

# Radioaktivität und Strahlung

Wintersemester  
2017/18

Claus Grupen



# **Themen**

**Historisches**

**Physikalische Grundlagen**

**Einheiten des Strahlenschutzes**

**Messgeräte**

**Natürliche Strahlenbelastung**

**Der radioaktive Mensch**

**Radon und Rauchen**

**Biologische Wirkung**

**Technische Strahlenbelastung**

**Spalt- und Fusionsreaktoren**

**Naturreaktoren (Gabun)**

**Strahlenunfälle**

**Medizinische Anwendungen**

**Department Physik**

Prof. Dr. Claus Grupen  
Emmy-Noether-Campus, Walter-Flex-Str. 3  
57068 Siegen  
Telefon +49 271 740-3795  
grupent@hep.physik.uni-siegen.de  
www.physik.uni-siegen.de

## Bescheinigung

über die Teilnahme an einem  
**Elementaren Grundkurs im Strahlenschutz**

Frau/Herr **Xxxx Yyyy**

hat bei Prof. Dr. Claus Grupen im Wintersemester 2017/18 an einem Kurs zum Erwerb der Grundkenntnisse im Strahlenschutz regelmäßig teilgenommen und die Abschlussprüfung bestanden.

In einem Kompaktkurs entsprechend 18 Vorlesungsstunden wurden die Themenbereiche

- Messgrößen im Strahlenschutz
- Wechselwirkungen ionisierender Strahlung
- Strahlenschutzmesstechnik
- Gesetzliche Grundlagen
- Umweltradioaktivität
- Biologische Strahlenwirkung
- Strahlenunfälle
- Kernkraftwerke
- Kernwaffen

behandelt.

Siegen, 24. Januar 2018

Unterschrift des verantwortlichen  
Leiters der Veranstaltung  
Prof. Dr. D. Grupen

# Historischer Überblick

<b>Röntgen</b>	<b>“Röntgenstrahlen”</b>	<b>1895/ 1896</b>
<b>Becquerel</b>	<b>Fluoreszenz von Uransalzen</b>	<b>1896</b>
<b>Rutherford</b>	<b><math>\alpha</math>, <math>\beta</math>, <math>\gamma</math>-Strahlen</b>	<b>1899/ 1902</b>
<b>Joliot/Curie</b>	<b>Künstliche Radioaktivität</b>	<b>1934</b>
<b>Hahn/ Straßmann (Meitner)</b>	<b>Uranspaltung</b>	<b>1938/ 1939</b>
	<b>Erzeugung von Transuranen <math>Z \leq 118</math> bekannt</b>	<b>2017</b>

# Wilhelm Conrad Röntgen



Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923). Erste Röntgenaufnahme von Anna Röntgen 1895



# Historische Röntgenröhren



 alamy stock photo

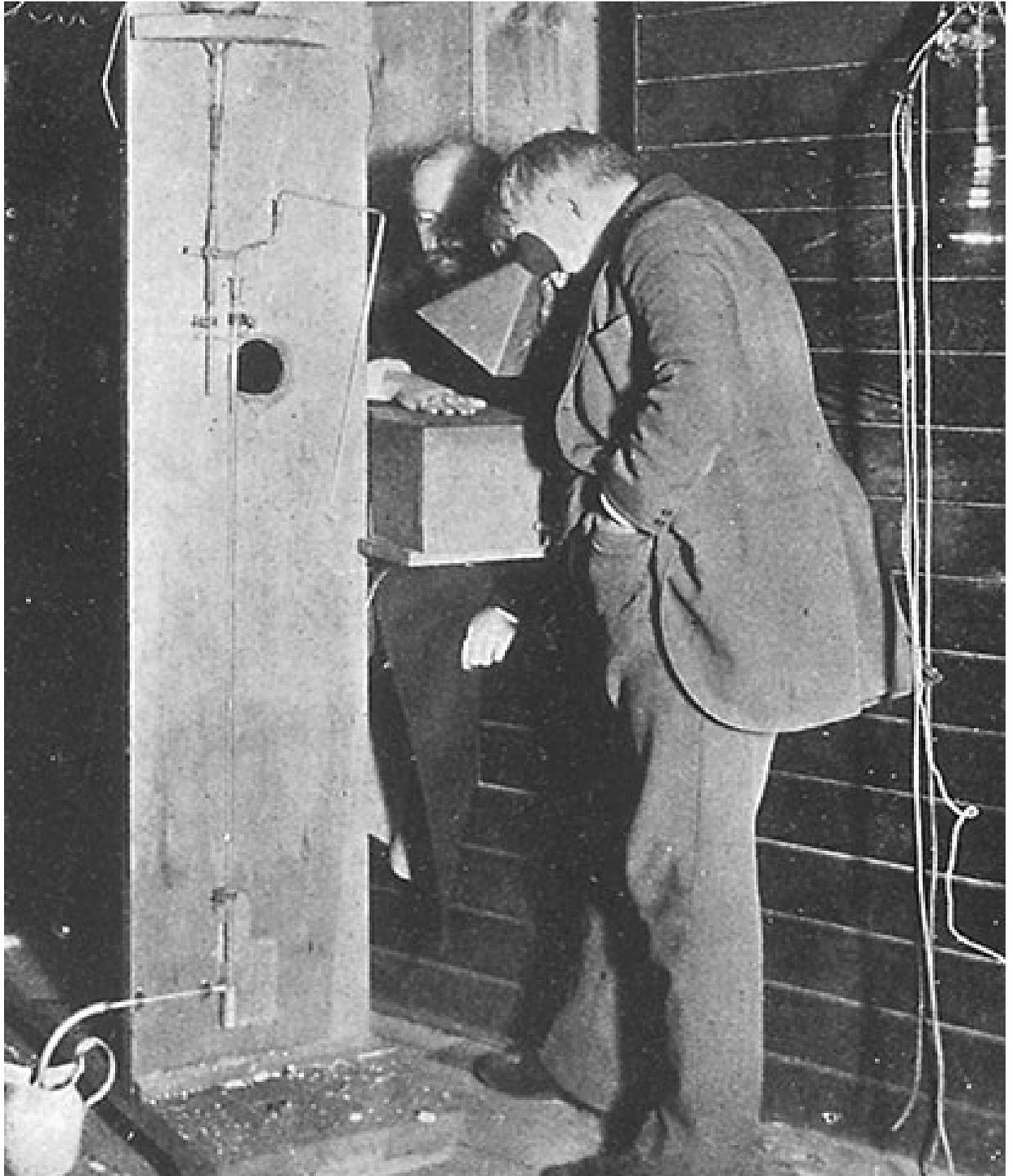
ACA3NK  
www.alamy.com

# Frühe Thoraxuntersuchung

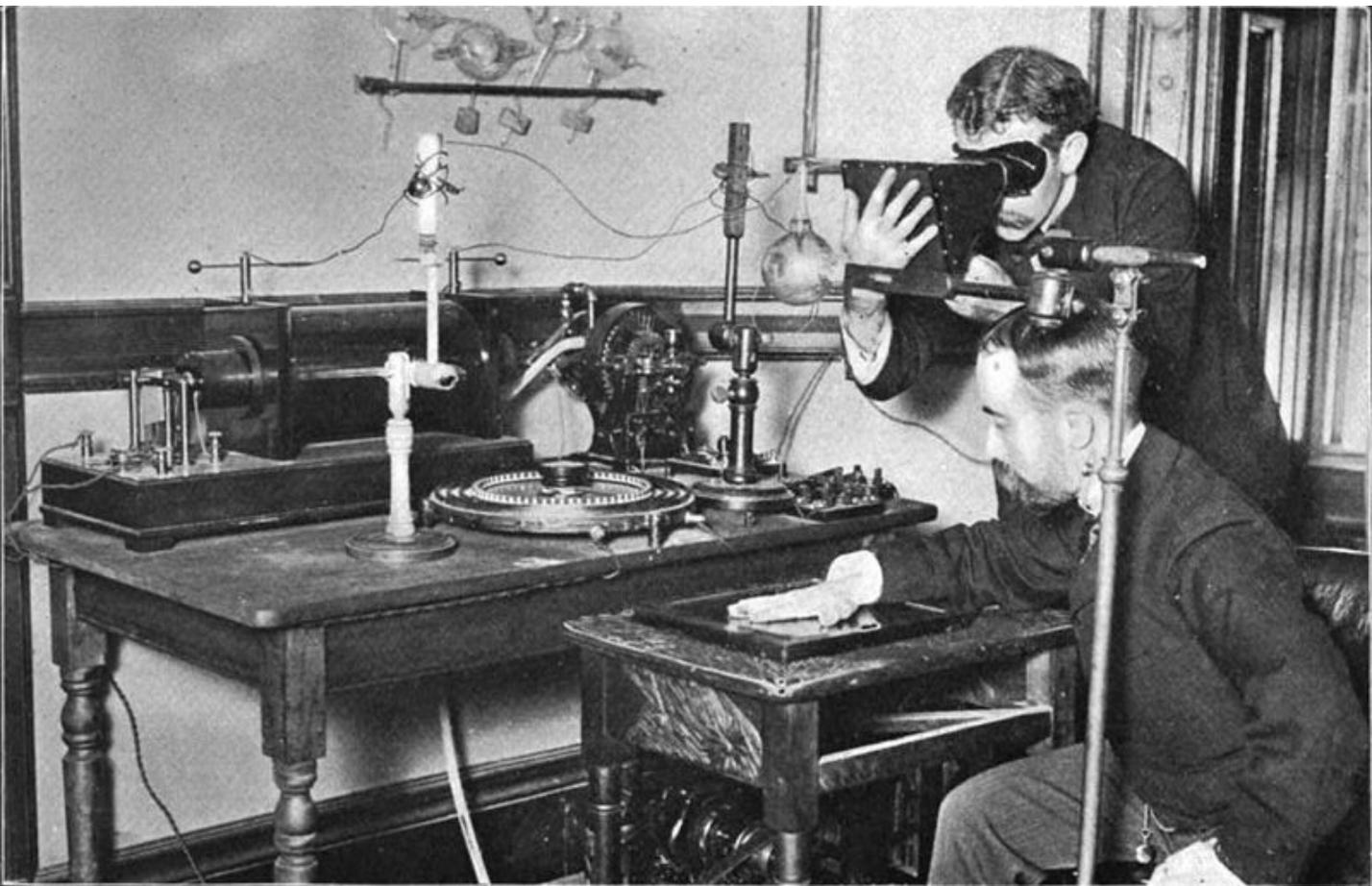


Arzt im Strahlengang<sup>8</sup>

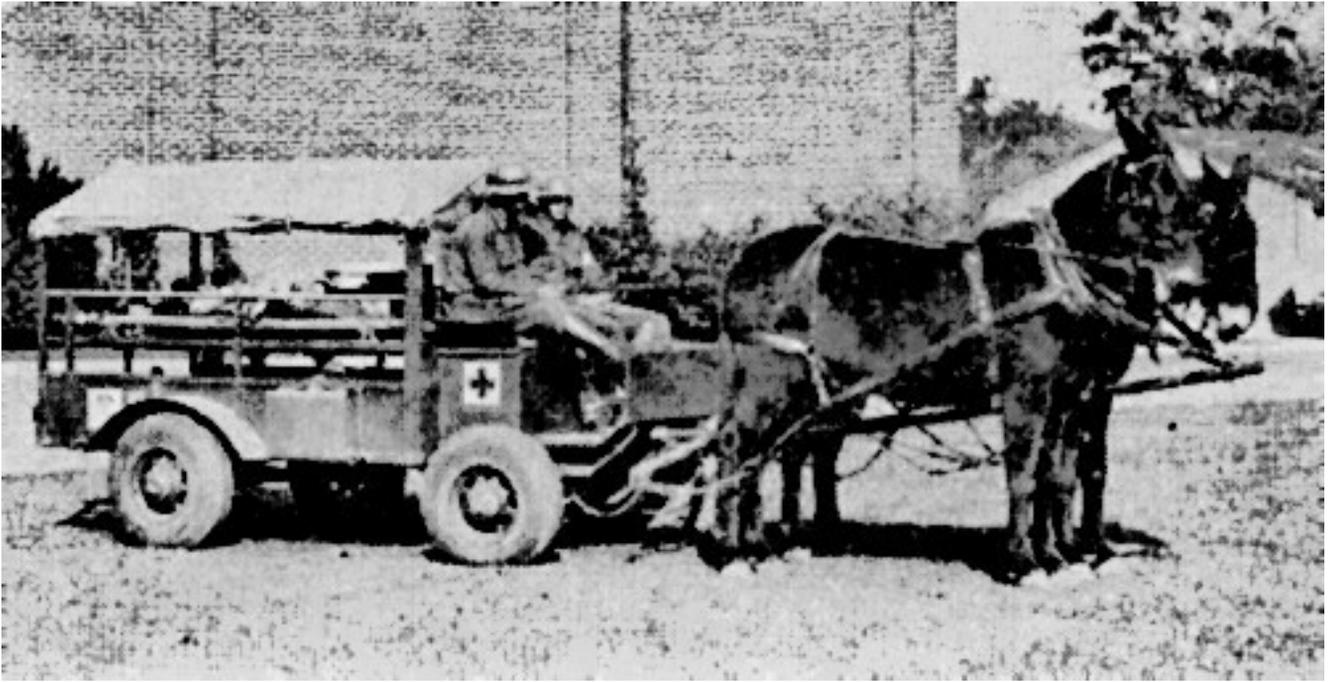
# Fluoroskop



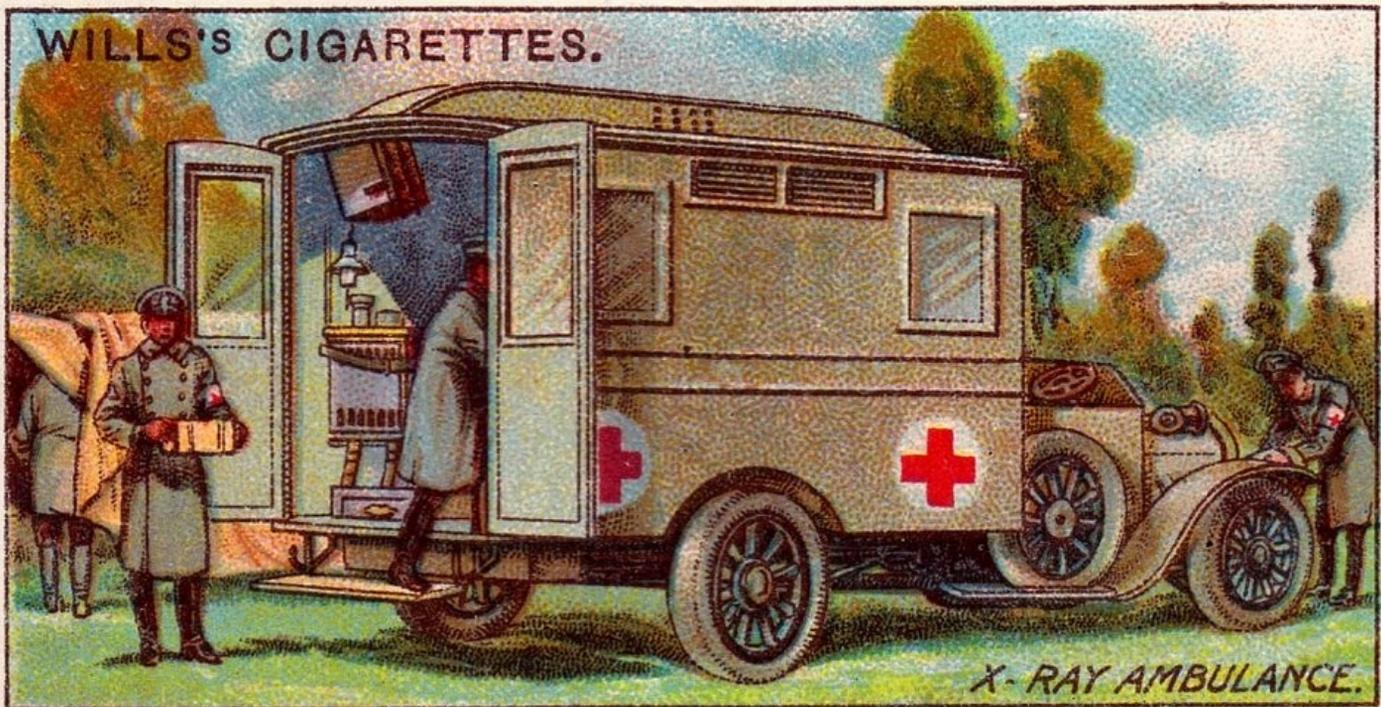
# Röntgenaufnahme der Hand



# US Army Ambulance



# Mobile Röntgenstation



PASSED FOR PUBLICATION BY THE PRESS BUREAU. 21-9-16.

**Für Kriegseinsätze**

**Copyright: AuntMinnieEurope 1911**

# Fuß- und Schuhdurchleuchtungen



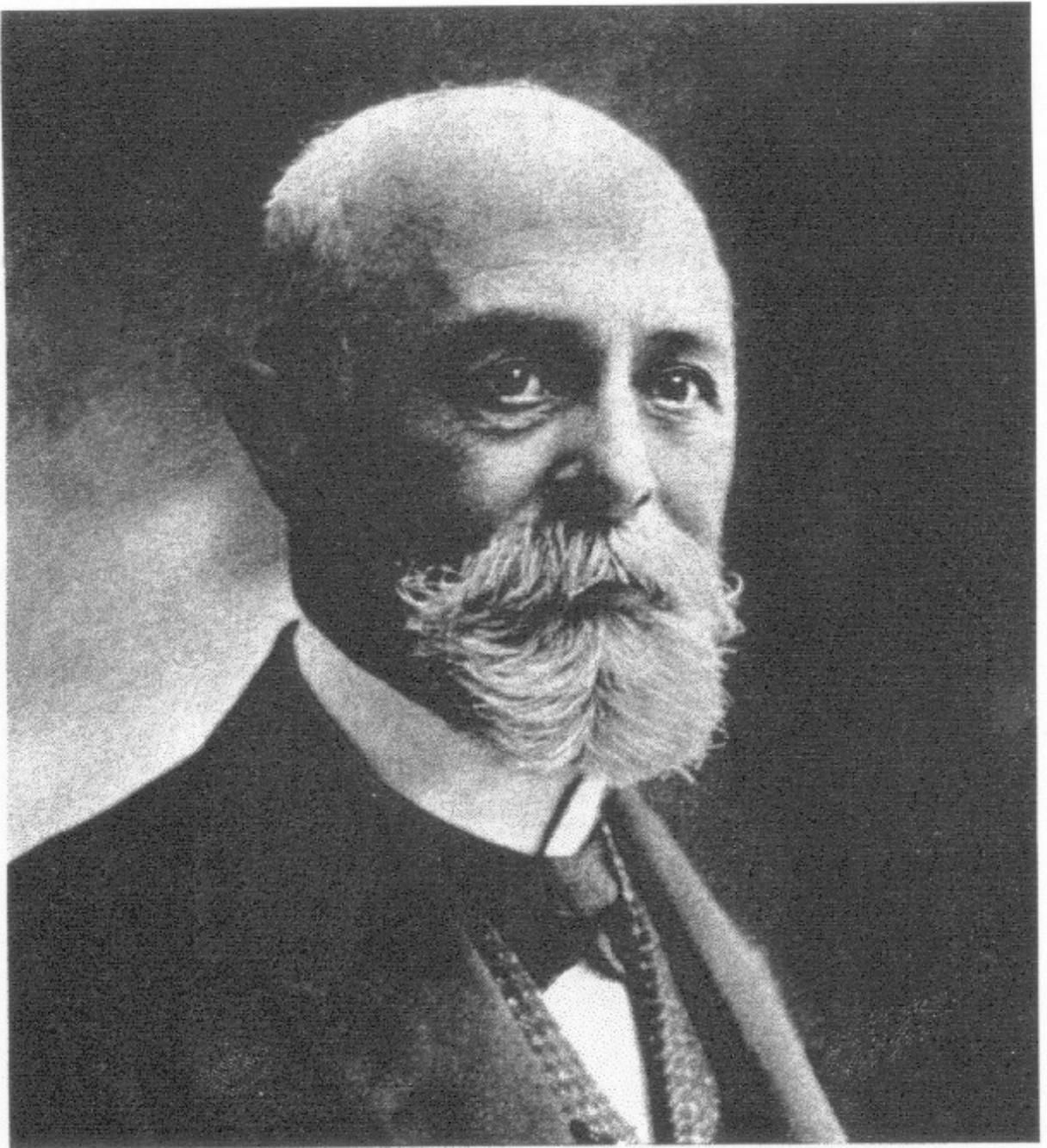
# Moderne Röntgenaufnahme



# Anfänge des Strahlenschutzes



~1900

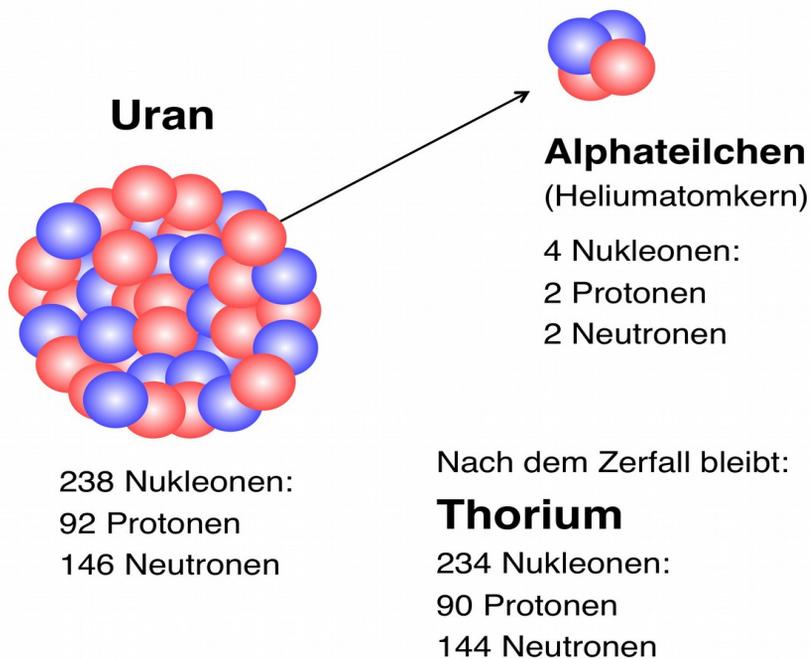
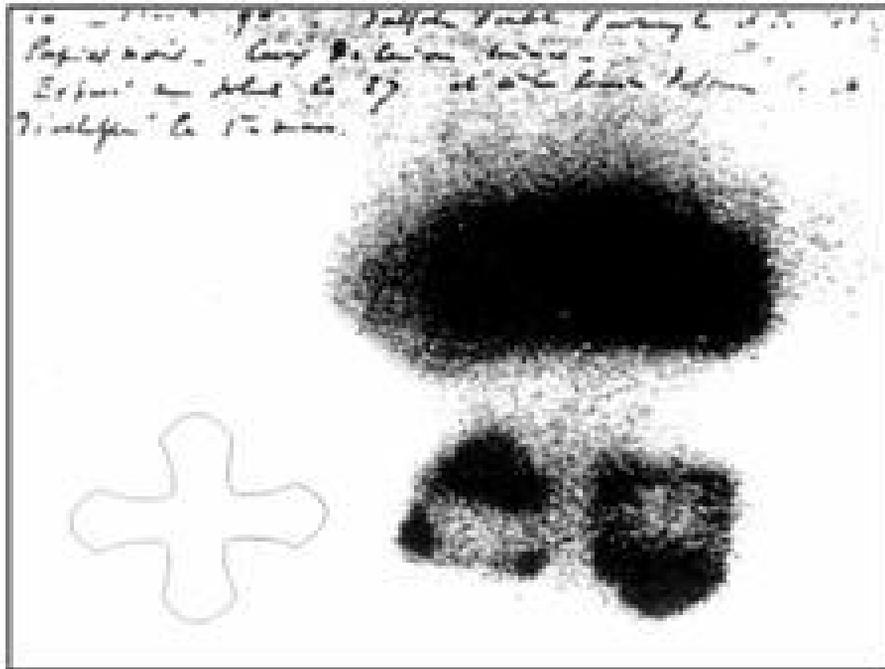


