15: 121–146. DOI:10.1007/BF00172440, File:S-R-processes-atomic-mass-201-to-210.svg, Created: 13 March 2016, abgerufen 23.08.2025
- [9] https://austria-forum.org/af/Sparkling_Science/Aufsatzsammlung/Kernspaltung, Bild ist aus Wikicommons, abgerufen 04.09.2025
- [10] J.Letho, X.Huo: Chemistry and Analysis of Radionuclides, Laboratory Techniques and Methodology, Wiley-VCH, 2011
- [11] R.Kayser: Besondere Kollision von Neutronensternen, Welt der Physik, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/nachrichten/2023/gammastrahlen-ausbruch-besondere-kollision-von-neutronensternen/>, 2023
- [12] Spektrum: Moleküle Im All: Verwandtschaft des Lebens, 26.03.2008, <https://www.spektrum.de/news/verwandschaft-des-lebens/947840>
- [13] Universität Wuppertal: Das Periodensystem der Elemente: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/digitale-medien/animationen/grundlegendes/das-periodensystem-der-elemente>, abgerufen 04.09.2025
- [14] M.-K.Schopf: Entstehung und Entdeckung von Planeten, Universität Bonn, <https://astro.uni-bonn.de/~deboer/praktikant/planetentst.html>, 2003
- [15] T.Banner: „Ein großer Schritt vorwärts“: Bahnbrechende Entdeckung zur Planetenentstehung, Frankfurter Rundschau, 29.08.2025, abgerufen 06.09.2025

Literatur

- [16] F.Press, R.Siever: Earth, W.H.Freeman Company, San Francisco, 1974
- [17] Universität Bremen: Lagerstättenkundliche Sammlung, <https://www.geo.uni-bremen.de/projektarbeiten/Lucy-Schlicht/silger.html>, abgerufen 24.08.2025
- [18] Antonsusi: Isotopes of C, N and O, 2017, Wikipedia „Isotope“, https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Isotope_CNO.svg, abgerufen 24.08.2025
- [19] Z.Sóti et al.: Karlsruhe Nuclide Chart – New 10th edition EPJ Nuclear Sci. Technol. 5, 6, <https://doi.org/10.1051/epjn/2019004>, 2019
- [20] Orano Nuclear Expertise: Isotopes - what to Remember; <https://www.orano.group/en/unpacking-nuclear/isotopes-what-to-remember>, abgerufen 24.08.2025
- [21] Le Comptoir Géologique: Pechblende, <https://www.le-comptoir-geologique.com/pitchblende-encyclopedia.html>, abgerufen 24.08.2025
- [22] B.Abels et al.: Strahlung, Doc-Check-Flexikon, <https://flexikon.doccheck.com/de/Strahlung>, abgerufen 24.08.2025
- [23] F.Feßler, KIT-FTU: XSK912 - Strahlenschutz in Kernkraftwerken, Emission, Immission und Strahlenexposition, Dosis, Risiko und Strahlenexposition, 10.07.2025
- [24] Bayerisches Landesamt für Umwelt: UmweltWissen – Strahlung, Radioaktivität und Strahlung, Vorkommen und Überwachung, 2016
- [25] BfS (Bundesanstalt für Strahlenschutz): Ionisierende Strahlung, https://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/einfuehrung/einfuehrung_node.html, 2025, abgerufen 31.08.2025

Literatur

- [26] Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), 2018
- [27] M.Scheufens: Radium-Hype: als Radioaktivität in die Schokolade kam https://www.geo.de/wissen/forschung-und-technik/radium-hype--als-radioaktivitaet-in-die-schokolade-kam_35094194-35091814.html, 2024, abgerufen: 14.07.2025
- [28] K.-H.Szeifert: Strahlend - Schön - und (Un)Gesund, Ungewöhnliche Radioaktive Produkte, MTA-R & Radiologie Technologie, <https://www.mta-r.de/blog/strahlend-schoen-gesund-radioaktive-produkte/>, 2018, abgerufen 14.07.2025
- [29] Glühstrumpf: Original uploaded on de.wikipedia, CC BY-SA 3.0, Datei: Gluestrumpf2.jpg, 2010, abgerufen 17.07.2025
- [30] Glasmuseum Frauenau: Glas, das von selbst leuchtet?, <https://glasmuseum-frauenau.de/klickpunkte/uranglas/>, abgerufen 14.07.2025
- [31] Handwerkskammer Ostmecklenburg-Vorpommern: Strahlenschutzverordnung - NiSV, <https://www.hwk-omv.de/artikel/strahlenschutz-verordnung-nisv-18,0,2281.html>, abgerufen 01.09.2025
- [32] H.Weidner: Hormesis, Biologische Wirksamkeit, 2013, Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/Hormesis#/media/Datei:Hormesis.GIF>, gemeinfrei, abgerufen 01.09.2025