Henri Antoine Becquerel · 1903

Geboren am 15. Dezember 1852 in Paris

Gestorben am 25. August 1908 in Le Croisic

# Schwärzung der Photoplatte durch Alpha-Teilchen vom Uran-Zerfall (1896)



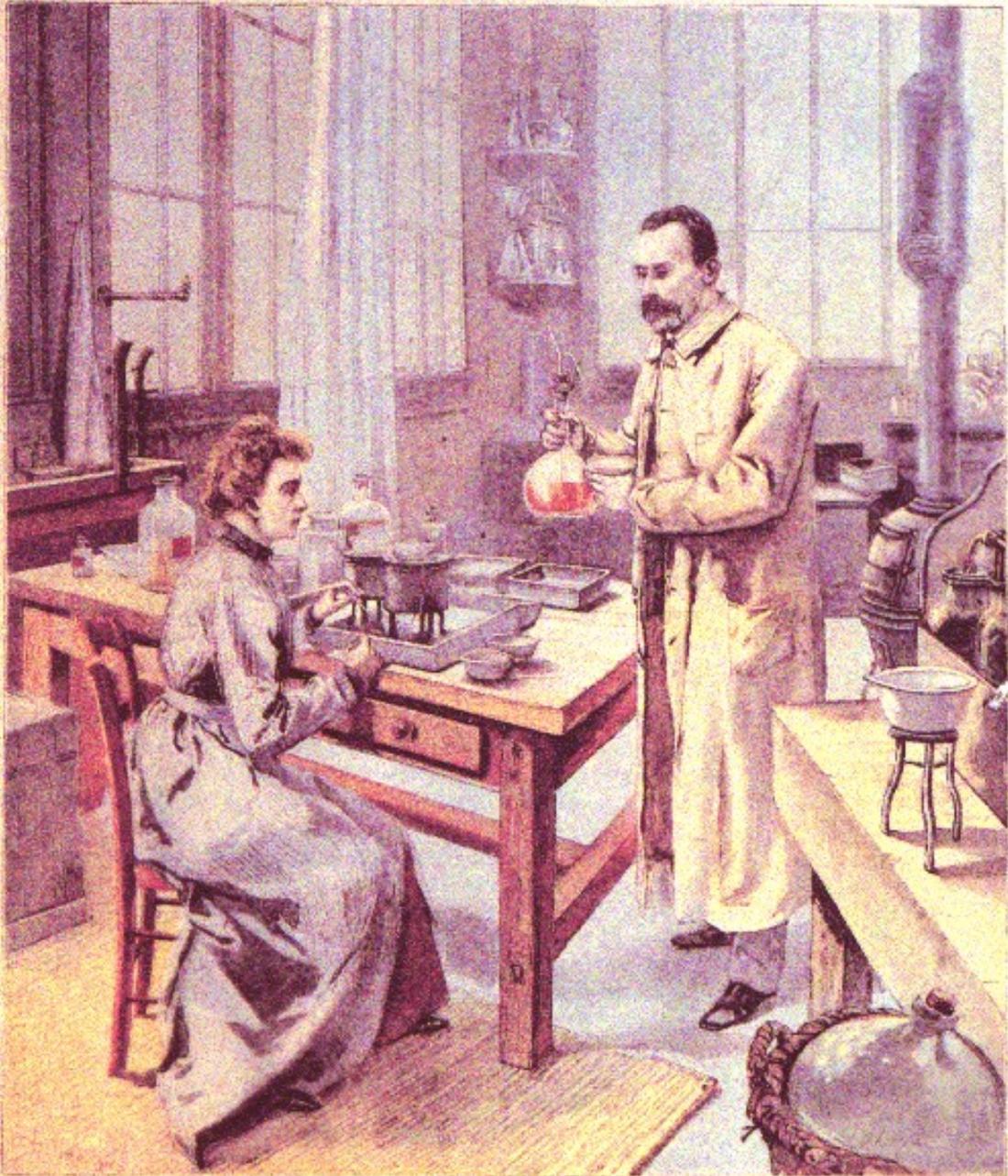
# Le Petit Parisien

Le Petit Parisien  
Supplément  
Littéraire  
Illustré

SUPPLÉMENT LITTÉRAIRE ILLUSTRÉ

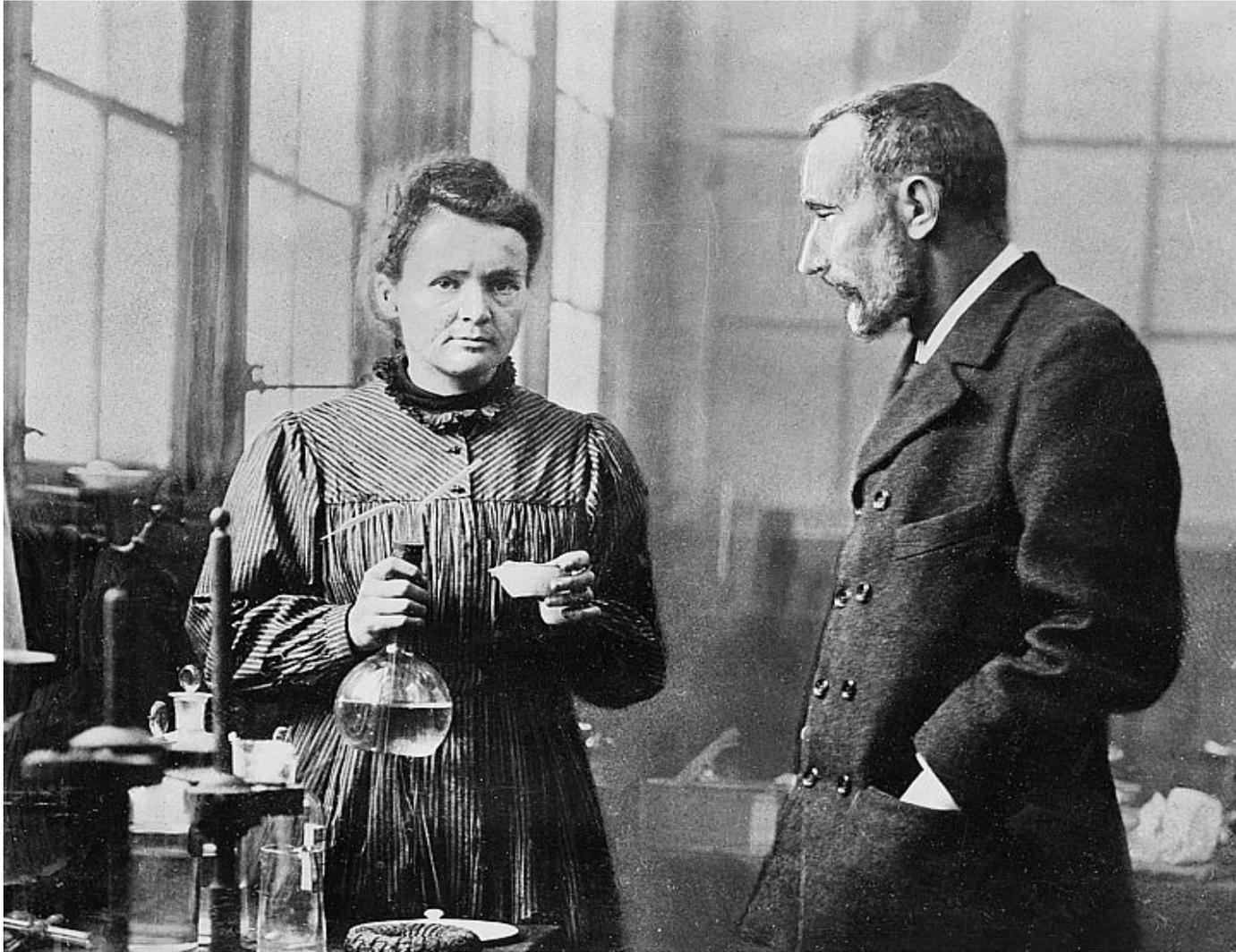
DIRECTION: 18, rue d'Enghien (10<sup>e</sup>), PARIS

ABONNEMENTS  
PARIS: 12 ANS, 10 FR. PAR AN  
DEPARTS: 12 ANS, 12 FR. PAR AN  
ÉTRANGER: 12 ANS, 15 FR. PAR AN



UNE NOUVELLE DÉCOUVERTE. — LE RADIUM  
M. ET M<sup>ME</sup> CURIE DANS LEUR LABORATOIRE

# Marie und Pierre Curie in Paris



entdeckt u.a. die Elemente Polonium  
und Radium aus der Pechblende

Ich glaube nicht, Pierre, dass wir Radium aus Pechblende extrahieren können, nur indem wir dagegen treten.



Claus Gmper 2014



**Uranit**  
**160 kBq/g**

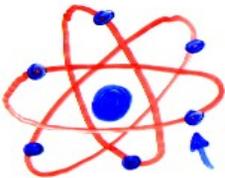
# Physikalische Grundlagen



**Kristall** (z.B. NaCl)

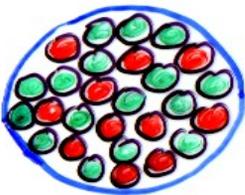


**Molekül** (z.B. H<sub>2</sub>O)



Elektronen

**Atom** (hier: Kohlenstoff)



**Kern** (besteht aus Protonen und Neutronen)

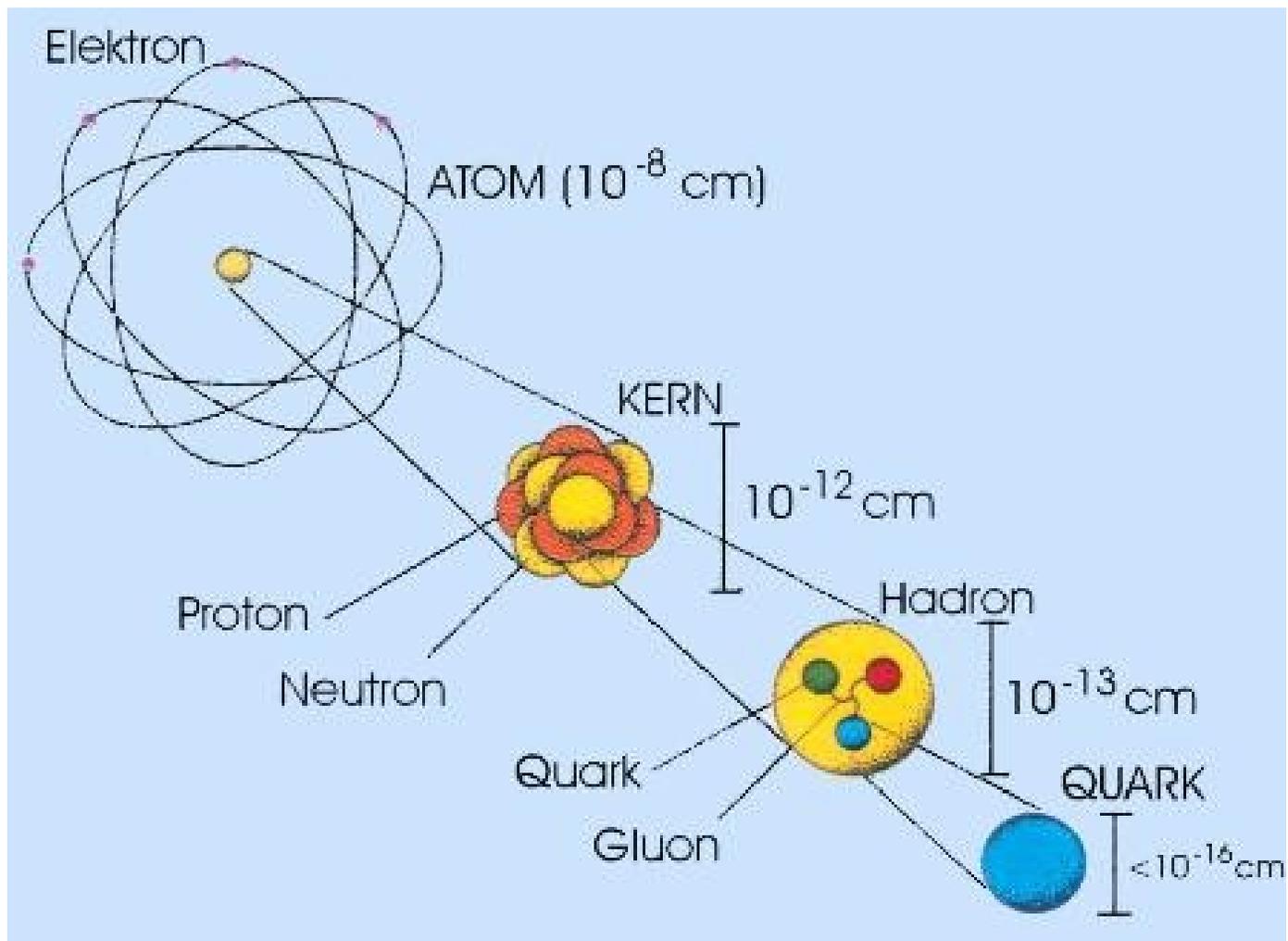


**Proton** (enthält Substruktur)



**Quark** (kleinste Teilchen)

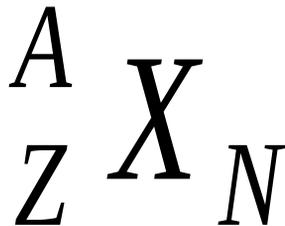
# Größenvergleich



# Alle Elementarteilchen auf einen Blick

Fermionen I			II	III	E-Bosonen	Boson
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0	0	125,9 GeV
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	0
Name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon	<b>H</b> Higgs Boson	
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> Gluon		
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> Elektron- Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> Myon- Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> Tau- Neutrino	91,2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson		
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> Tau	80,4 GeV ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> W Boson		
Leptonen						

# Bezeichnung von radioaktiven Stoffen



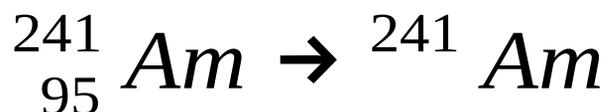
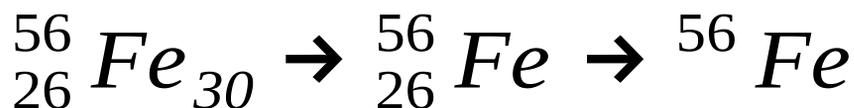
**X** - Elementname (z.B. Fe = Eisen)

**Z** - Zahl der positiv geladenen  
Kernbausteine (Protonen)

**N** - Zahl der neutralen  
Kernbausteine (Neutronen)

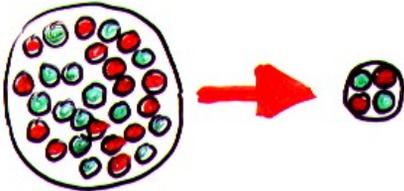
**A** - Massenzahl;  $A = Z + N$

## Beispiele

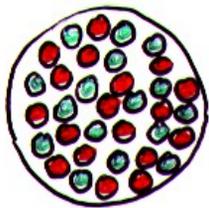
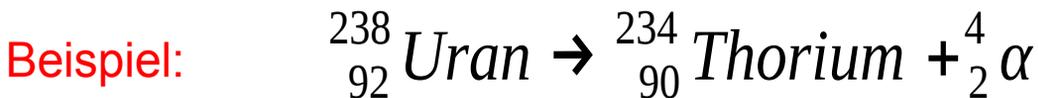


# Radioaktive Stoffe kommen aus dem Kern

## $\alpha$ -Zerfall



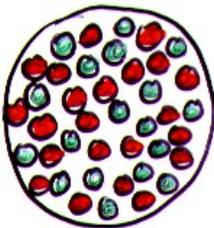
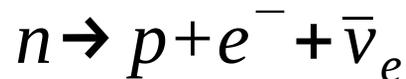
$\alpha$ -Teilchen  $\equiv$  Heliumkern



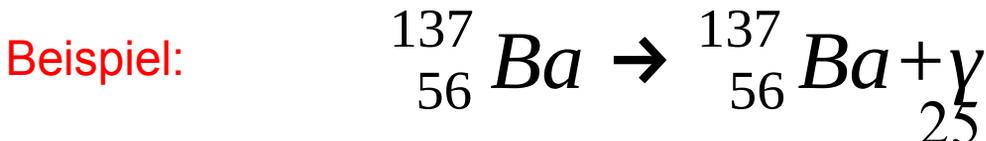
Elektron

## $\beta$ -Zerfall

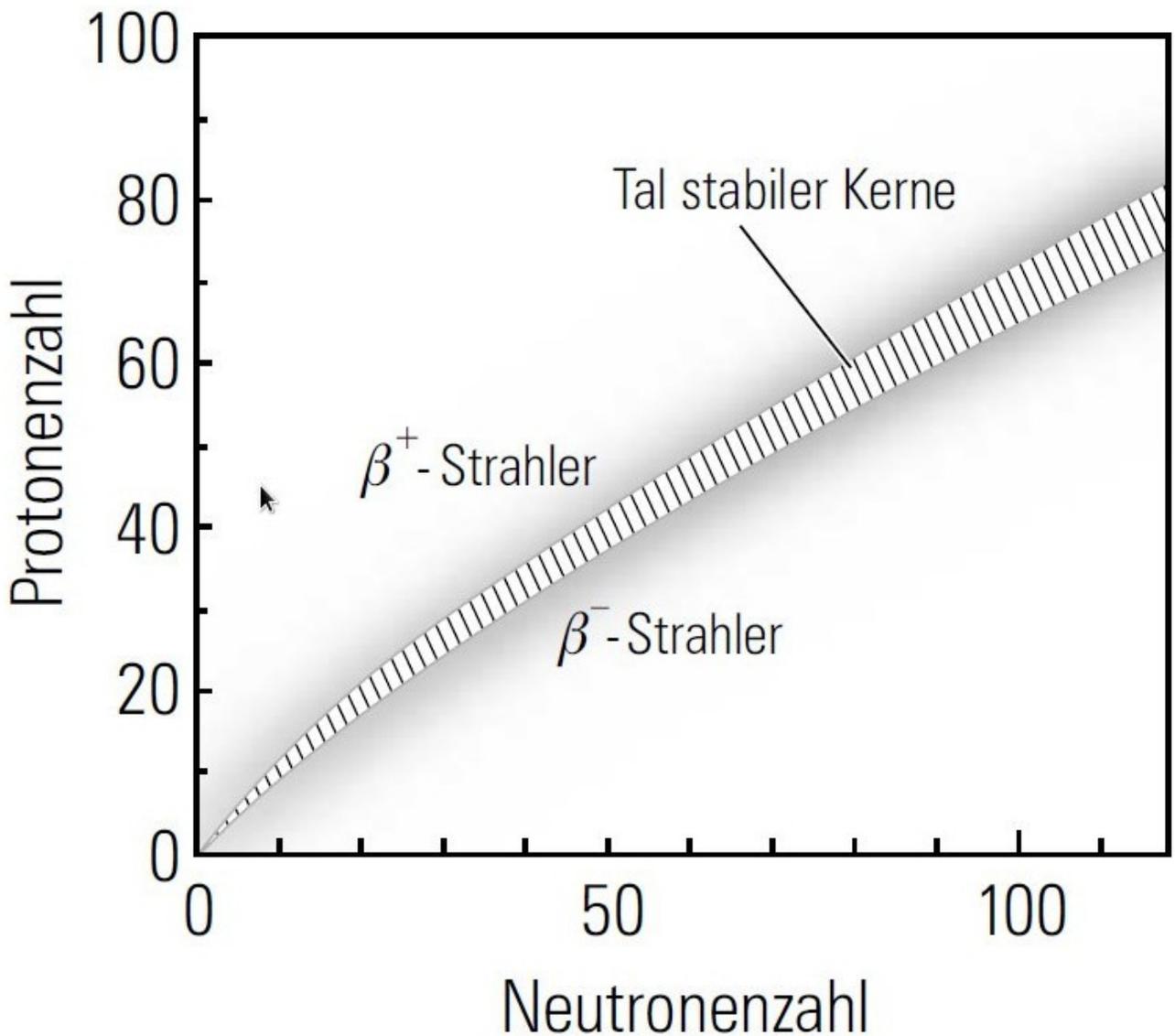
Neutrino



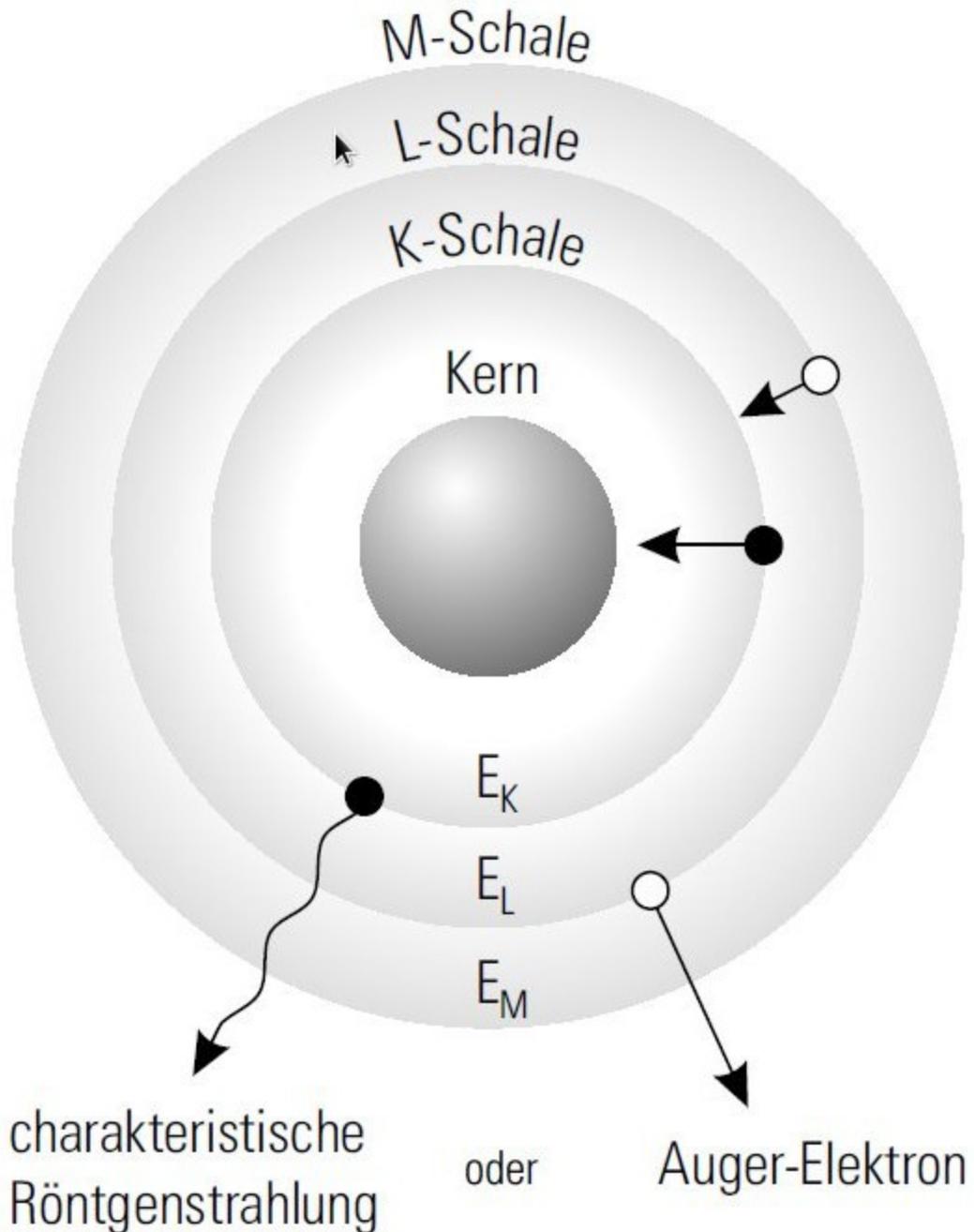
## $\gamma$ -Zerfall



# Nuklidkarte (stark vereinfacht)



# Charakteristische Röntgenstrahlung und Auger-Elektronen

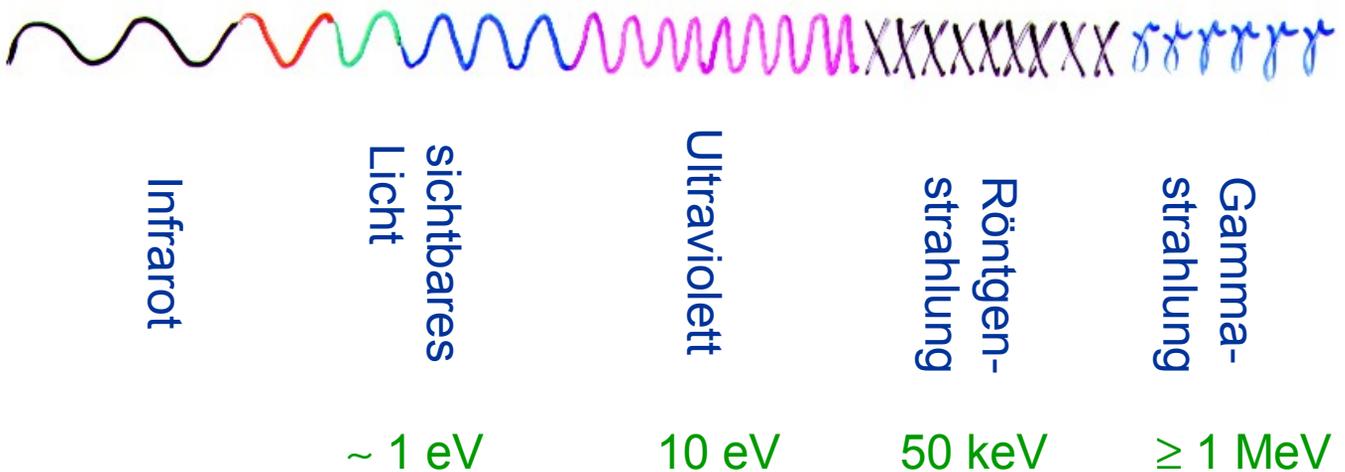


# Was sind $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ -Strahlen?

$\alpha$   $\equiv$  Heliumkerne

$\beta$   $\equiv$  Elektronen ( $\beta^-$ )  
Positronen ( $\beta^+$ )

$\gamma$   $\equiv$  „energiereiches“ Licht



Die radioaktive Strahlung kommt aus dem

**Kern**

Kernspaltung  
Kernkraftwerke  
Kernwaffen

**und nicht**

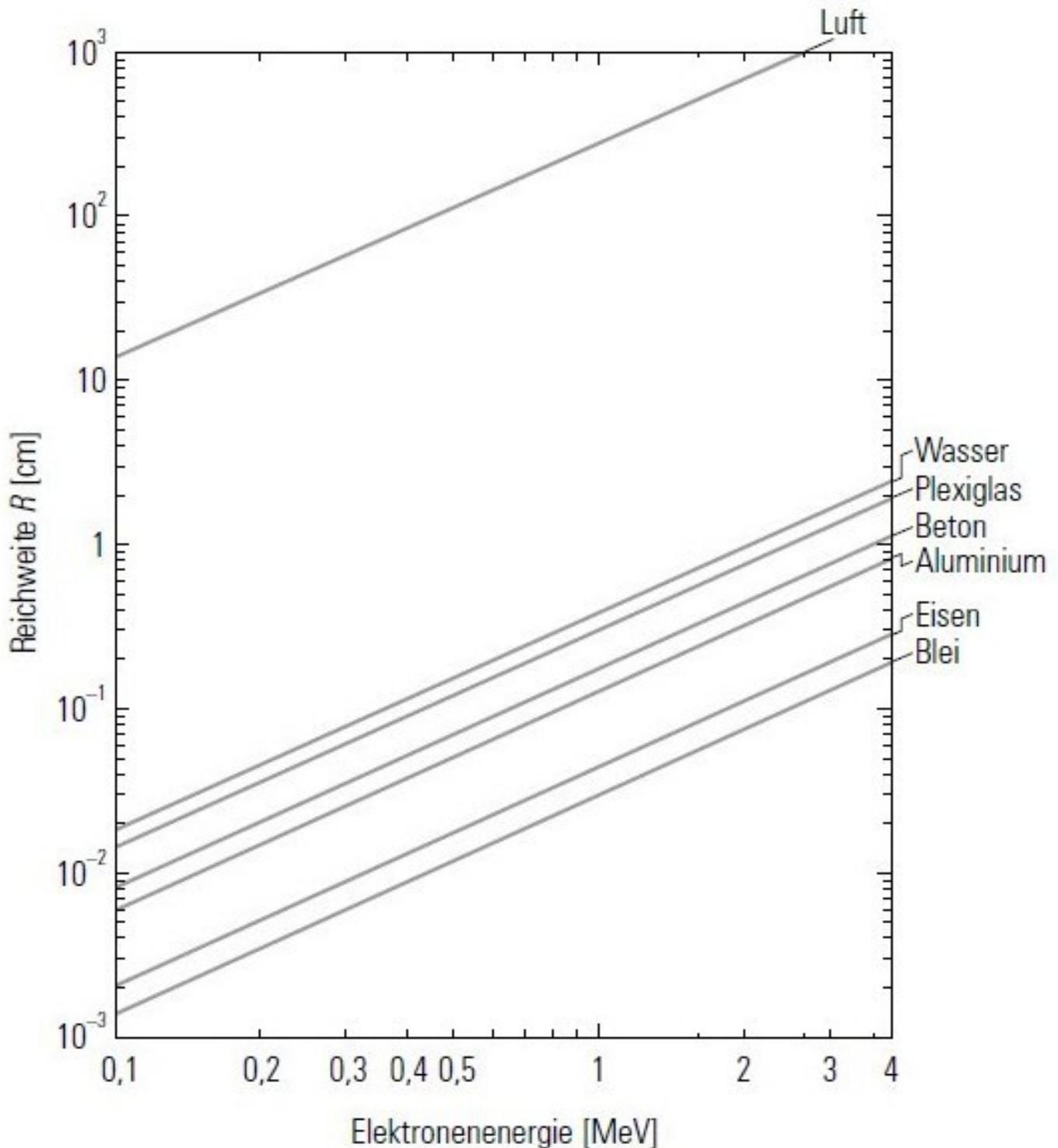
Atomspaltung  
Atomkraftwerk  
Atomwaffen

(Molekülkraftwerke?)

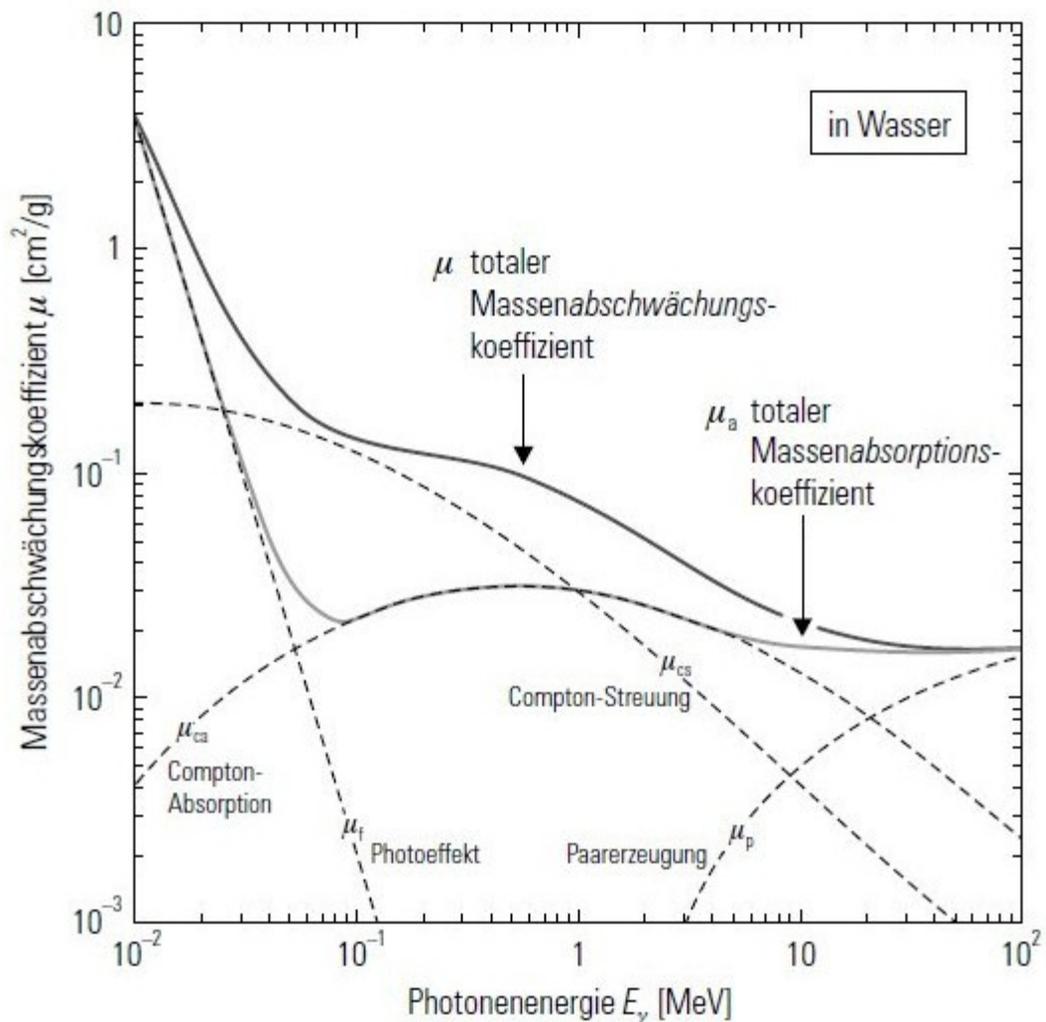
eingebürgert,  
aber falsch



# Reichweite der ionisierenden Strahlen

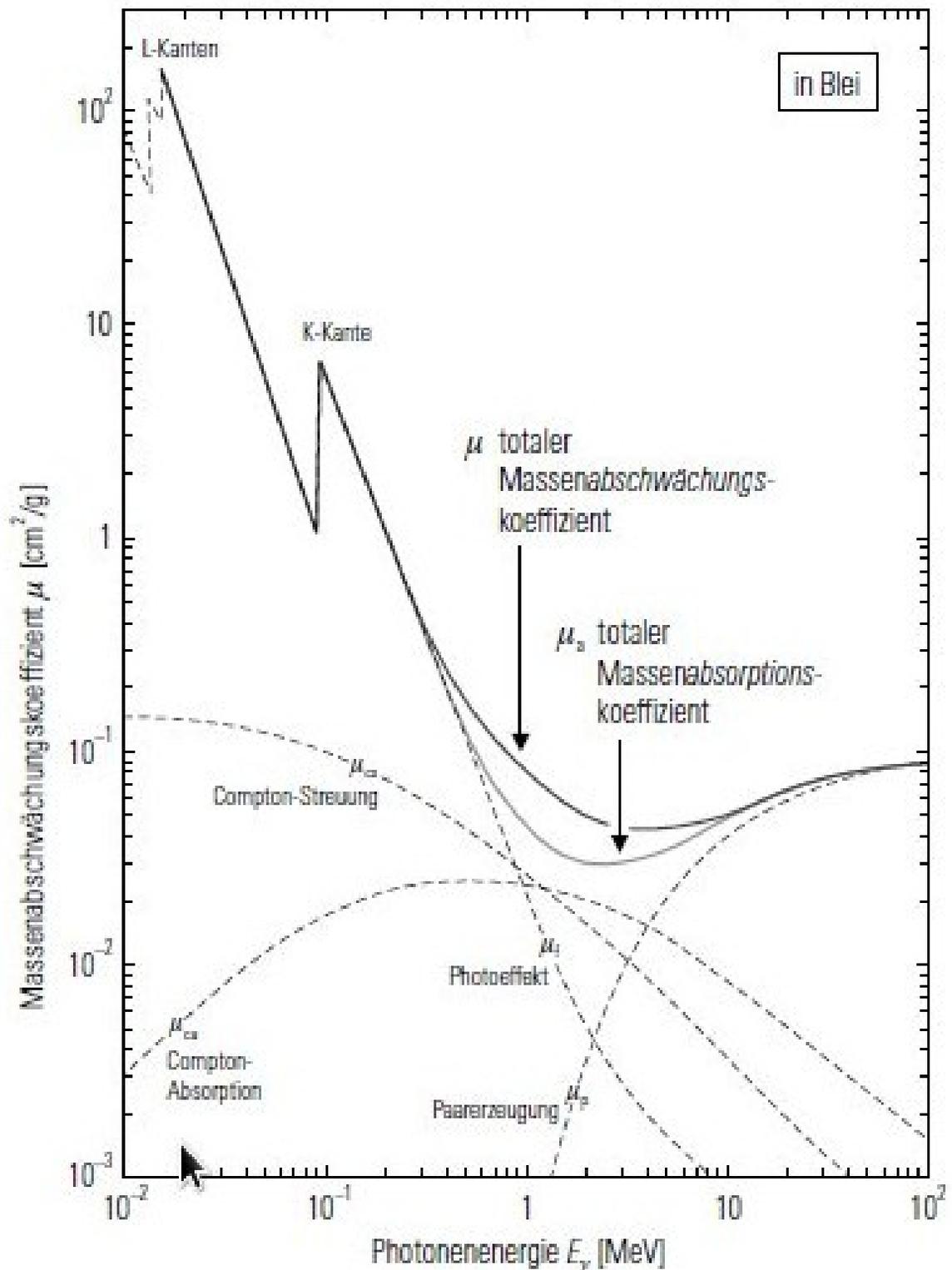


# Abschwächung von Gamma-Strahlung

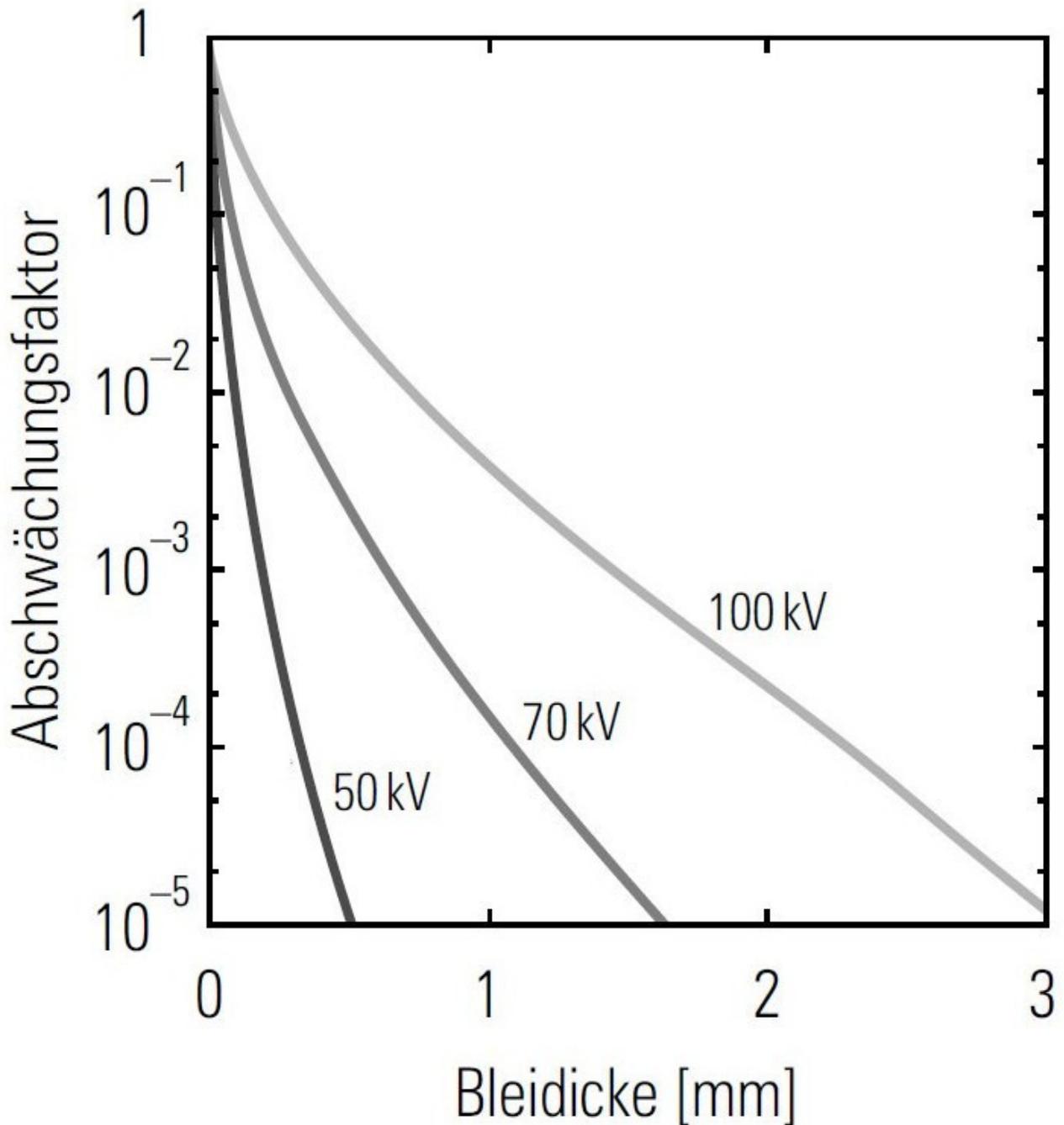


Energieabhängigkeit des Massenabschwächungskoeffizienten  $\mu$  und Massenabsorptionskoeffizienten  $\mu_a$  für Photonen in Wasser.  $\mu_f$  beschreibt den Photoeffekt,  $\mu_p$  die Paarerzeugung,  $\mu_{cs}$  die Compton-Streuung und  $\mu_{ca}$  die Compton-Absorption.  $\mu_a$  ist der gesamte Massenabsorptionskoeffizient ( $\mu_a = \mu_f + \mu_p + \mu_{ca}$ ) und  $\mu$  der gesamte Massenabschwächungskoeffizient ( $\mu = \mu_f + \mu_p + \mu_c$  mit  $\mu_c = \mu_{cs} + \mu_{ca}$ )

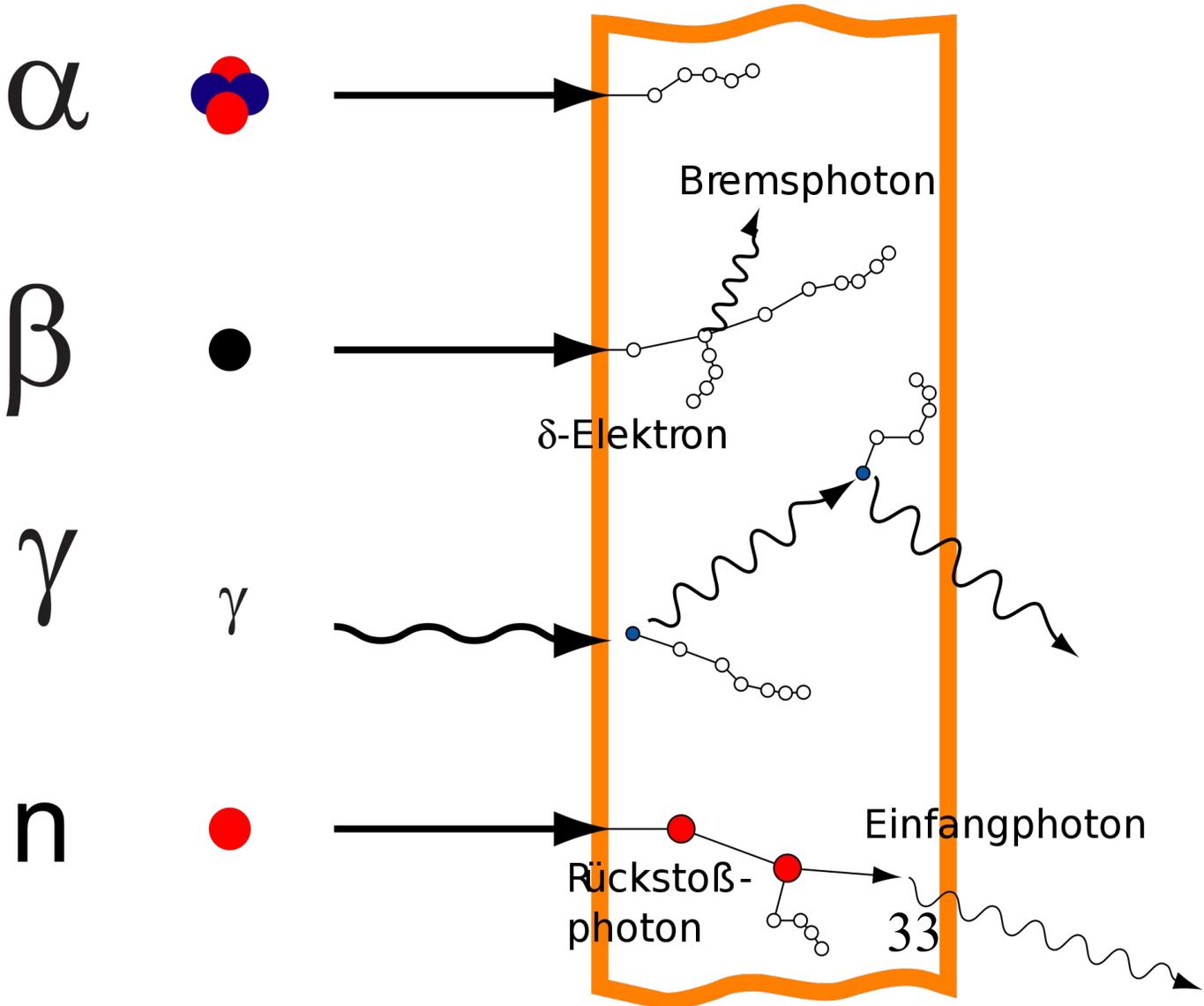
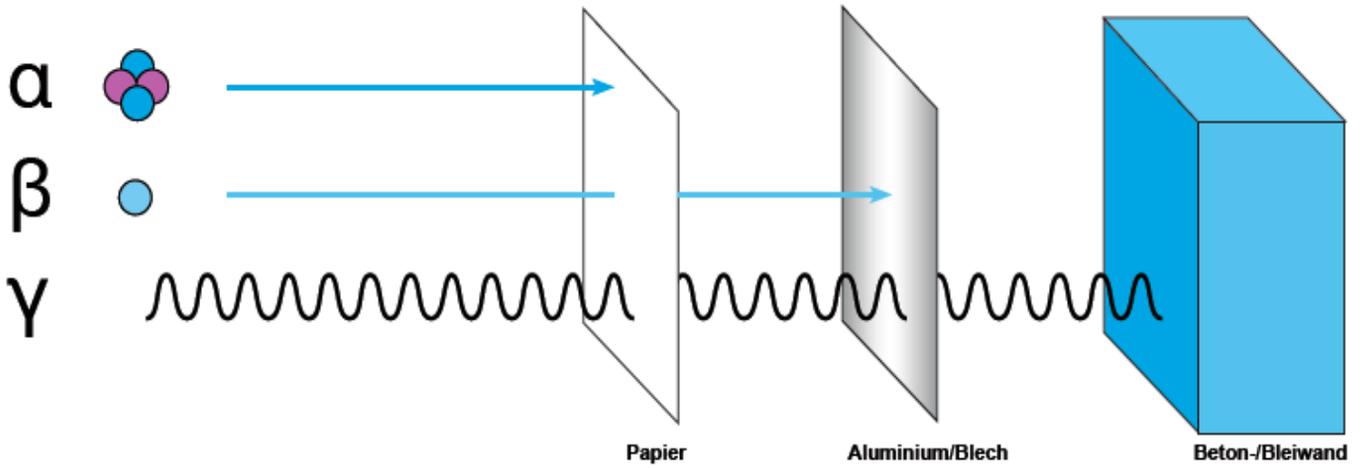
# Abschirmung in Blei