Literatur

- [33] ntv: Besuch im Radonstollen - Radioaktivität lindert Schmerzen, <https://www.n-tv.de/wissen/Radioaktivitaet-lindert-Schmerzen-article3104826.html>, 14.04.2011, 13:28 Uhr, abgerufen 01.09.2025
- [34] GeologyScience: Wie bestimmen Geologen das Alter von Gesteinen? <https://de.geologyscience.com/Geologie/Wie-bestimmen-Geologen-das-Alter-von-Gesteinen%3F/>, 2018, abgerufen 01.09.2025
- [35] HDB: Wolfram Schmelzelektroden, Tungsten 2% Thorium 7 " Good Price WT20 Tungsten Electrode, https://www.alibaba.com/product-detail/HDB-Tungsten-2-Thorium-7-Good_1039574934.html?spm=a2700.find_similar.normal_offer.d_title.61285f932r3p8Z, abgerufen 14.07.2025
- [36] SwissInfo: Uran-Munition: <https://www.swissinfo.ch/ger/schweizer-politik/uran-munition-nach-blutuntersuchungen-weitere-abklaerungen-notwendig/1871032>, 2001
- [37] B.Ganse, F.Spanier: Einfluss der kosmischen Strahlung auf den Menschen, Welt der Physik, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/einfluesse-auf-den-menschen/kosmische-strahlung/>, 2011
- [38] Bundesverband Geothermie, Lexikon der Geothermie: Scales, Scaling, <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/s/scales-scaling>, abgerufen 02.09.2025

Literatur

- [39] Wikipedia „Plutonium“, Image ID: 2006407: Ein PuO_2 -Pellet (^{238}Pu) glüht durch den eigenen radioaktiven Zerfall, Department of Energy - <http://www.doedigitalarchive.doe.gov/ImageDetailView.cfm?ImageID=2006407&page=search&pageid=thumb>, Gemeinfrei, Datei:Plutonium pellet.jpg, 2009, abgerufen 01.09.2025
- [40] Forschungszentrum Jülich: Kernfusion; https://www.fz-juelich.de/iek/iek-4/DE/Forschung/08_DEMO/node.html, abgerufen 08.07.2021
- [41] PSI (Paul Scherrer Institut) Medienmitteilung Grundlagen der Natur: Der Protonenbeschleuniger des PSI: 40 Jahre Spitzenforschung, <https://www.psi.ch/de/news/medienmitteilungen/der-protonenbeschleuniger-des-psi-40-jahre-spitzenforschung>, 2014, abgerufen 01.09.2025
- [42] Wikipedia „Ga-68 Generator“ D.Hünniger: Illustration of the main components of a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generator CC BY-SA, Nuclide Generator Schematic-de.svg, 2024, abgerufen 01.09.2025
- [43] BGS Beta-Gamma-Service: Mit Gammastrahlen gegen Keime: So funktioniert die Strahlensterilisation, <https://www.youtube.com/watch?v=ot1yHuMpcSs>, abgerufen 02.09.2025
- [44] H.von Philipsborn, R.Geipel: Radioaktive Gebrauchsgegenstände im Unterricht, Radioactive Commodities for Teaching, Radiometrisches Seminar, Universität Regensburg, 2006 ?

Literatur

- [45] DATF (Deutsches Atomforum): Kernenergie im Dialog, Kerntechnik in Forschung und Alltag, www.kernenergie.de, 2013
- [46] T.Lampke, R. Drehmann: Reibung und Verschleiß – Tribologisches System, Woltech, https://www.wotech-technical-media.de/womag/lexikon/Verschleiss/Grundlagen/Grundlagen_3.php, abgerufen 04.09.2025
- [47] Prozesstechnik Online: Kavitation vorhersagen, <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/kavitation-vorhersagen/>, 2002
- [48] Wikipedia „Tritium“, Bionerd: Schlüsselanhänger mit Tritium, CC BY 3.0, Datei: Tritium-h3 bionerd.jpg, 2010
- [49] Sofatutor: Strahlenschutzmaßnahmen, <https://www.sofatutor.com/physik/videos/strahlenschutzmassnahmen#schutzmassnahmen-gegen-radioaktive-strahlung>, abgerufen 01.09.2025
- [50] L.Stammler, Tumorrisiko und Nephrotoxizität bei Uranexposition, Dissertation, Universität Ulm, Klinik für Innere Medizin I, 2015
- [51] O.Bersillon et al.: The Nubase evaluation of nuclear and decay properties, Nuclear Physics A, Volume 729, Issue 1, pp. 3-128, 2003