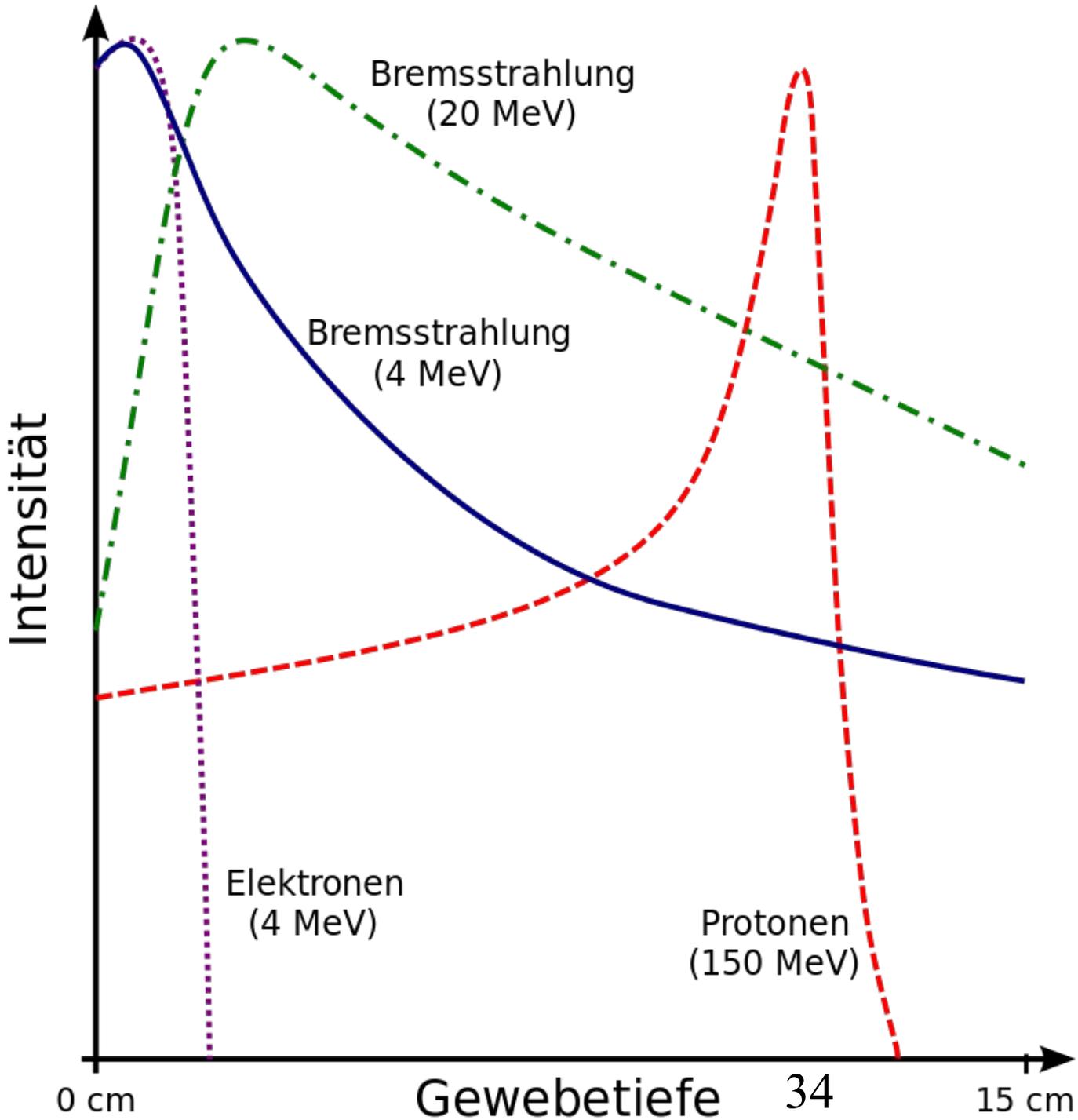
# Abschwächung von Röntgenstrahlung



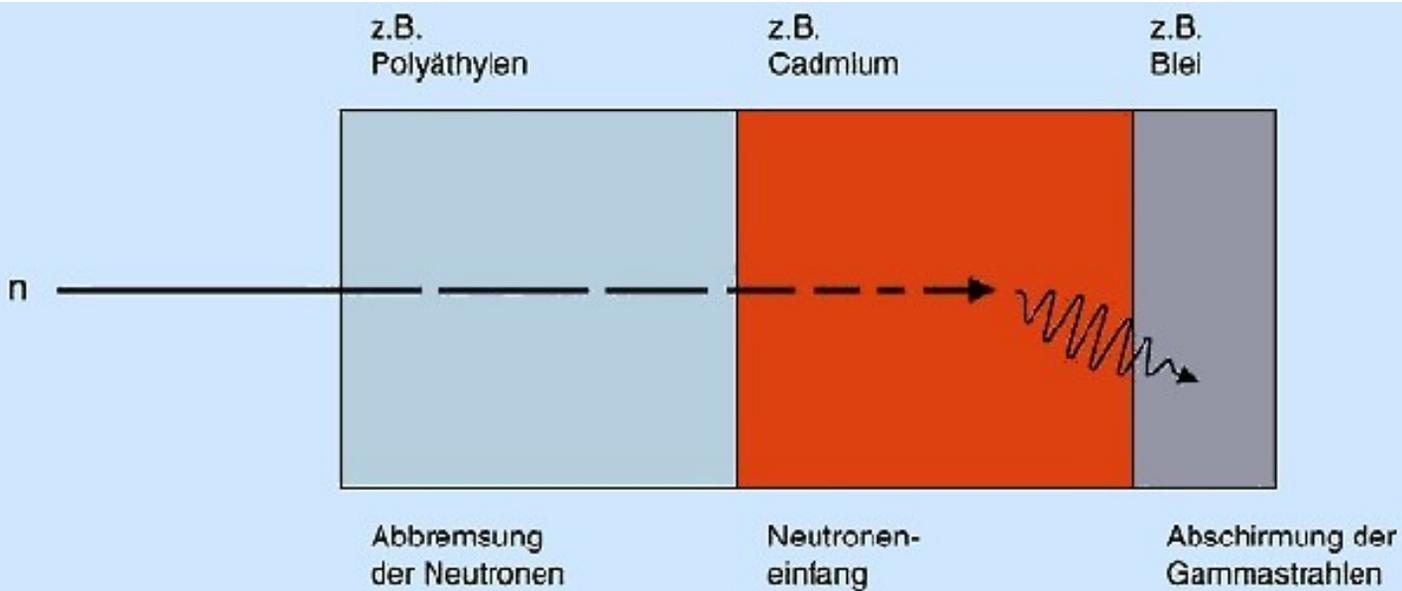
# Reichweiten

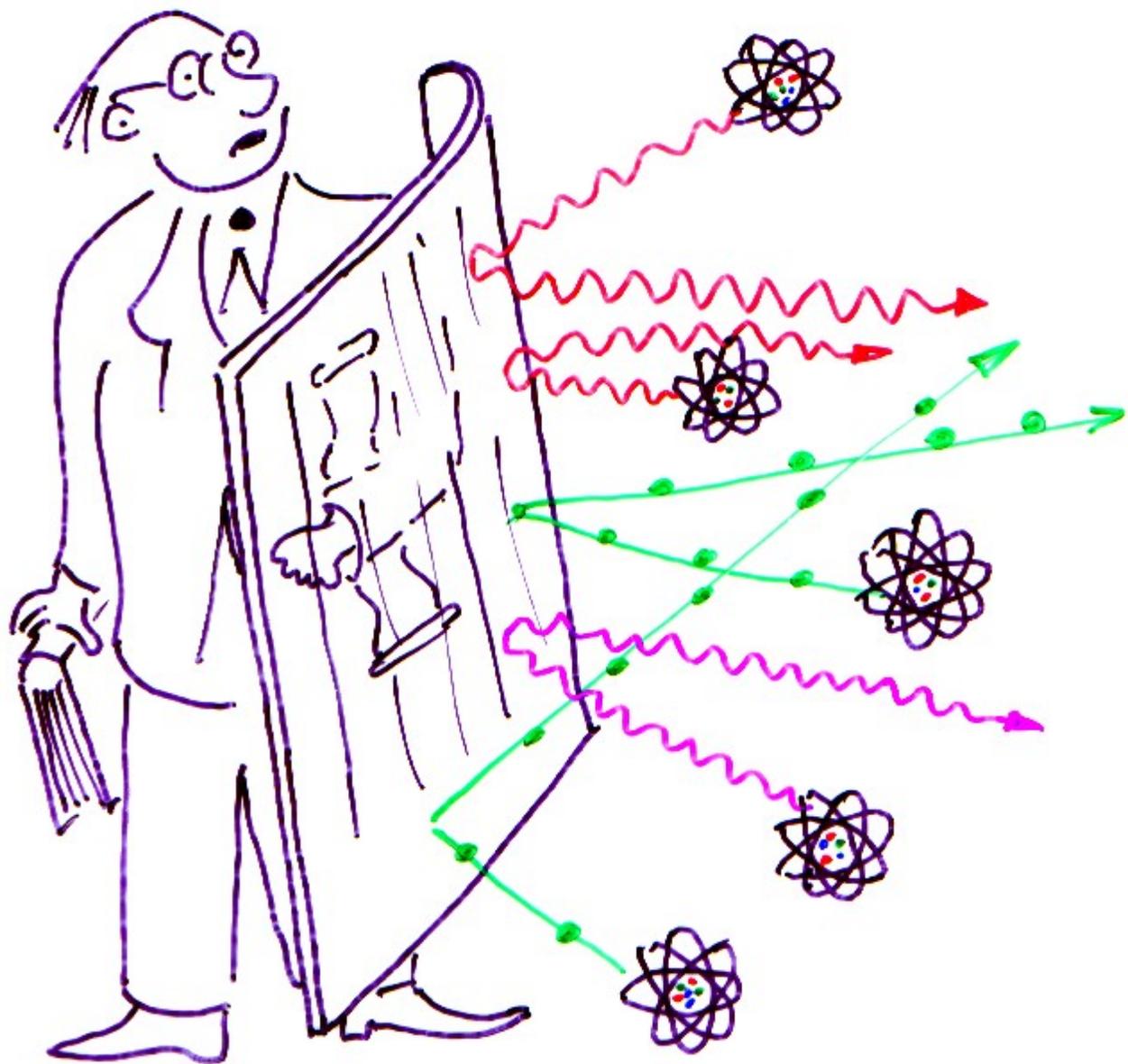


# Vergleich $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ Strahlung



# Neutronenabschirmung





# Einheiten des Strahlenschutzes

1 Becquerel: 1 radioaktiver Zerfall pro Sekunde = 1 Bq

(alte Einheit: 1 Curie (Ci)  
= Aktivität von 1g Ra  
=  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq)  
1 Bq = 27 pCi

Energiedosis:

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

dm - Massenelement

dW - absorbierte Energiedosis

dV - Volumenelement

[D] = Gray (Gy); 1 Gy = 1 Joule / kg

# Strahlungswichtungsfaktoren

Strahlenart	$w_R$ -Faktor
$\beta, \mu, \gamma, X$	1
thermische n	5
schnelle n	10
sehr schnelle n	20
n unbekannter Energie	10
$\alpha$	20
Spaltfragmente	20
p	2

⇒ Äquivalentdosis

$$H = w_R \cdot D$$

$$[H] = \text{Sievert (Sv)}$$

alte Einheit: rem (Röntgen equivalent man)

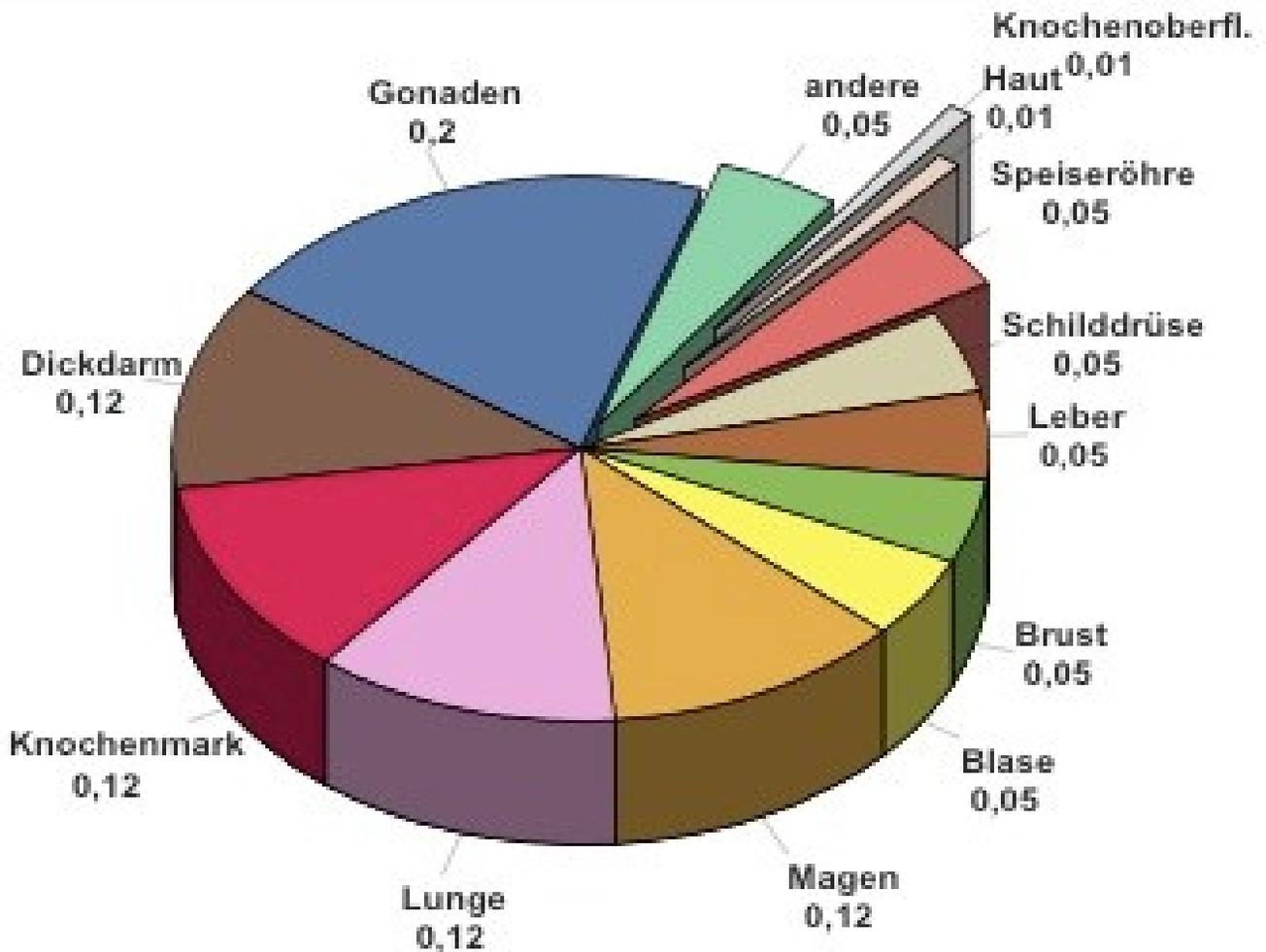
$$1 \text{ rem} = q \cdot 1 \text{ rad}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy bei } \beta, \gamma, X$$

# Gewebewichtungsfaktoren

$$H_{\text{eff}} = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$



Beispiel 1:

Wichtung mit Strahlungswichtungsfaktoren:  
strahlenexponierter Arbeiter mit

20 mGy Alphateilchen und 50 mGy

Gammastrahlung:

$$H = 20 \text{ mGy} \times 20 + 50 \text{ mGy} \times 1 = 450 \text{ mSv}$$

Beispiel 3:

Wichtung mit Gewebewichtungsfaktoren:

Ein strahlenexponierter Arbeiter hat eine  
radioaktive Gamma-Quelle mit den Händen  
angefasst, was er nicht hätte tun sollen

(Hautdosis 20 mSv), und in seinem

Laborkittel transportiert (je 5 mSv für die  
Lunge und Brust).

Die effektive Dosis ist dann

$$20 \times 0,01 + 5 \times 0,12 + 5 \times 0,12 = 1,4 \text{ mSv}$$

“Aber der atomare Fortschritt bildet  
doch ganz ungemein!”

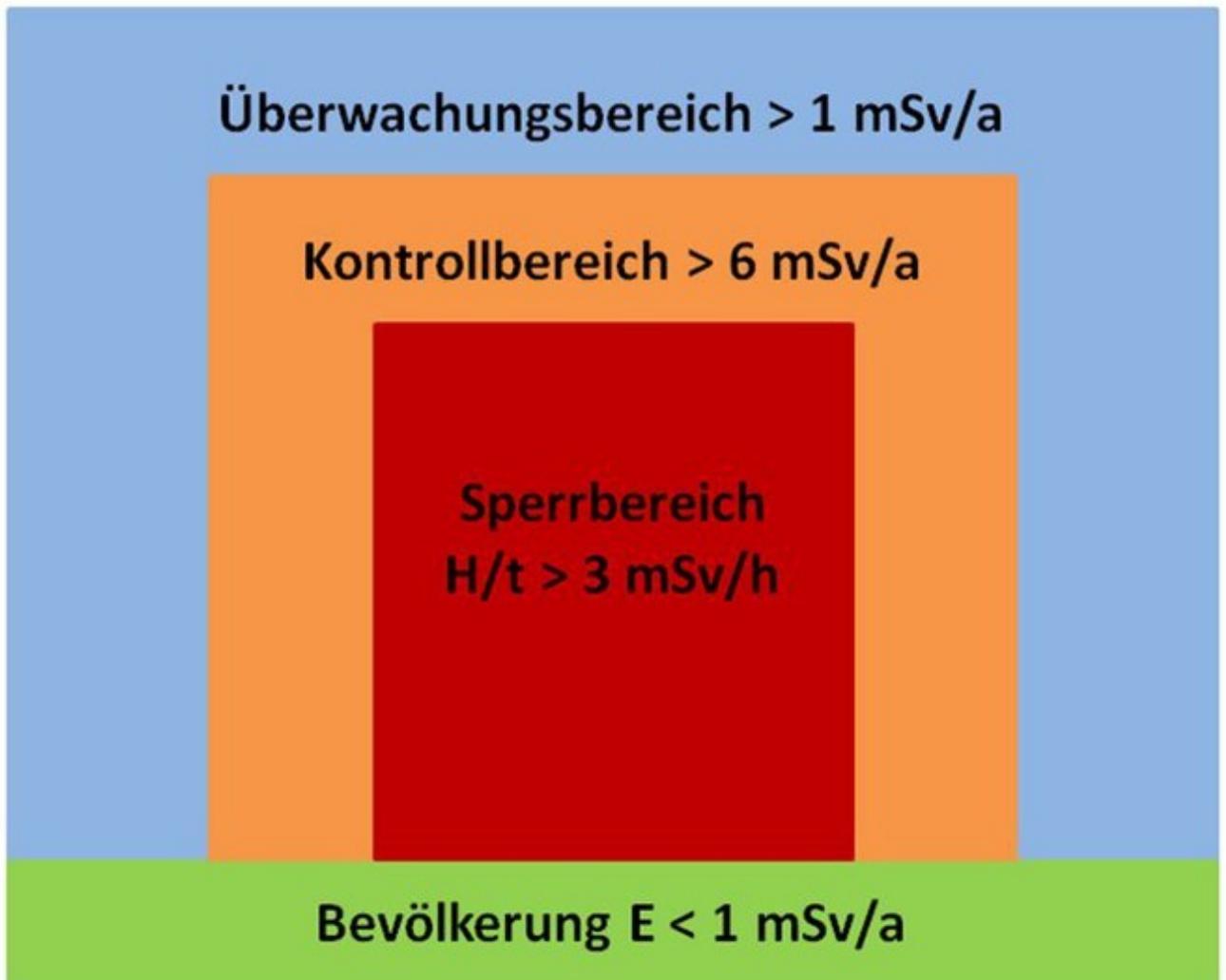


# Strahlenschutzbereiche

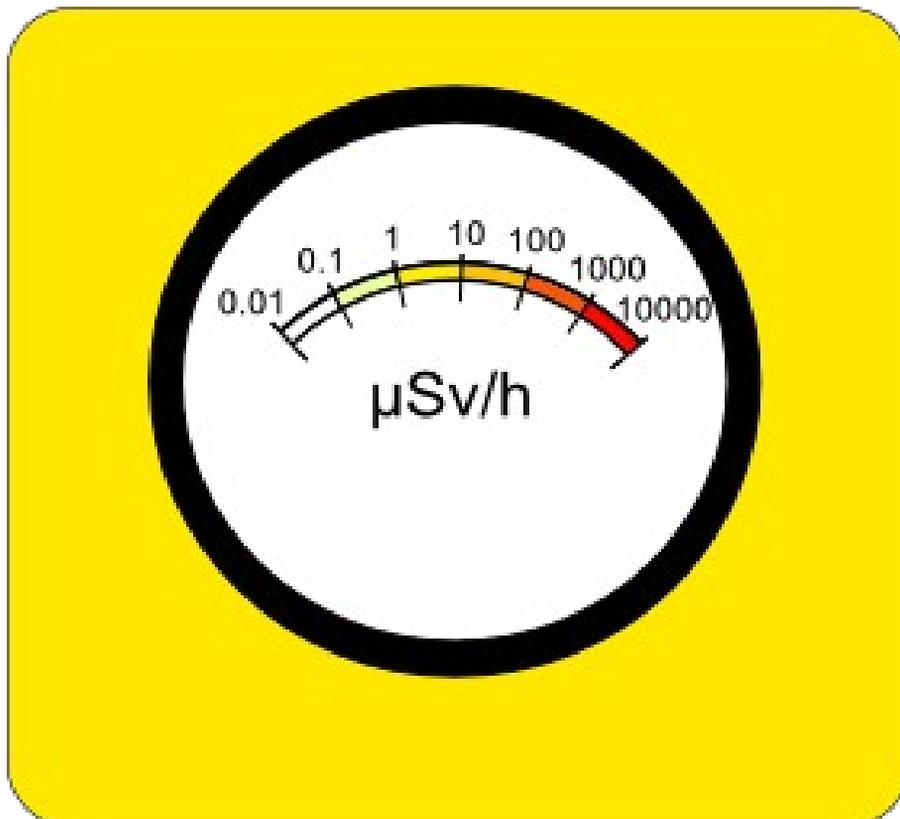
**maximale Dosis für strahlenexponiertes Personal: 20 mSv/a.**

**Katastrophendosis 250 mSv**

**Letale Dosis 4000 mSv**



**> 3 mSv/h**



**Achtung:  
logarith-  
Mische  
Skala**

# Detaillierte Grenzwerte für strahlenexponierte Personen

## Maximale Jahresdosen:

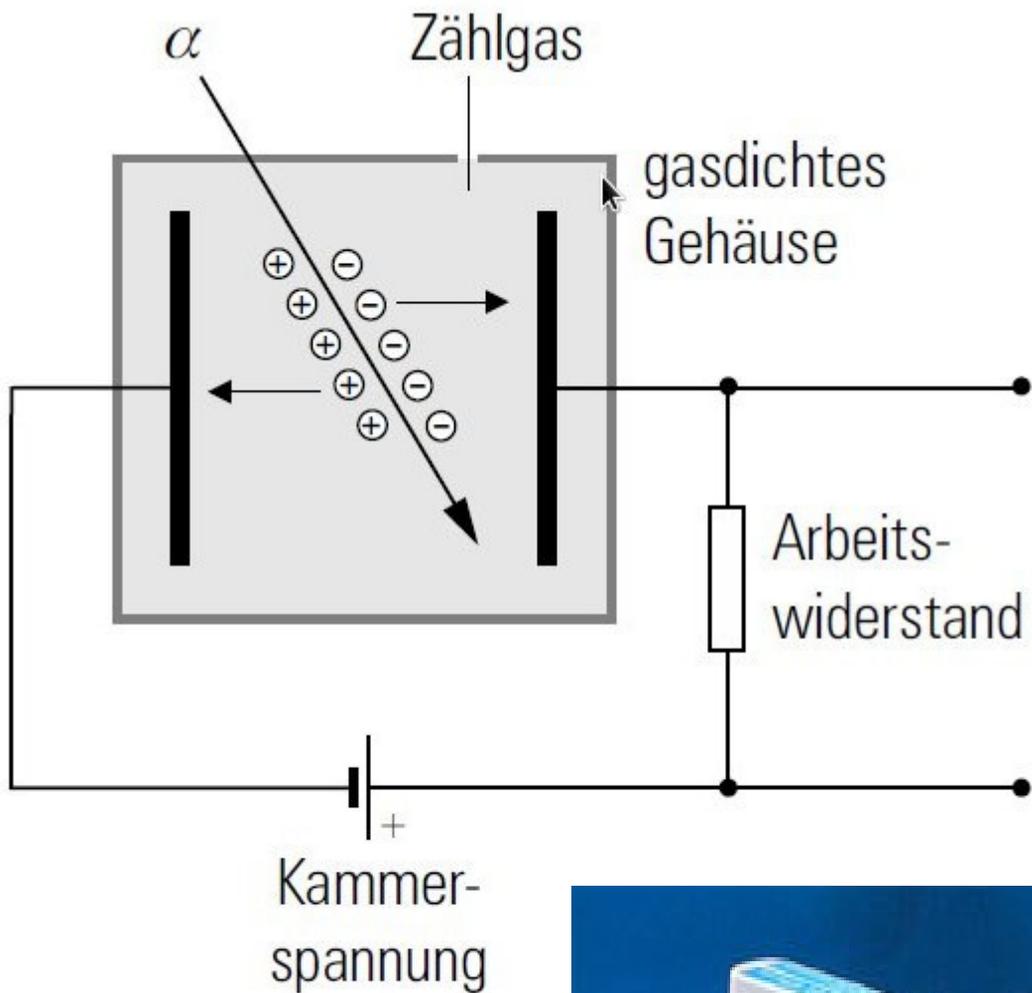
	Kat. A	Kat. B
effektive Dosis	> 6 mSv - ≤ 20 mSv	> 1 mSv - ≤ 6 mSv
Augenlinse	> 45 mSv - ≤ 150 mSv	> 15 mSv
Haut, Hände, Unterarme Füße, Knöchel	> 150 mSv - ≤ 500 mSv	> 50 mSv
Organdosis: Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes KM <i>Gebärmutter ungeborenes Kind</i>	50 mSv  2 mSv <i>1 mSv/Schwangerschaft</i>	
Schilddrüse, Knochenoberfläche	300 mSv	
Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust, Leber...	150 mSv	

**Berufslbensdosis**

**400 mSv**

# Strahlenschutzmessgeräte

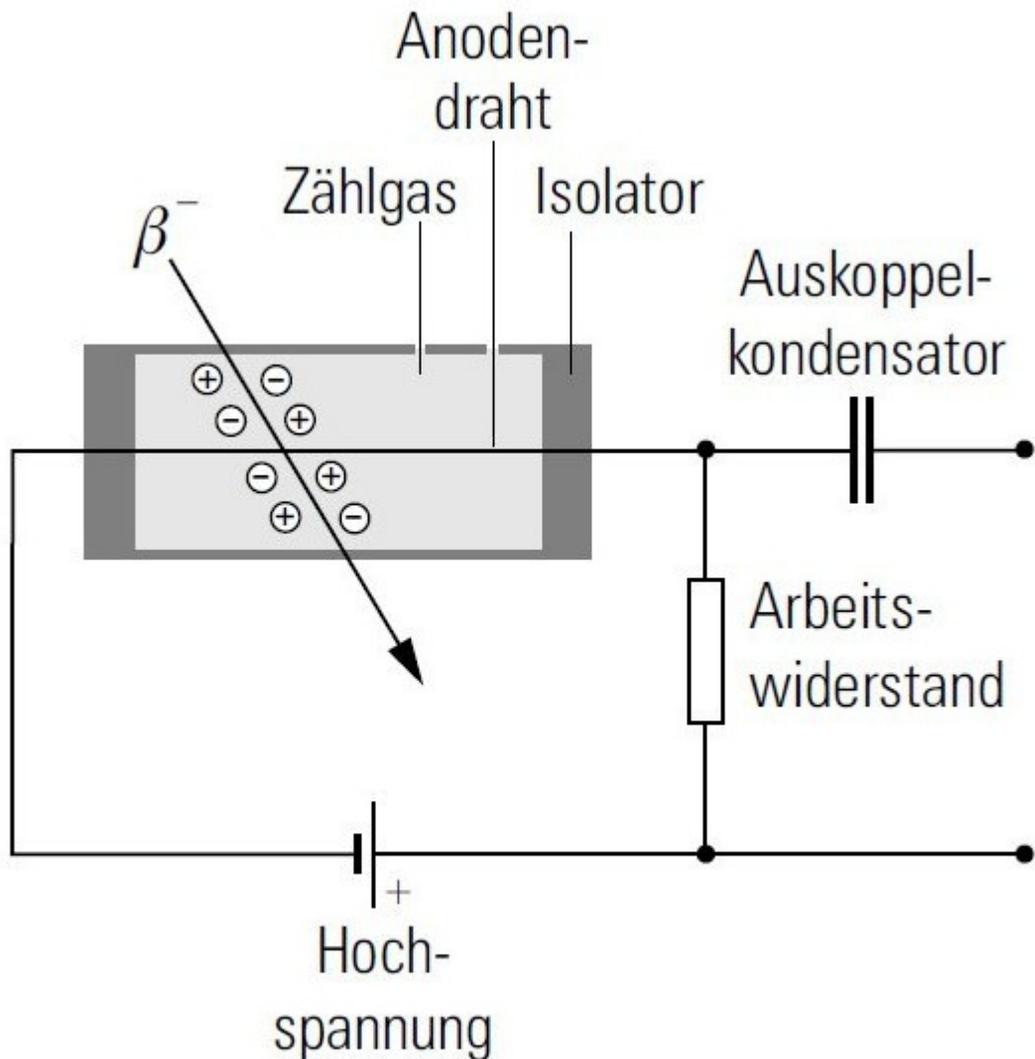
## Ionisationskammer



Arbeitsprinzip einer Ionisationskammer



# Geiger-Müller-Zählrohr



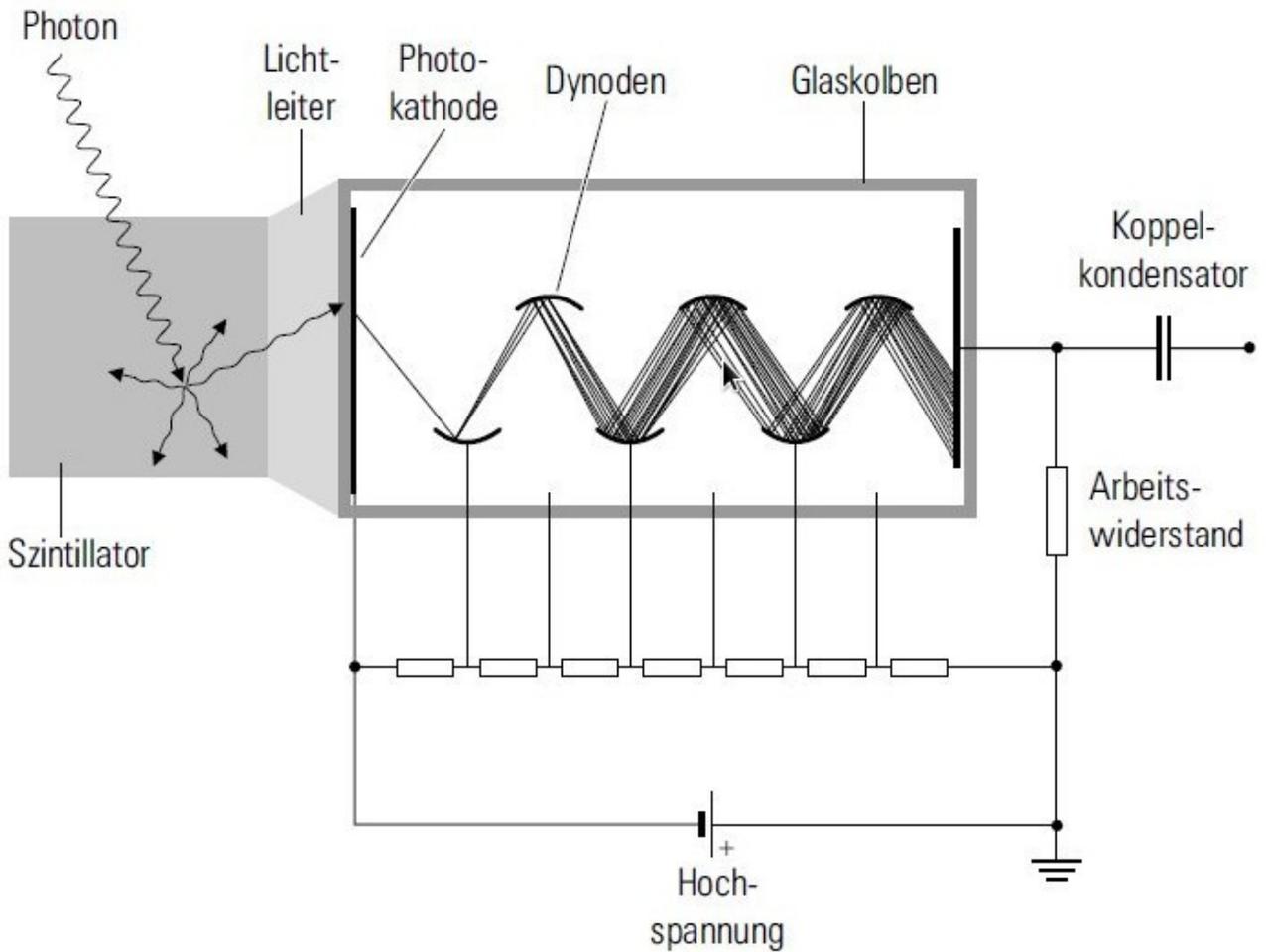
# Kontaminationsmonitor



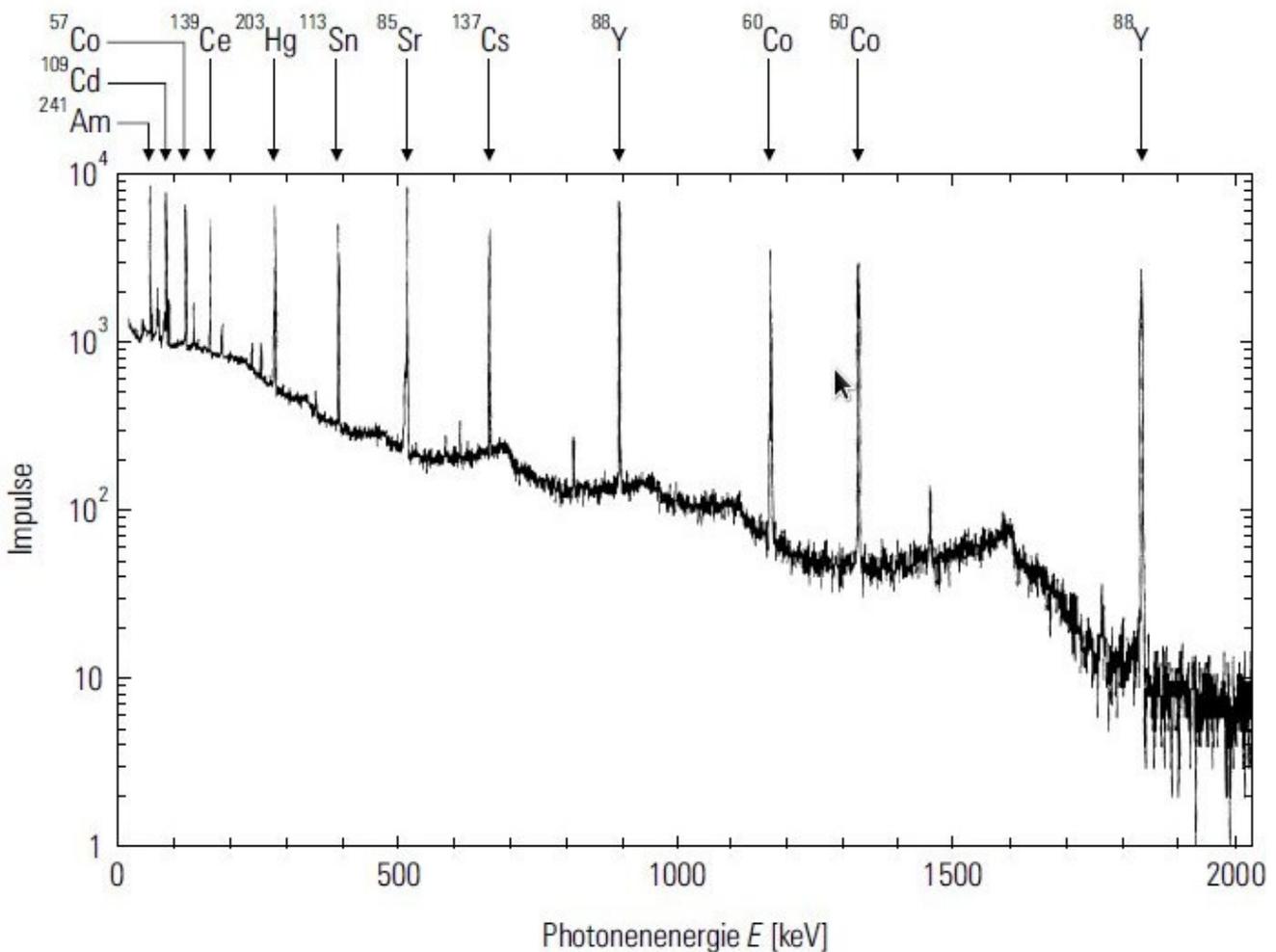
Kontaminationsmonitor als Großflächenzähler für  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung; Anzeige in  $s^{-1}$  oder in  $Bq/cm^2$  (Typ Contamat FHT 111 M, ESM Eberline Instruments GmbH)



# Szintillationszähler

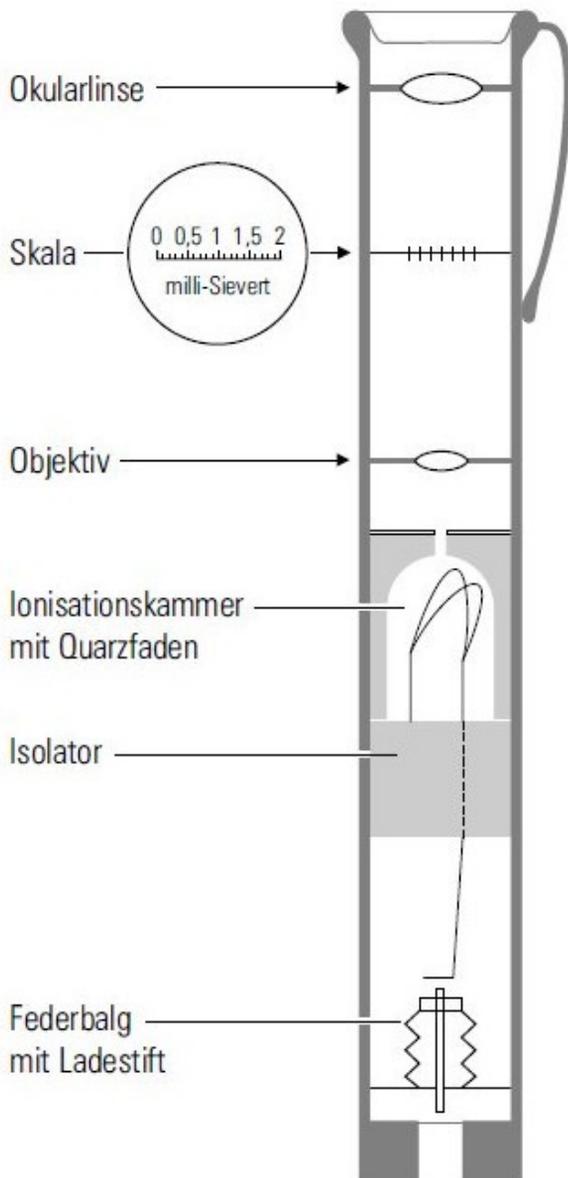


# Hochauflösender Gamma-Zähler



Photopeak-Identifizierung in einem Radionuklidgemisch an Hand eines Impulshöhenspektrums aufgenommen mit einem Reinst-

# Füllhalter-Dosimeter

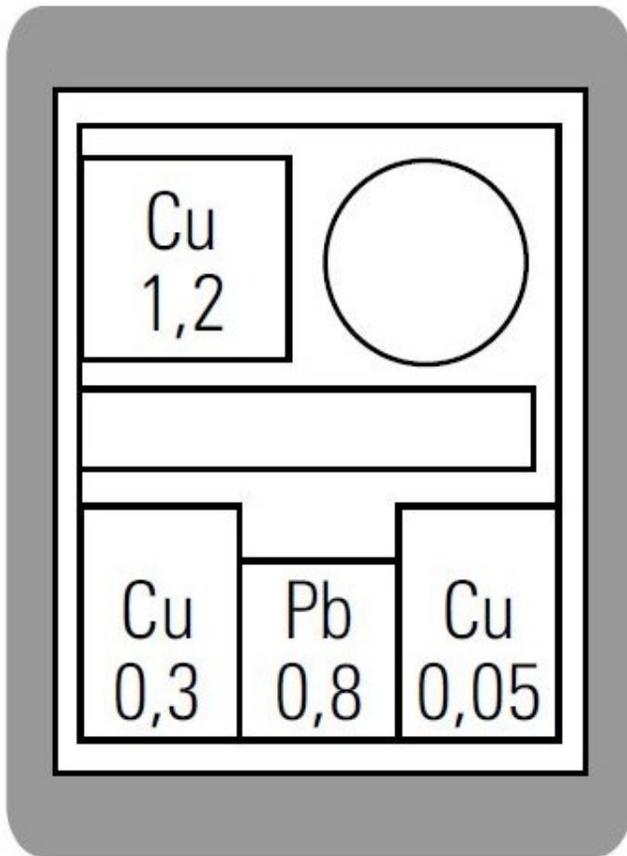


Füllhalterdosimeter

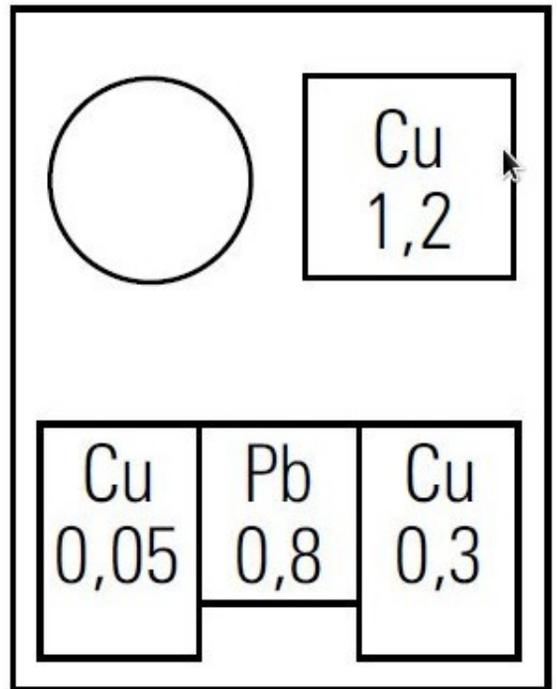


Füllhalterdosimeter mit Ladegerät, Empfindlichkeit je nach Typ von 18 keV bis 3 MeV; Anzeigebereiche 1 mSv bis 2 Sv (SEQ5 und SEQ6R, automess)

# Röntgenfilm-Dosimeter



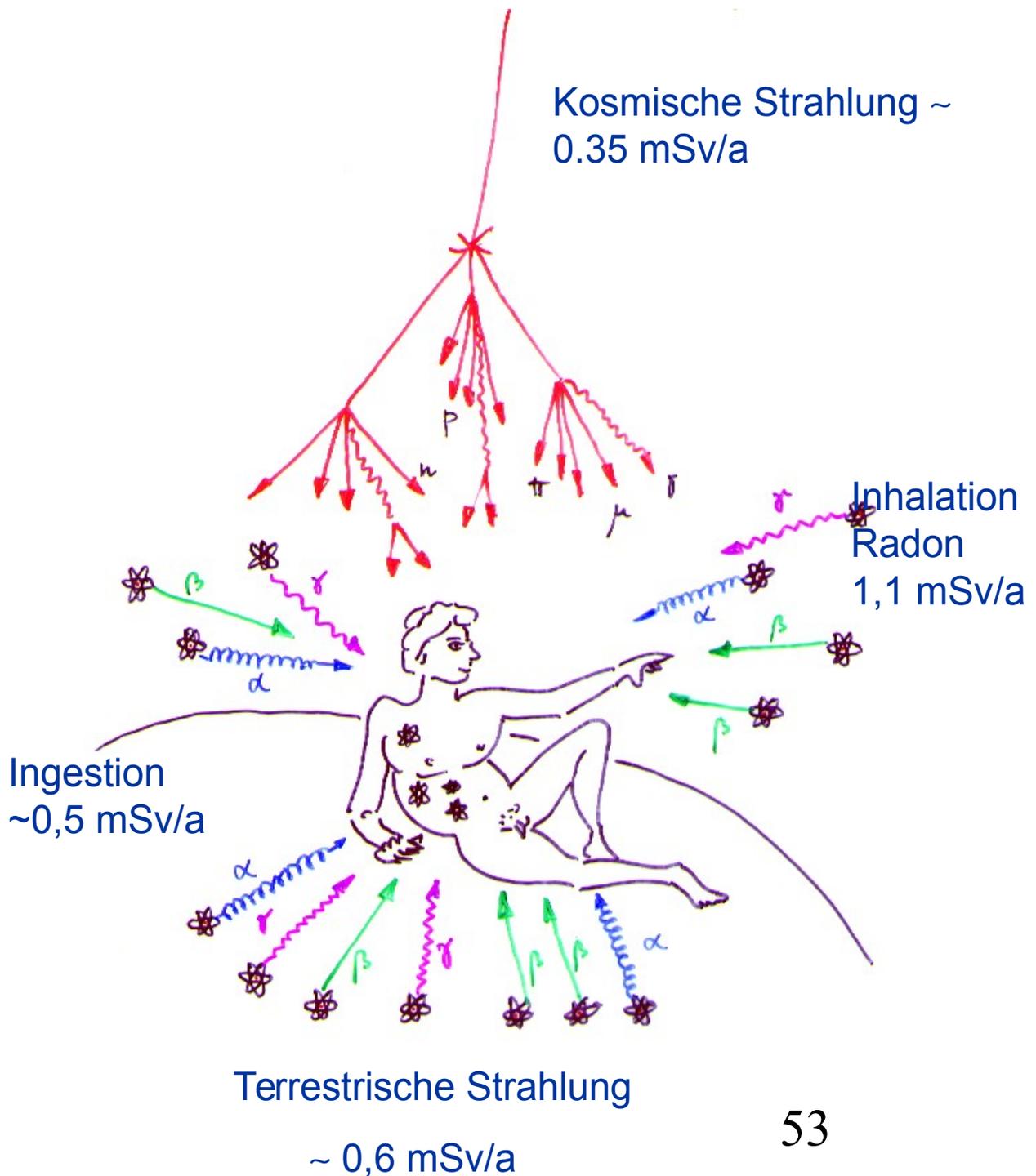
Vorderseite



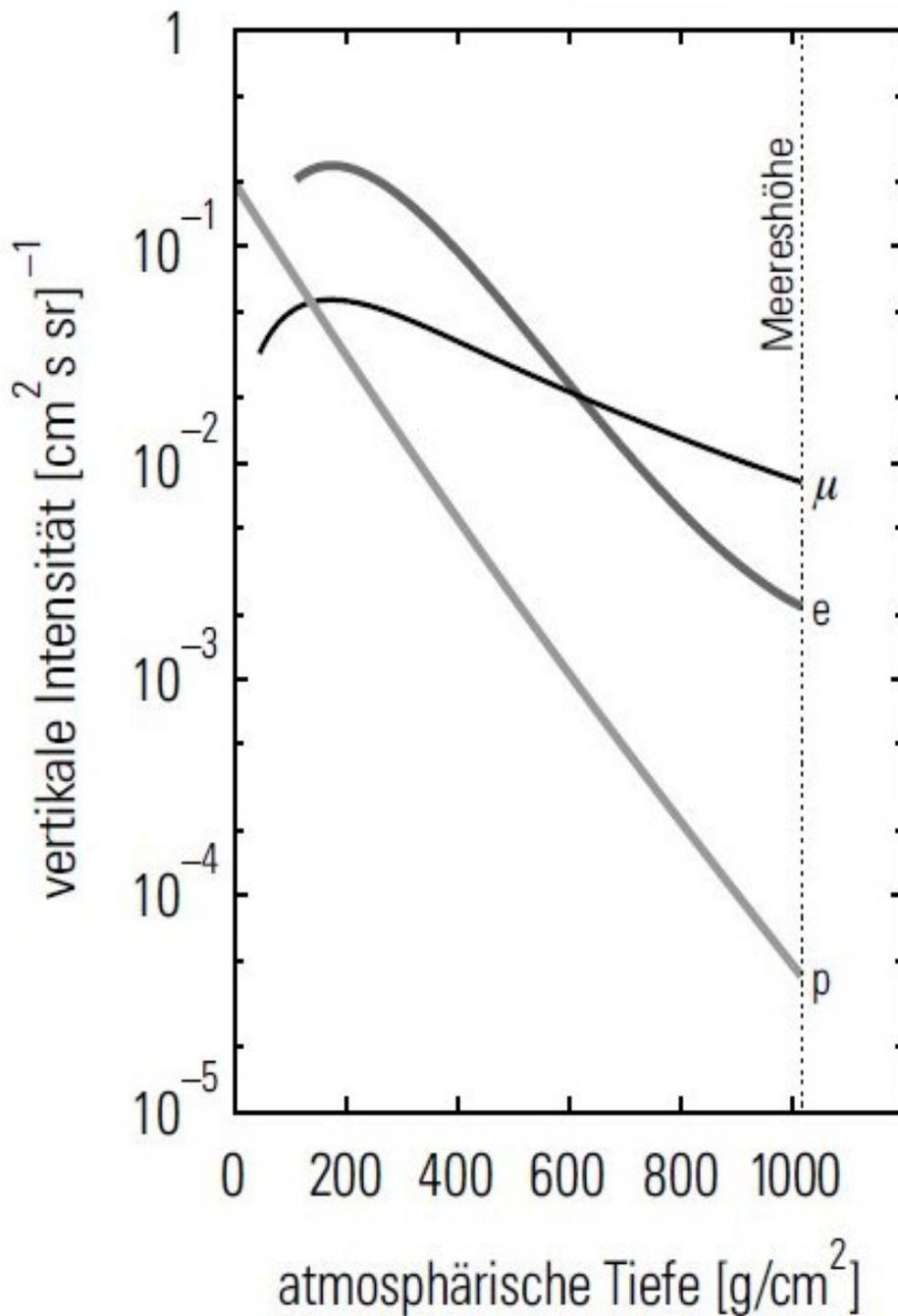
Rückseite

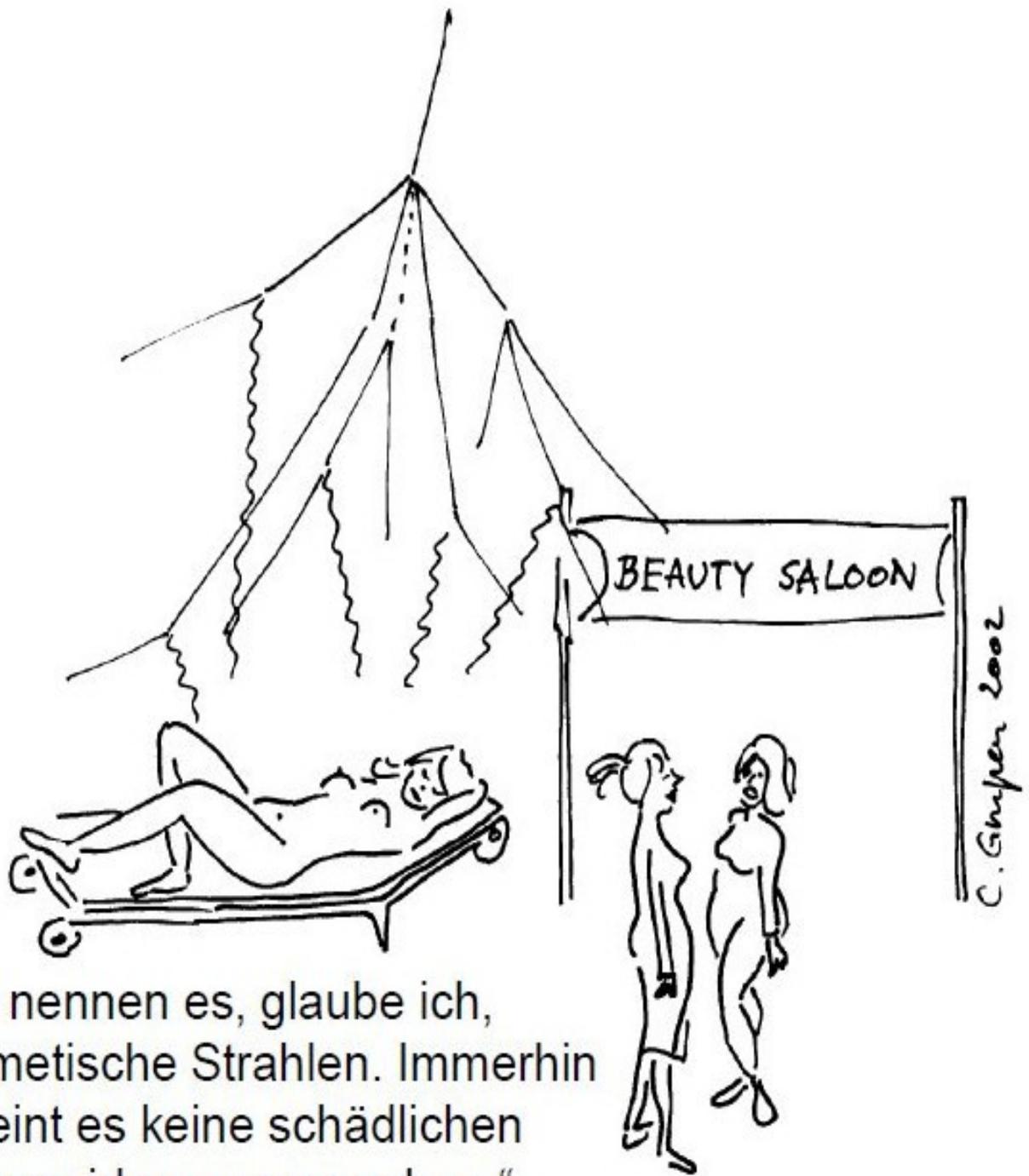
(Dicke der Filter in mm)