Literatur

- Max-Planck Institut für Radioastronomie: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/607372/elemente>, abgerufen: 21.05.2025
- [Universität Bonn](https://astro.uni-bonn.de/~deboer/praktikant/planetentst.html): Entstehung und Entdeckung von Planeten, <https://astro.uni-bonn.de/~deboer/praktikant/planetentst.html>, abgerufen 23.07.2025
- G.Bader: Wissenswertes zu Kosmologie und Teilchenphysik. Albert Einstein und die bedeutendsten Theorien der Physik, <https://silo.tips/download/wissenswertes-zu-kosmologie-und-teilchenphysik-albert-einstein-und-die-bedeutend>, 2016
- M.Matsuura et al.: The JWST/MIRI view of the planetary nebula NGC 6302 – I. A UV-irradiated torus and a hot bubble triggering PAH formation, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 542, Issue 2, pp. 1287–1307, <https://doi.org/10.1093/mnras/staf1194>, 2025
- S.Pleth, U.Köhler: Unser Sonnensystem, DLR, Institut für Planetenforschung, 2024
- J.Birkhan, Technische Universität Darmstadt: Radioaktiv oder nicht, das ist hier die Frage! Eine unterhaltsame Kurzgeschichte aus dem praktischen Strahlenschutz, <https://orcid.org/0000-0002-4366-7492>, Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International, 2024
- C.Kunze et al: Ermittlung der potentiellen Strahlenexposition durch Ableitungen von NORM-Industrien, Endbericht, BfS 3615S12232, IAF KS4700, 2017

Zusatzinformation



Uranglas

Pu Wikipedia



*Anti-Elektrostatik-
Pinzel Am-241*

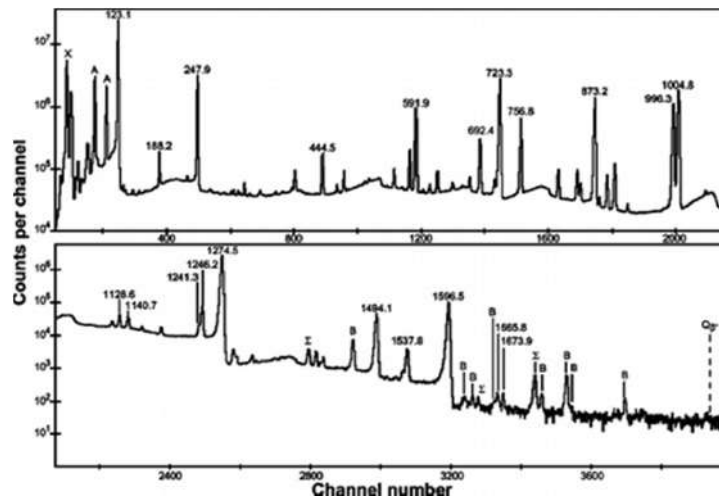


*Variabel bestückbarer Mini-Bagger
in MAW Zelle KTE*

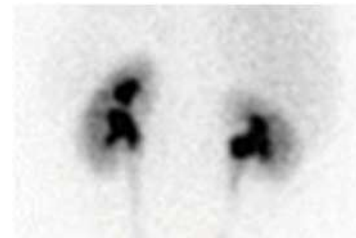


Oberflächen Dekontamination KTE

Zusatzinformation



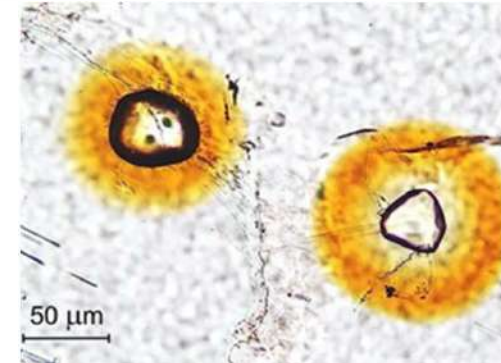
*γ -Spektrum
Kulp 2004*



*Dünnschicht
Szintigramm H-3*

Mineralveränderung durch radioaktive Strahlung

<https://www.chemie.de/news/1167901/mineral-heilt-sich-selbst-von-schaeden-durch-radioaktive-strahlung.html>