# Natürliche Strahlenbelastung



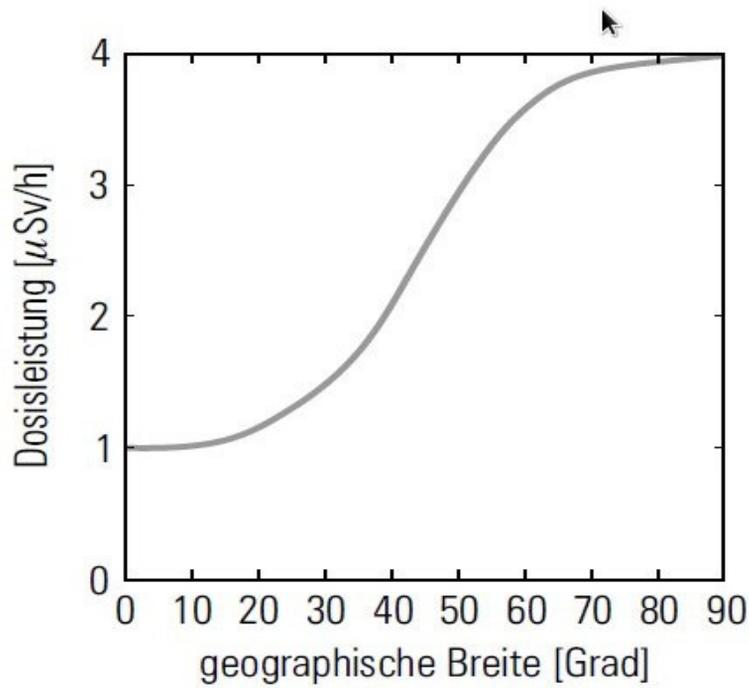
# Kosmische Strahlung



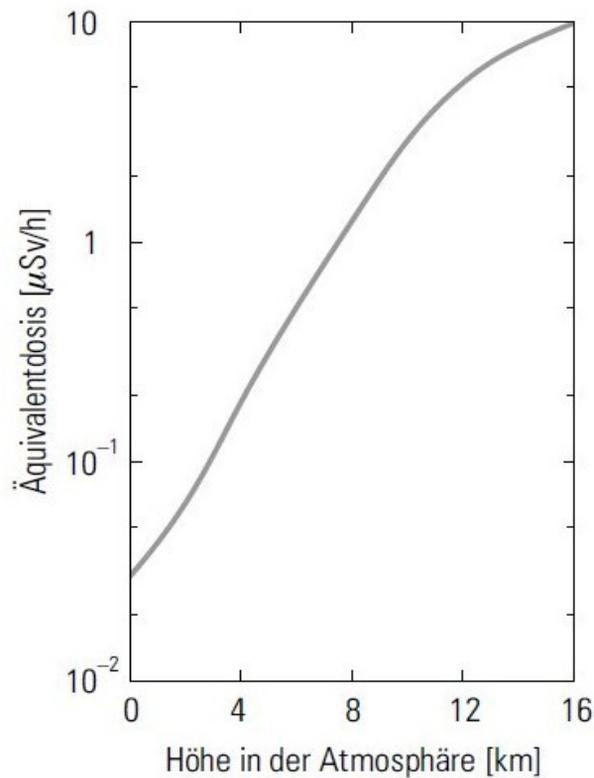


„Sie nennen es, glaube ich, kosmetische Strahlen. Immerhin scheint es keine schädlichen Nebenwirkungen zu geben.“

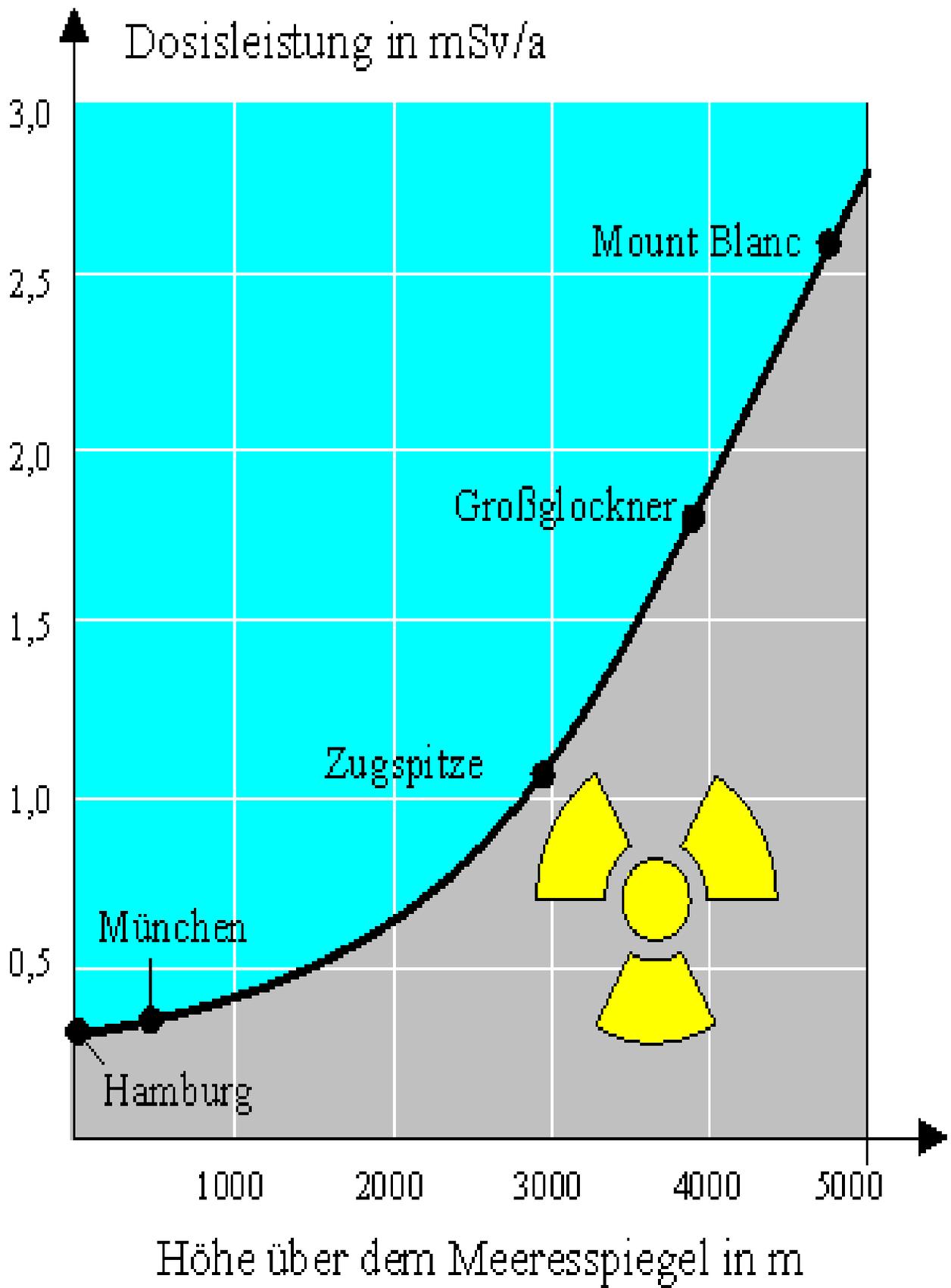
© by Claus Grupen

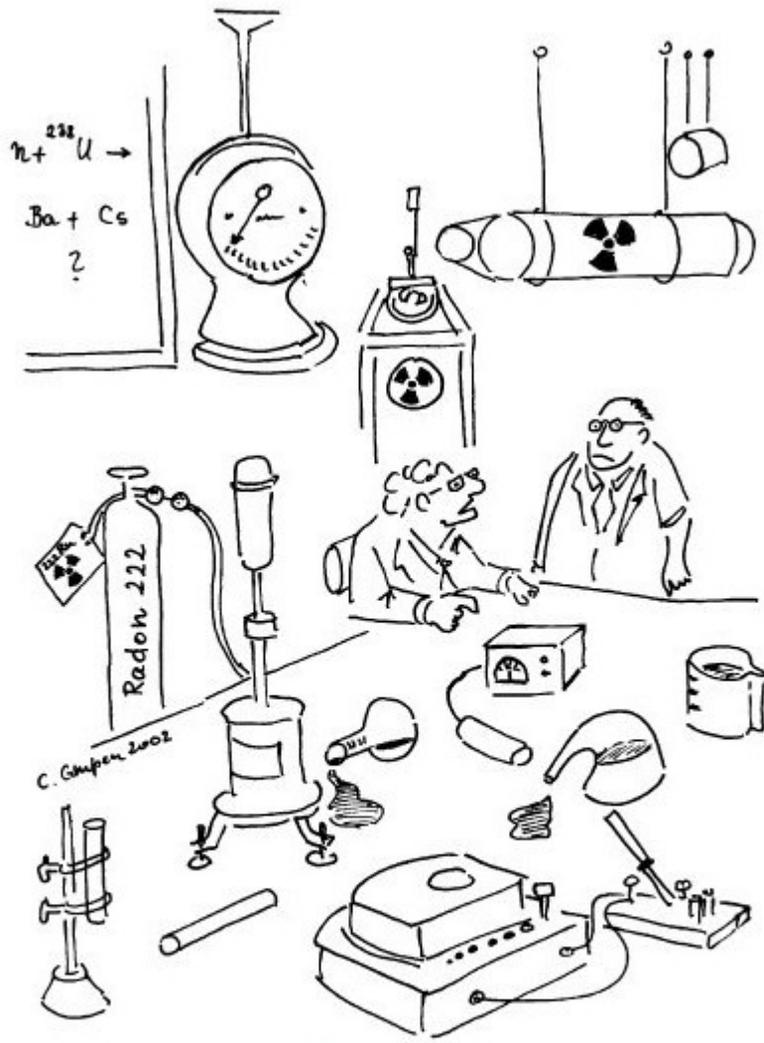


Mittlere Dosisleistung bei Flügen in 10 km Höhe als Funktion der geographischen Breite



Variation der Dosisleistung mit der Höhe in der Atmosphäre für mittlere geographische Breiten

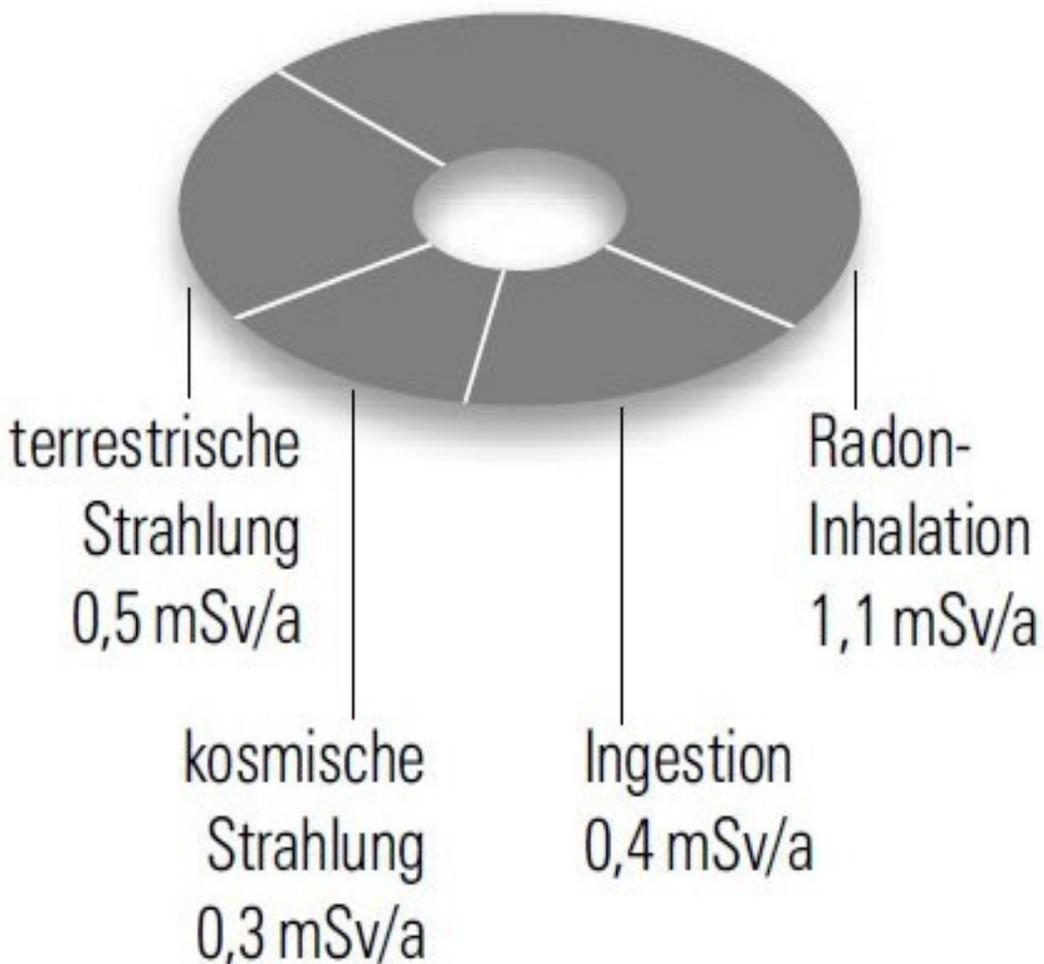




„Warum beschweren Sie sich? Seien Sie doch froh!  
In Bad Gastein müssen Sie dafür viel Geld bezahlen.  
Hier haben Sie das alles umsonst!“

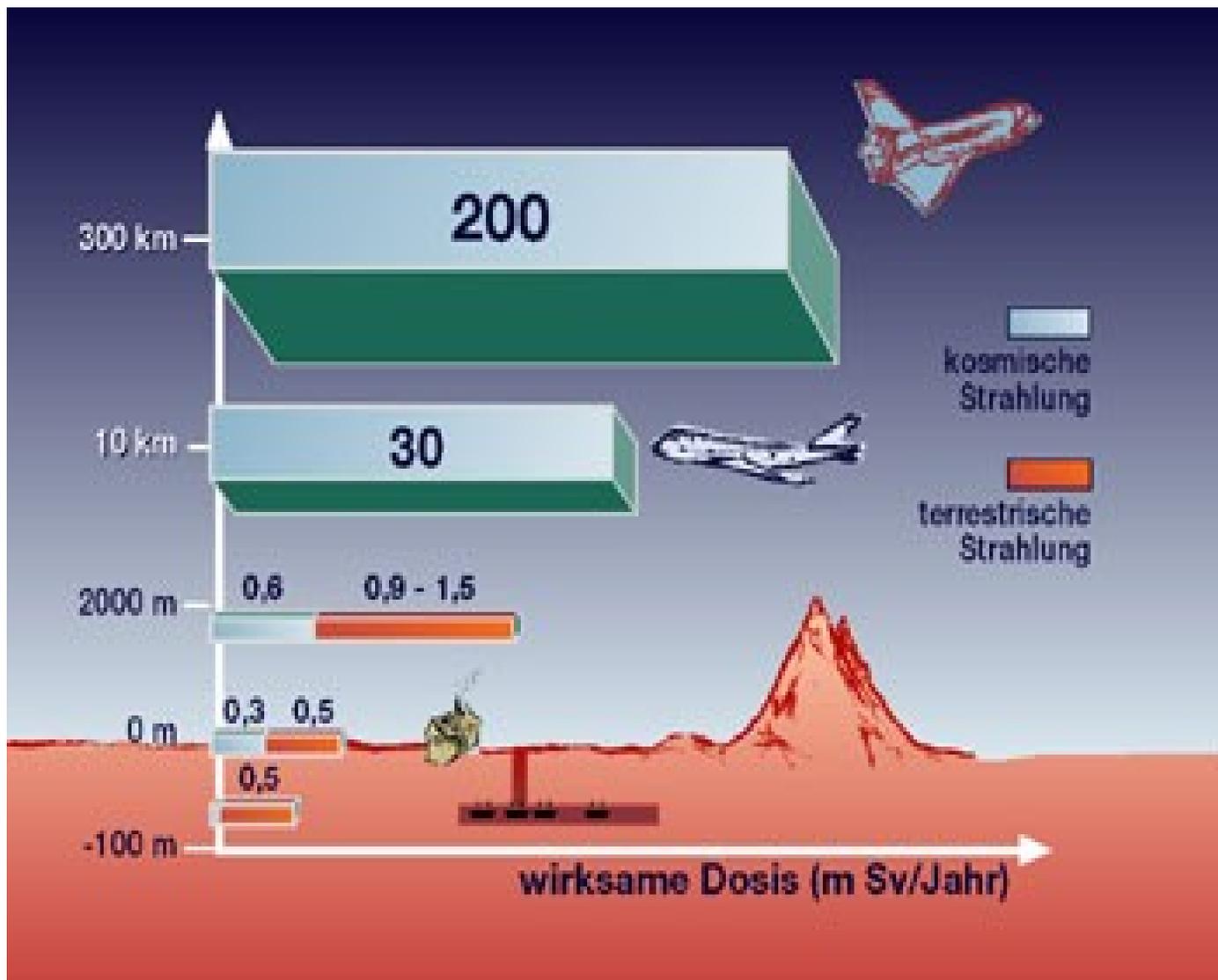
© by Claus Gruppen

# Gesamte natürliche Strahlenbelastung



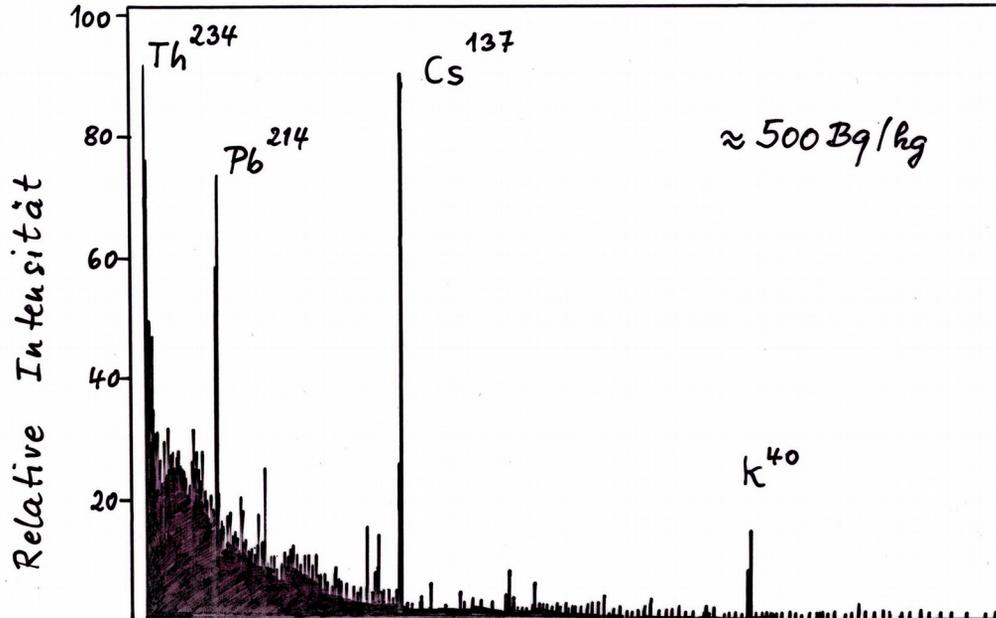
Natürliche Strahlenbelastung (2,3 mSv/a)

# Terrestrische und kosmische Strahlung



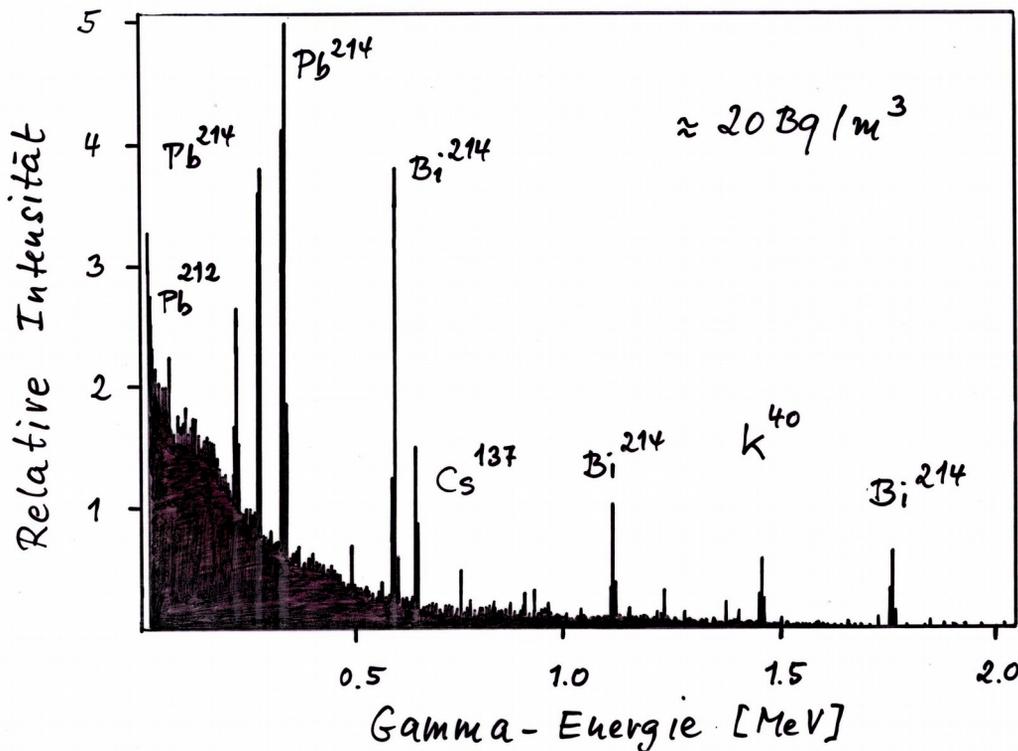
# Terrestrische Strahlung

Siegerländer "Scholle"