*DL-Atlas
Uni Stuttgart 2025*

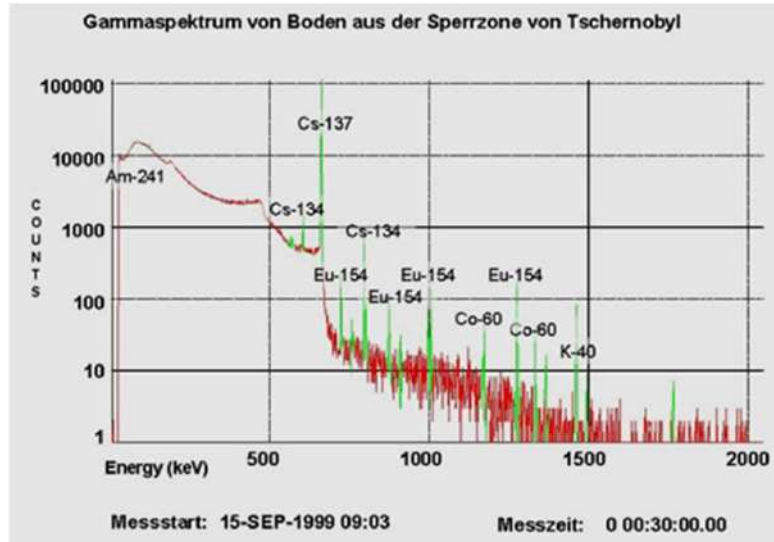
DL-Messung Bothe, RCA Workshop 2018



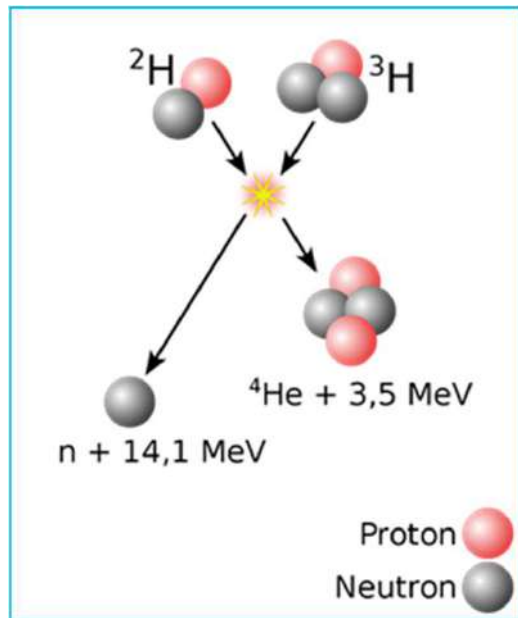
*In Situ γ -Spek.
Naber 2007*



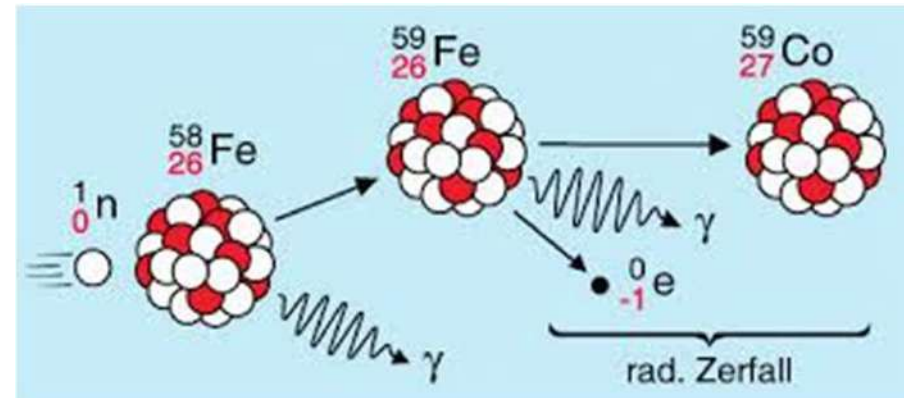
Zusatzinformation



γ -Nuklidvektor, Umgebung Tschernobyl
A.Neu, LUBW 2006



Fusion



S-Prozess
Volkmer 2006 [3]

Zusatzinformation

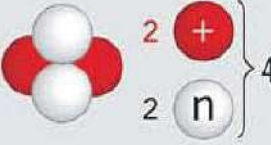
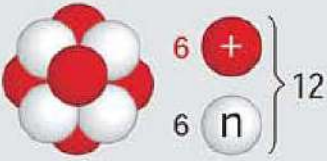
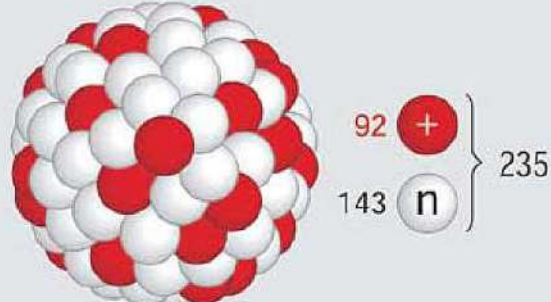
Risiko	Lebenszeit Verkürzung
Kernkraftwerk 20 Jahre	0,3 Tage
Medizinische Bestrahlung	6 Tage
Arbeitsunfälle	43 Tage
Haushaltsunfälle	95 Tage
Alkoholkonsum	130 Tage
Autounfälle	200 Tage
Landwirtschaft	277 Tage
Bau	302 Tage
Bergbau	328 Tage
Übergewicht (15 %)	2,7 Jahre
Zigaretten (20 pro Tag)	6,5 Jahre

Health and Safety Risk	Estimated Life Expectancy Loss (Average)
Smoking 20 cigarettes a day	6.5 years
Overweight (by 15 percent)	2.7 years
Mining and quarrying	328 days
Construction	302 days
Agriculture	277 days
Motor vehicle accidents	200 days
Alcohol consumption (U.S. average)	130 days
Home accidents	95 days
Manufacturing	43 days
Occupational exposure (1 rem/yr. for 30 years)	30 days
Medical radiation	6 days

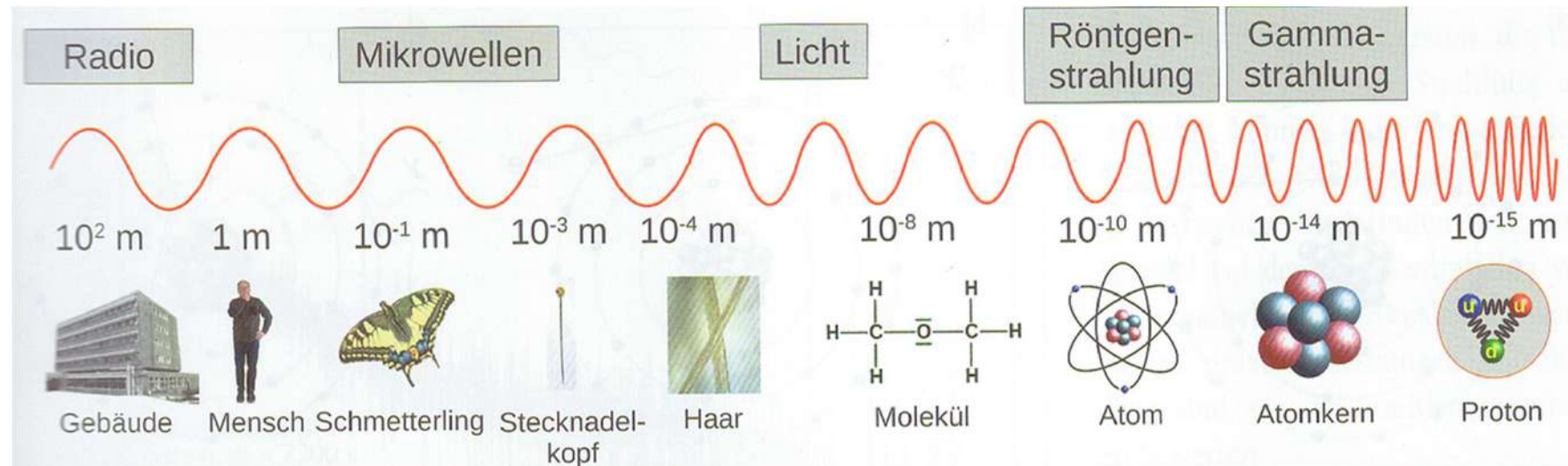
* Adapted from Regulatory Guide 8.29, and Cohen and Lee, "A Catalogue of Risks," Radiation Protection, Vol. 36, June 1979.

Table 1. Estimated Loss of Life Expectancy From Industrial/Health Risks*

Zusatzinformation

Aufbau der Atomkerne im Modell			
 ${}^4_2\text{He}$ Kern eines Heliumatoms	 ${}^{12}_6\text{C}$ Kern eines Kohlenstoffatoms	 ${}^{235}_{92}\text{U}$ Kern eines Uranatoms	Massenzahl: Gesamtzahl der Protonen und Neutronen Kernladungszahl: Anzahl der Protonen

Volkmer 2006



Zusatzinformation