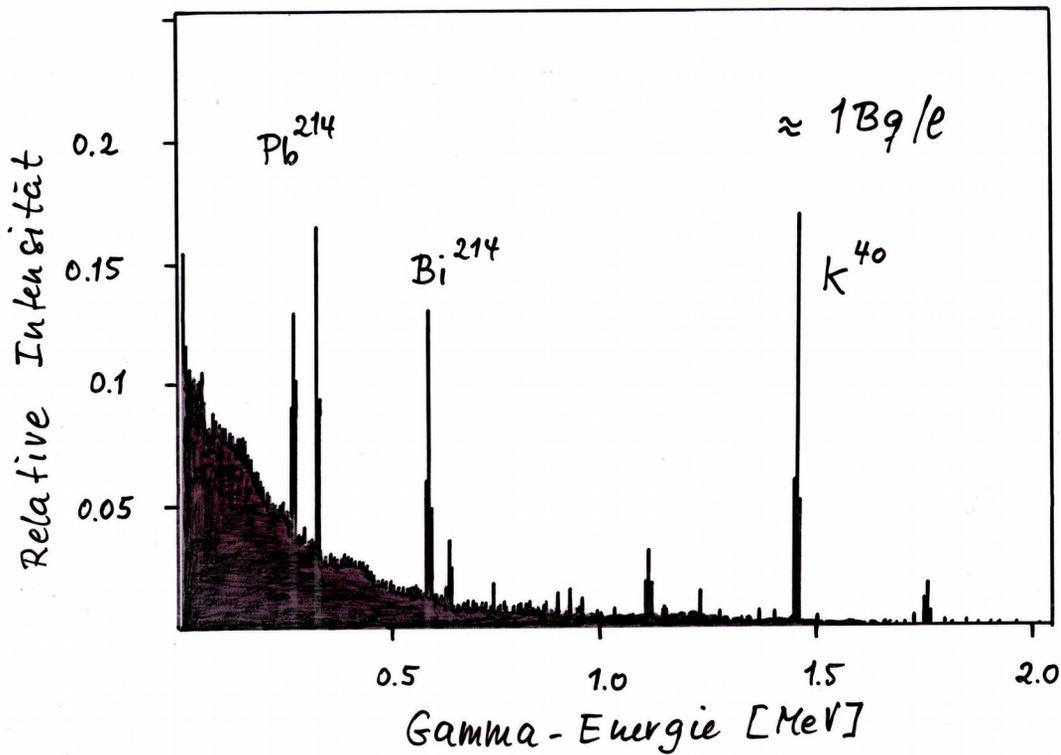
Uran 238 und  
Folgeprodukte  
Cäsium 137  
Kalium 40

Siegerländer Luft



Radon 222 und  
Folgeprodukte  
Cäsium 137  
Kalium 40  
in  
bodennaher  
Luft

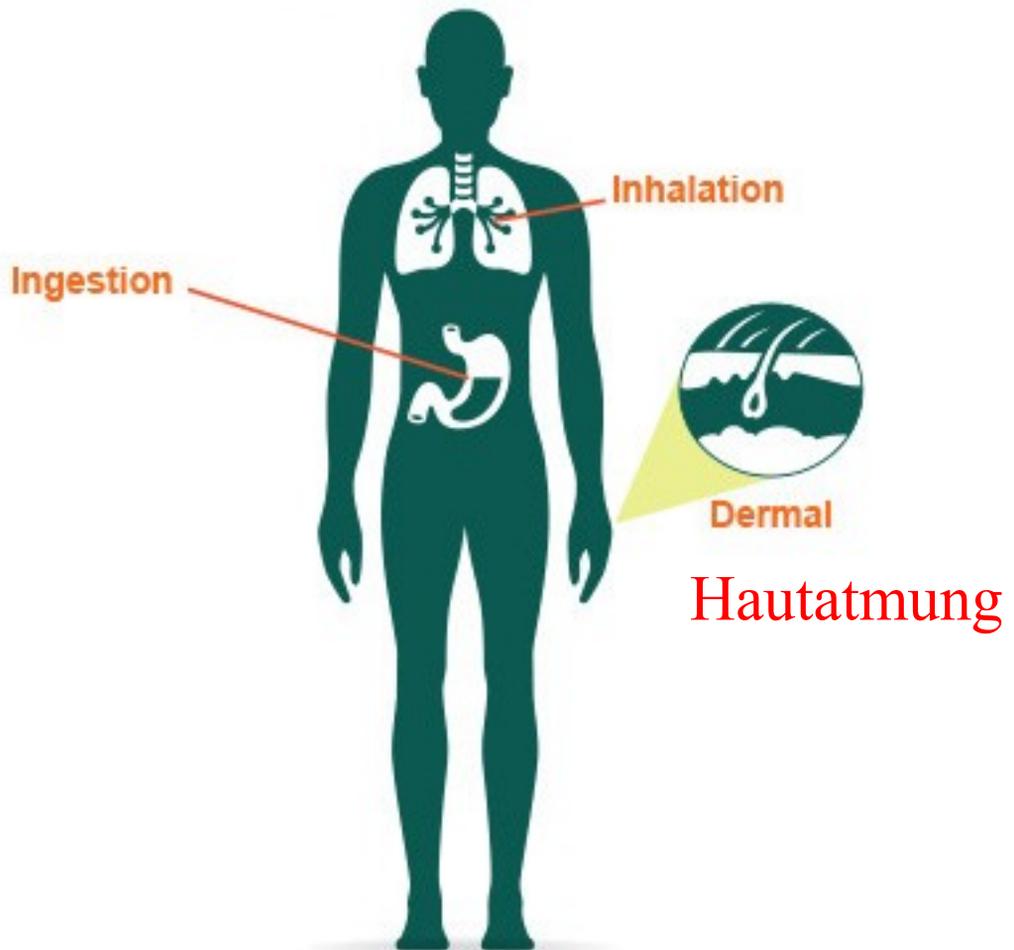
## Siegerländer Bier



Radon 222  
und  
Folgeprodukte  
Kalium 40

... gesund und in jeder  
Hinsicht unbedenklich

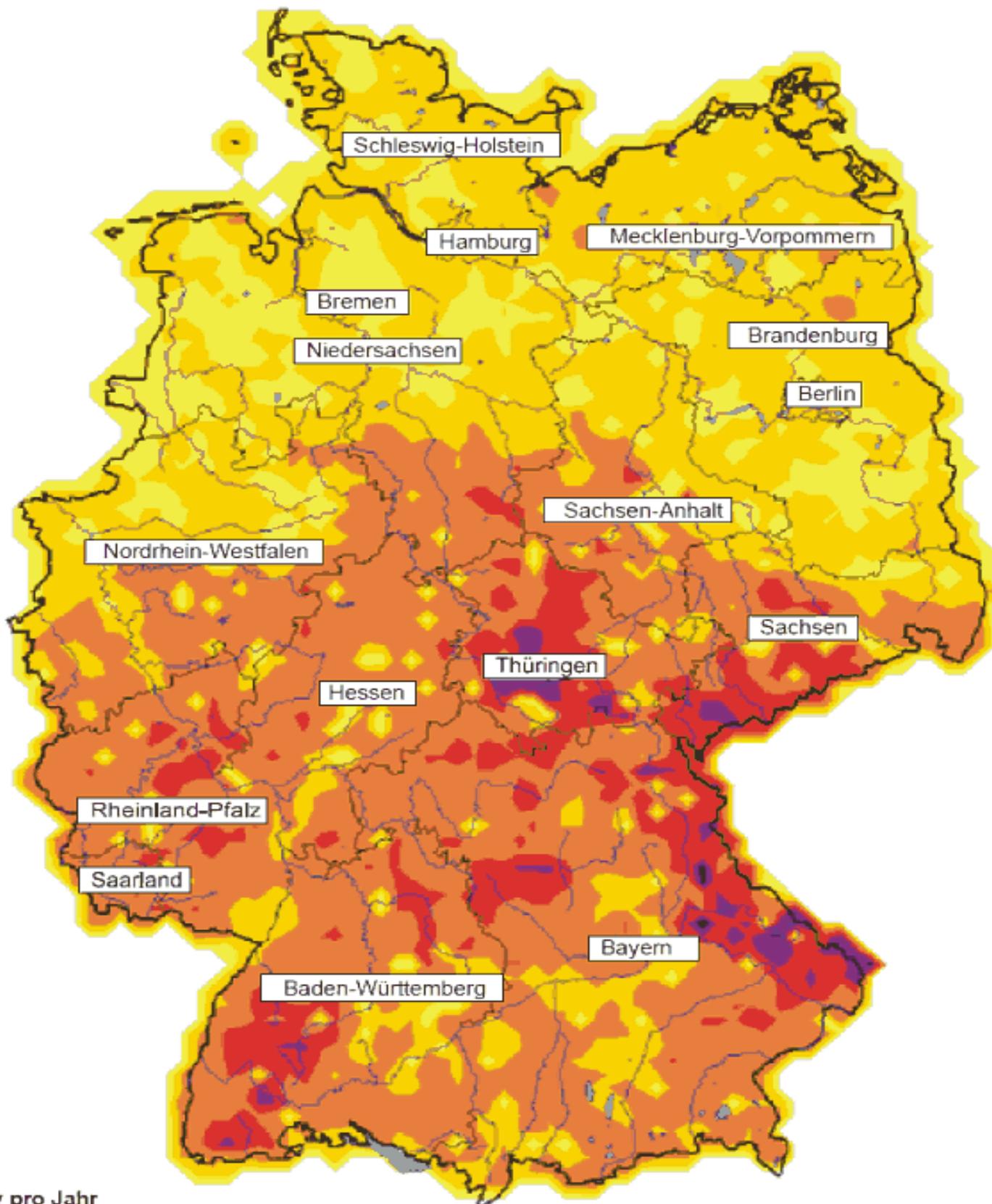
# Inhalation und Ingestion



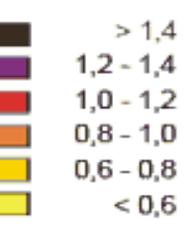
**betroffene Radioisotope:**

**Kalium 40**

**Kohlenstoff 14**

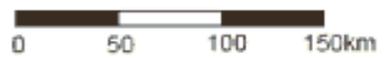


Sv pro Jahr



Daten aus IMIS

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn



# Umgebungsstrahlung

# Radioaktivitt des Menschen

Radionuklid	Aktivität / Bq
Kalium-40	4500
Kohlenstoff-14	3800
Rubidium-87	650
Blei-210, Bismut-210, Polonium-210 (Ra-222-Töchter)	60
Kurzlebige Zerfallsprodukte Von Radon-220	30
Tritium	25
Beryllium-7	25
Kurzlebige Zerfallsprodukte von Radon-222	15
Sonst	7

← aus Supernovae

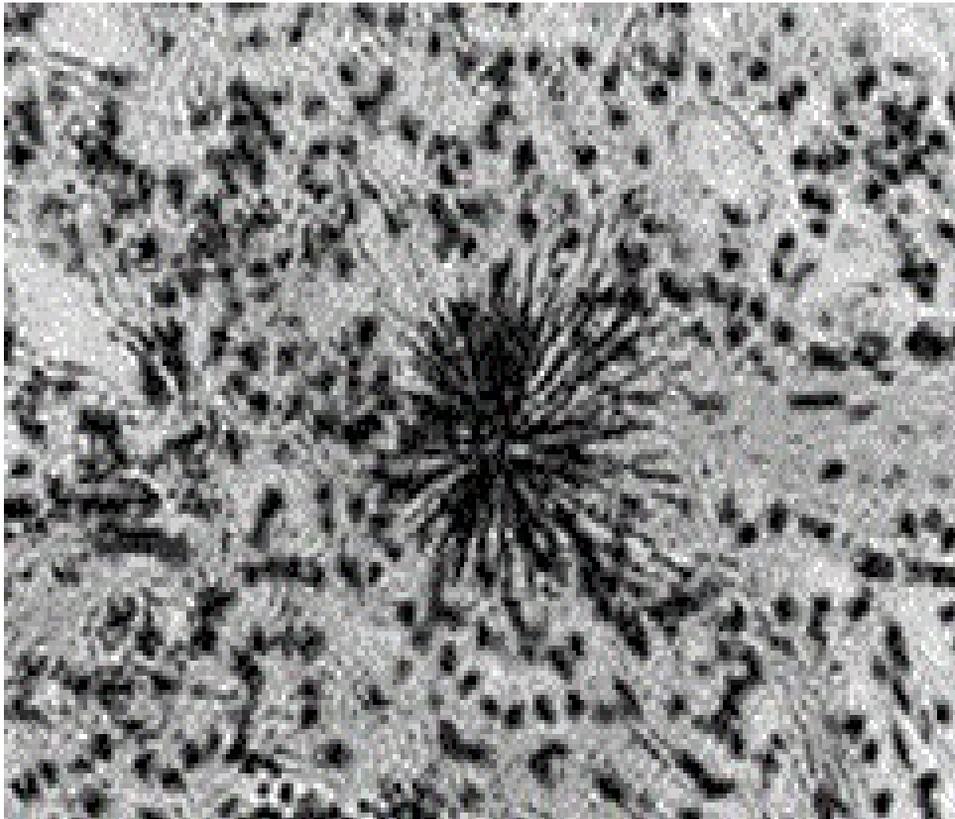
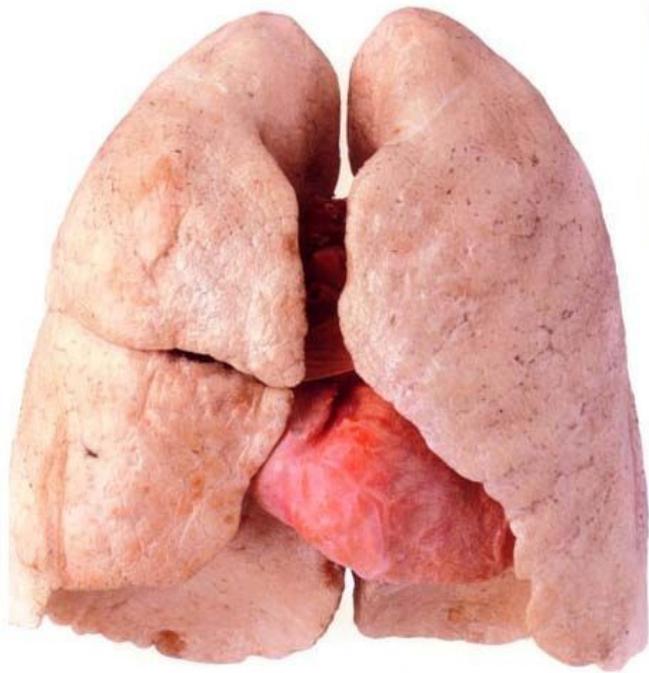
← aus SN

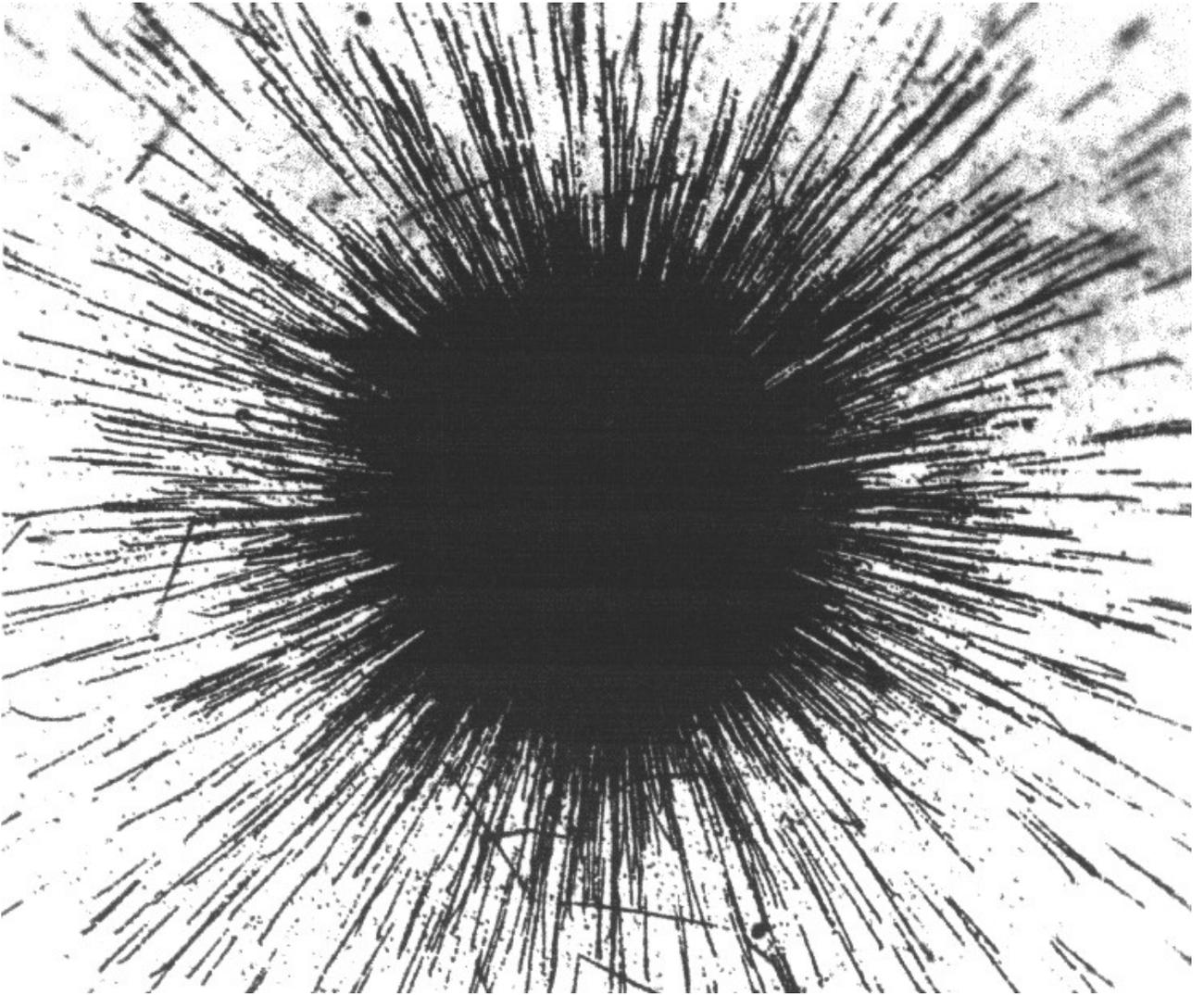
## Interne Strahlung des Menschen

Pflanzliche und tierische Nahrungsmittel

Mittelwert : ca. : 100 Bq / kg

# Radon und Rauchen

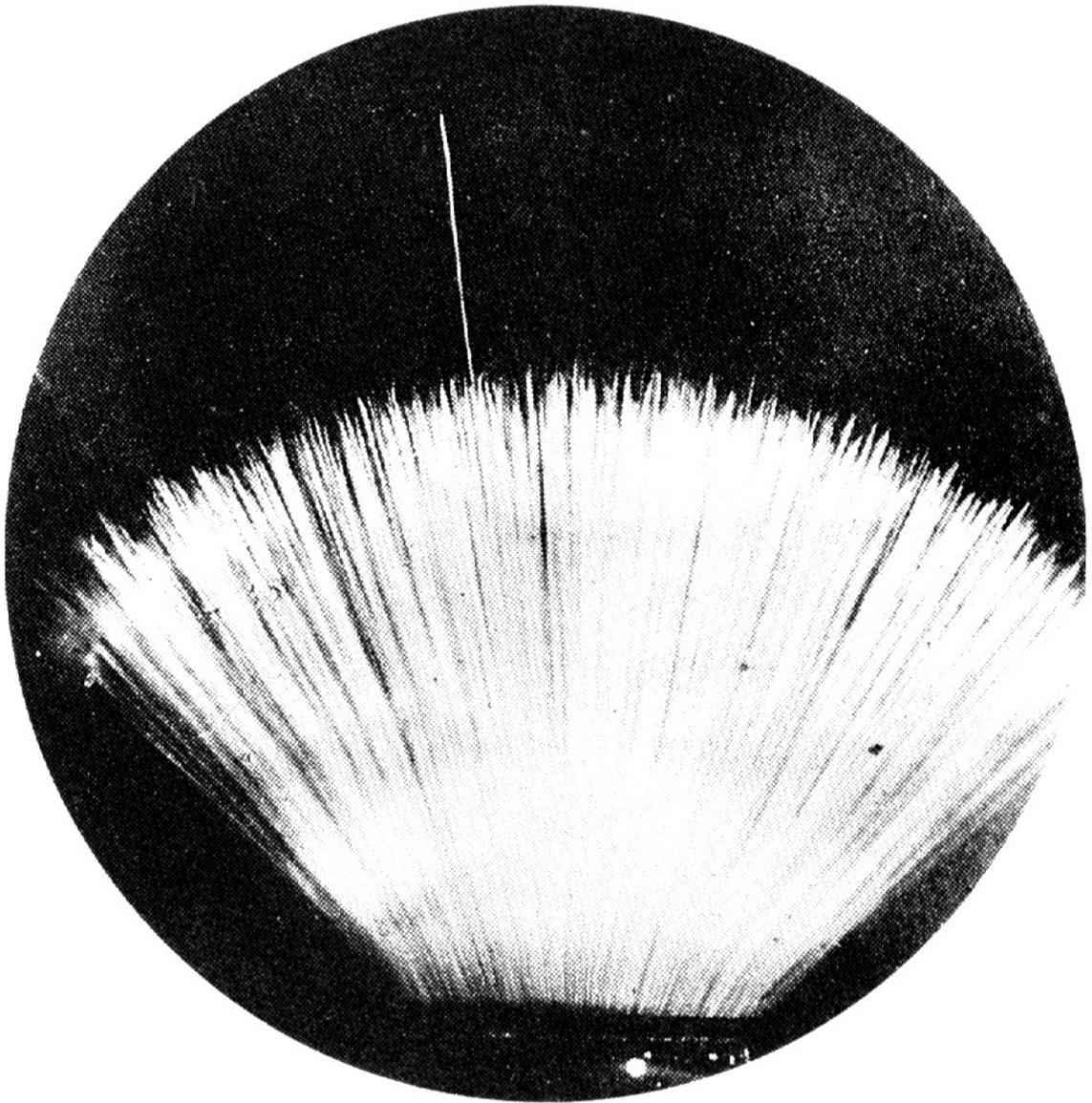




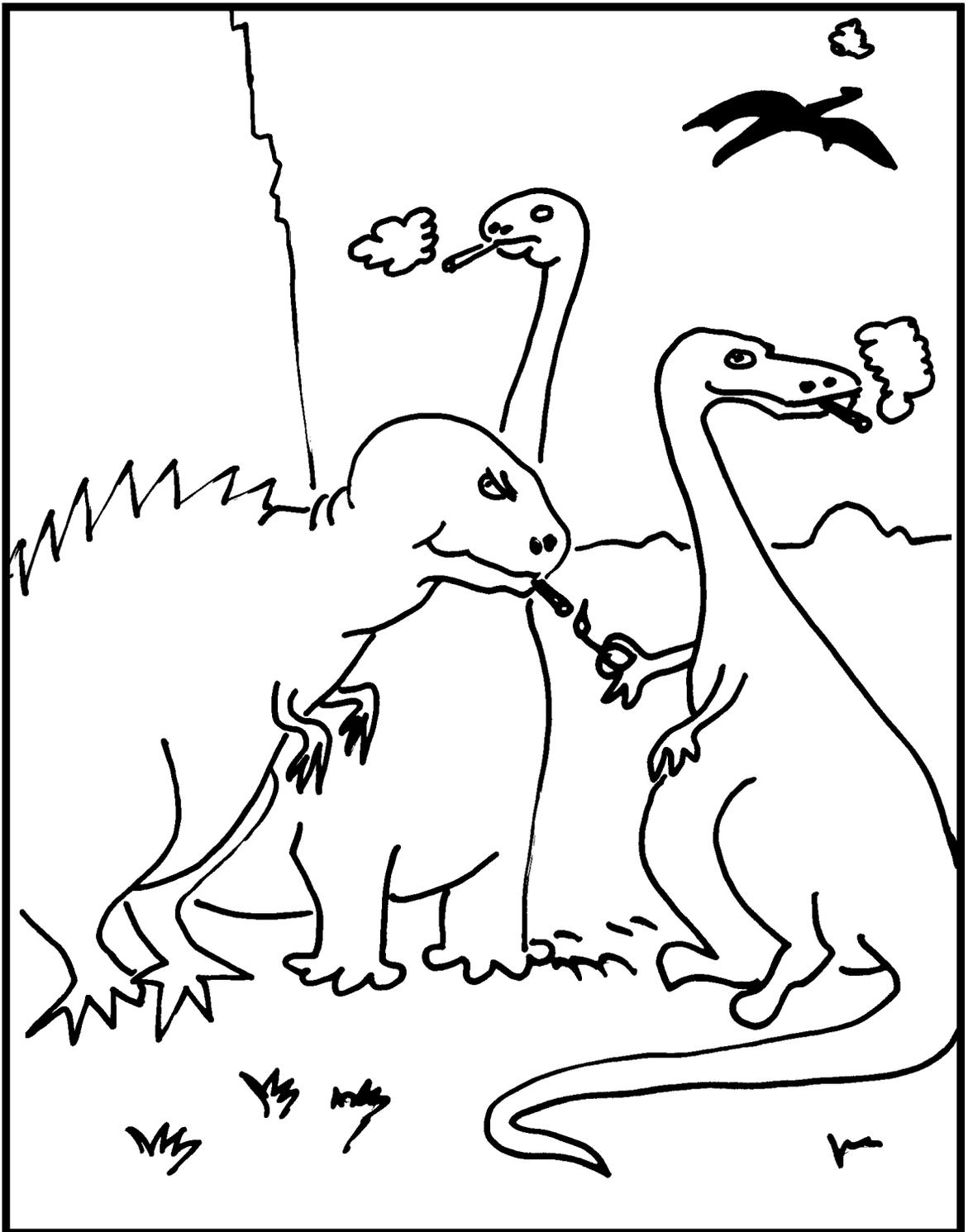
**Alpha-Teilchen** schießen aus einem Stückchen Radiumsalz auf die Oberfläche einer photographischen Platte, die mit einer speziellen Emulsion bedeckt ist. Die elektrisch geladenen Alphas hinterlassen Spuren in der Emulsion, die als dunkle Linien auf dem Negativbild der entwickelten Platte erscheinen. (Der Fleck in der Mitte ist ca. ein Zehntel Millimeter groß.)

# Aufnahme eines Lungenschnitts mit zwei 'hot spots'



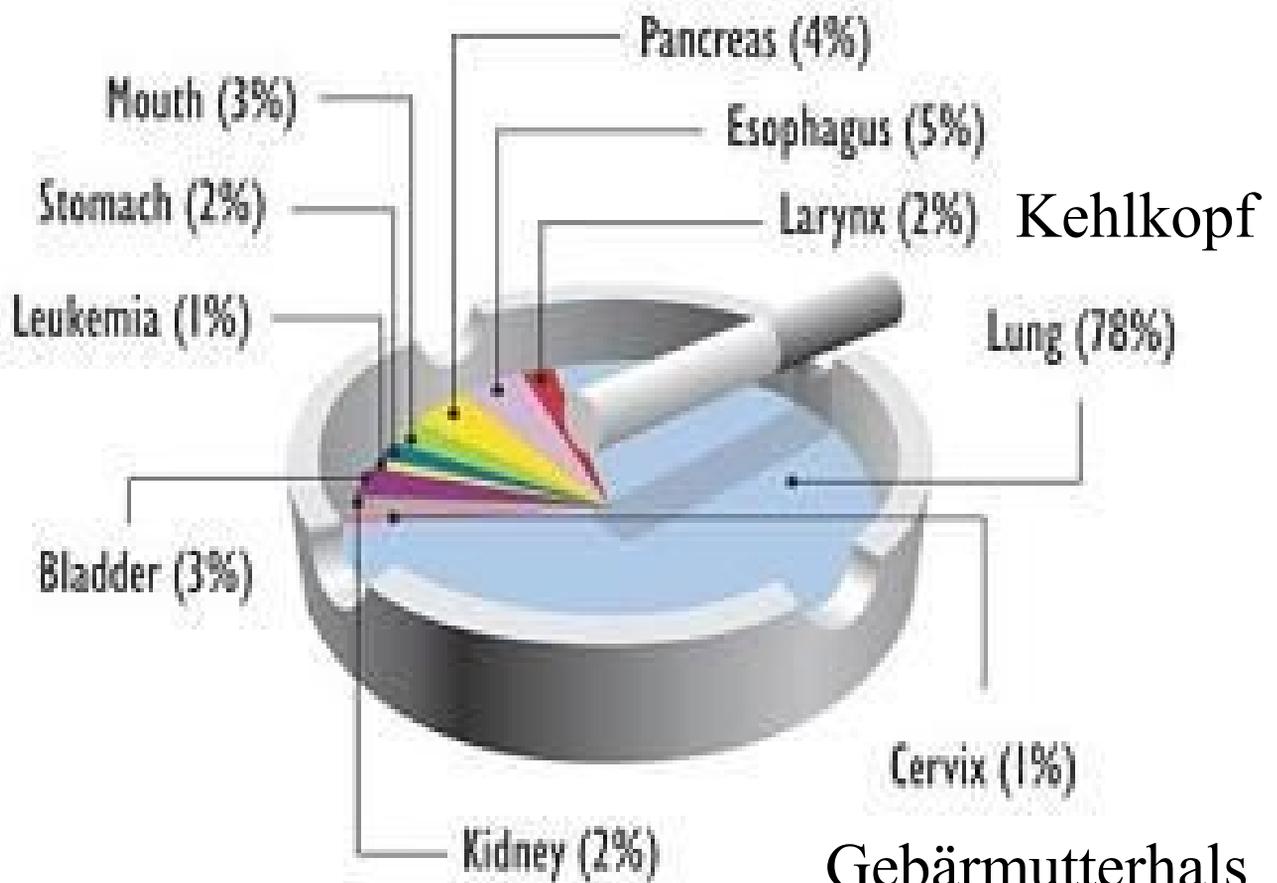


Alpha-Teilchen derselben Energie haben dieselbe Reichweite und radioaktive Stoffe emittieren Alpha-Teilchen mit spezifischer Energie. Hier fliegt die Mehrzahl der Alpha-Teilchen in einer mit Luft gefüllten Nebelkammer aus einer Thorium C' (Polonium-212) -Quelle 8,6 cm weit bevor sie stoppen, während ein einziges Alpha-Teilchen mit höherer Energie 11,5 cm weit fliegt.



Der wahre Grund, warum die Dinosaurier  
ausgestorben sind!

# Strahlenbelastung durch Rauchen



# Strahlendosen durch Rauchen

**Normaler Raucher:**

**Belastung entsprechend 250**

**Röntgenaufnahmen pro Jahr.**

**Schwankend je nach**

**Ursprungsort des Tabaks.**

**Hauptradionuklide:**

**Po-210 und Bi-214;**

**auch Passivrauchen ist  
gefährlich (20 %)**



He, wenn Du rauchen willst, muss Du nach  
draußen gehen.

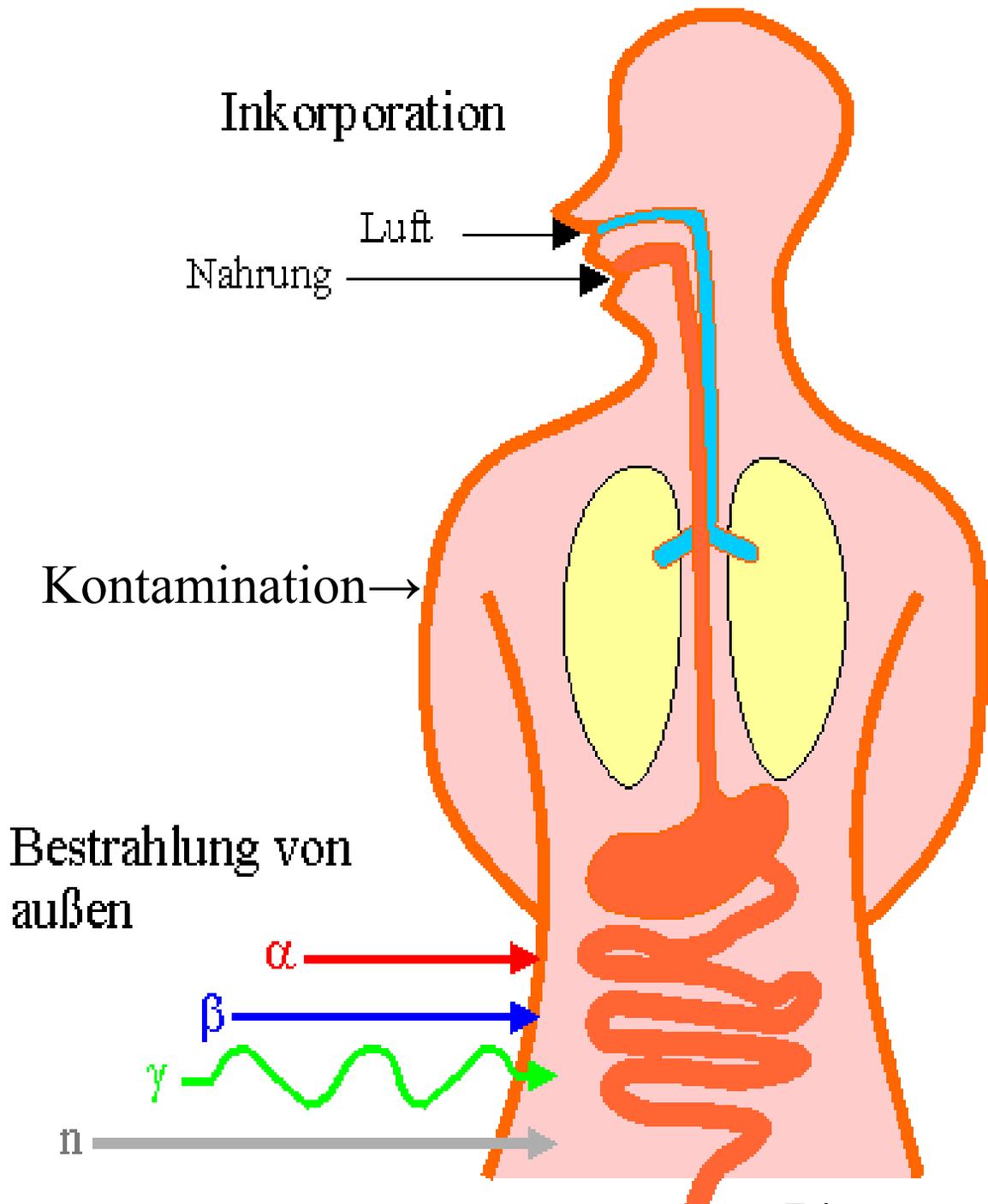
# Vergleiche

## Verlust an individueller Lebenserwartung

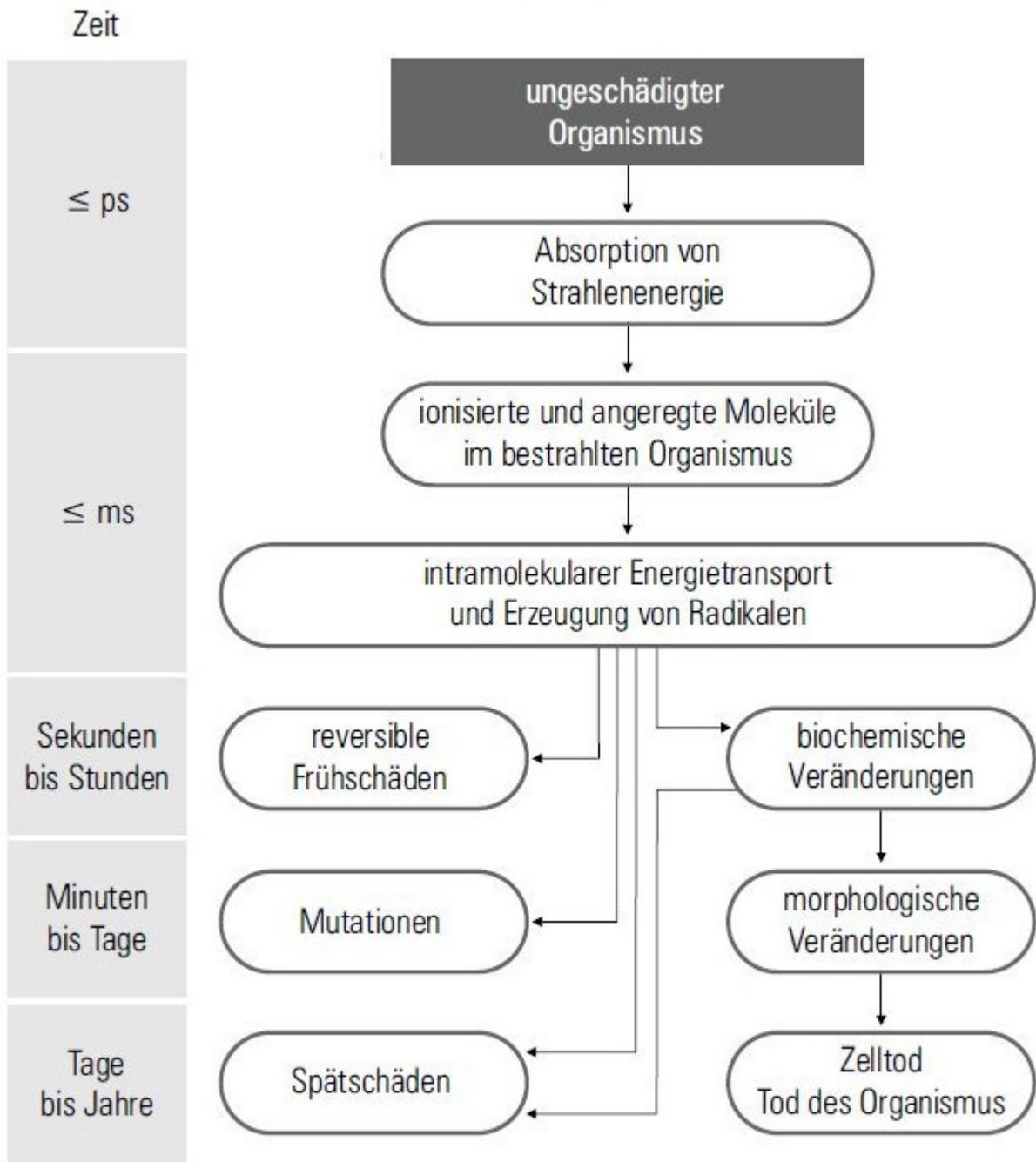
Tab. 4.4 Vergleich der statistischen Änderung an individueller Lebenserwartung (LE) durch ionisierende Strahlung mit anderen Risiken des täglichen Lebens.

Ursache	$\Delta$ LE (Tage)
Alkoholismus	- 432
ledig bleiben } ♂	- 350
Rauchen } ♂	- 240
ledig bleiben } ♀	- 1600
Rauchen } ♀	- 1425
30% Übergewicht	- 130
Passivrauchen	- 50
<b>Strahlung</b>	
1 mSv pro Jahr, lebenslang	- 19
10 mSv einmalig	- 3
3 mSv einmalig	- 1
1 mSv einmalig	- 0,5
Anlegen von Sicherheitsgurten	+ 50
Verfügbarkeit von Notarztwagen	+ 125

# Inkorporation und Kontamination

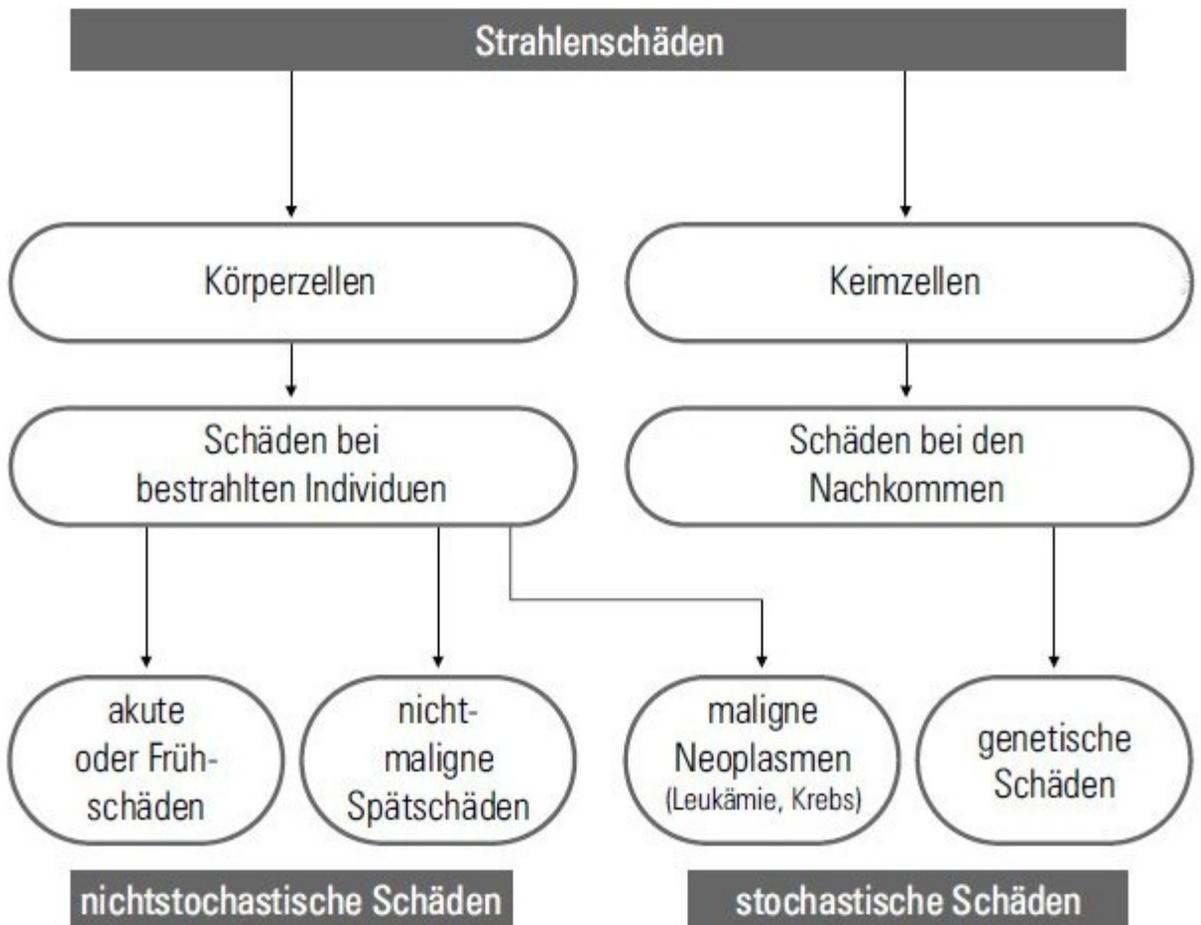


# Biologische Wirkung



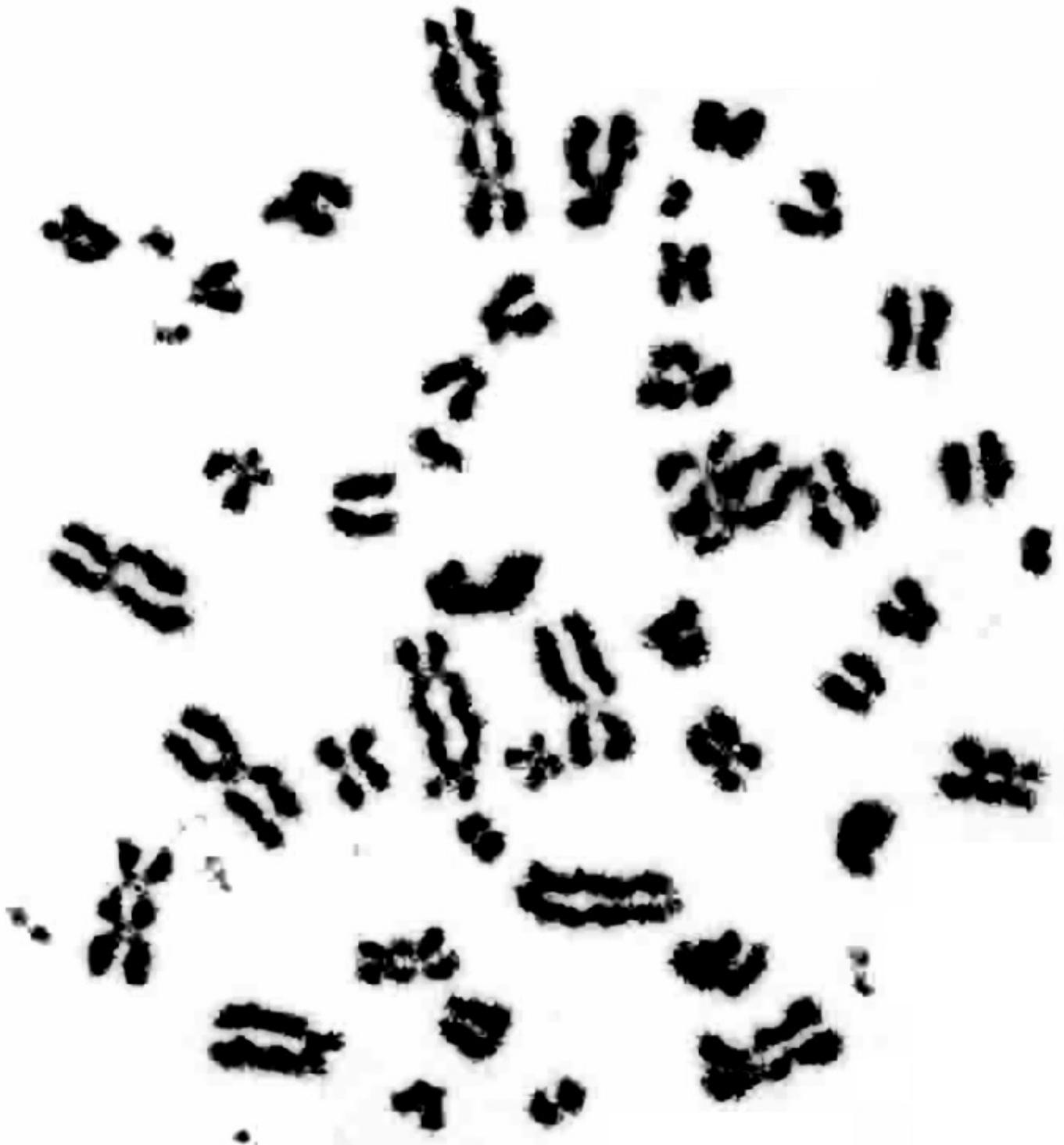
Zeitlicher Verlauf der physikalisch–biologischen Wirkung absorbiertener Strahlenenergie

# Klassifizierung von Strahlenschäden

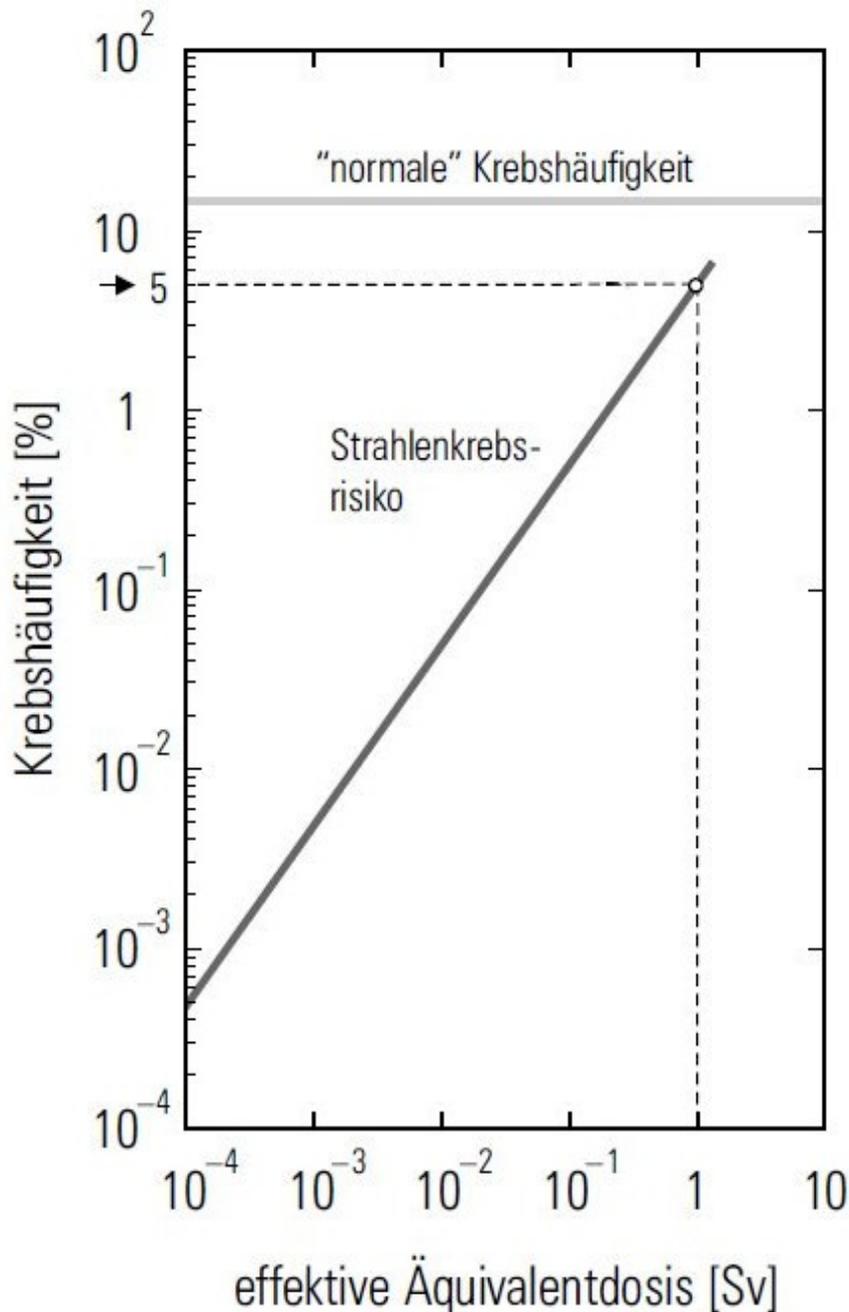


Übersicht über die verschiedenen Arten von Strahlenschäden

# Chromosomen- aberrationen

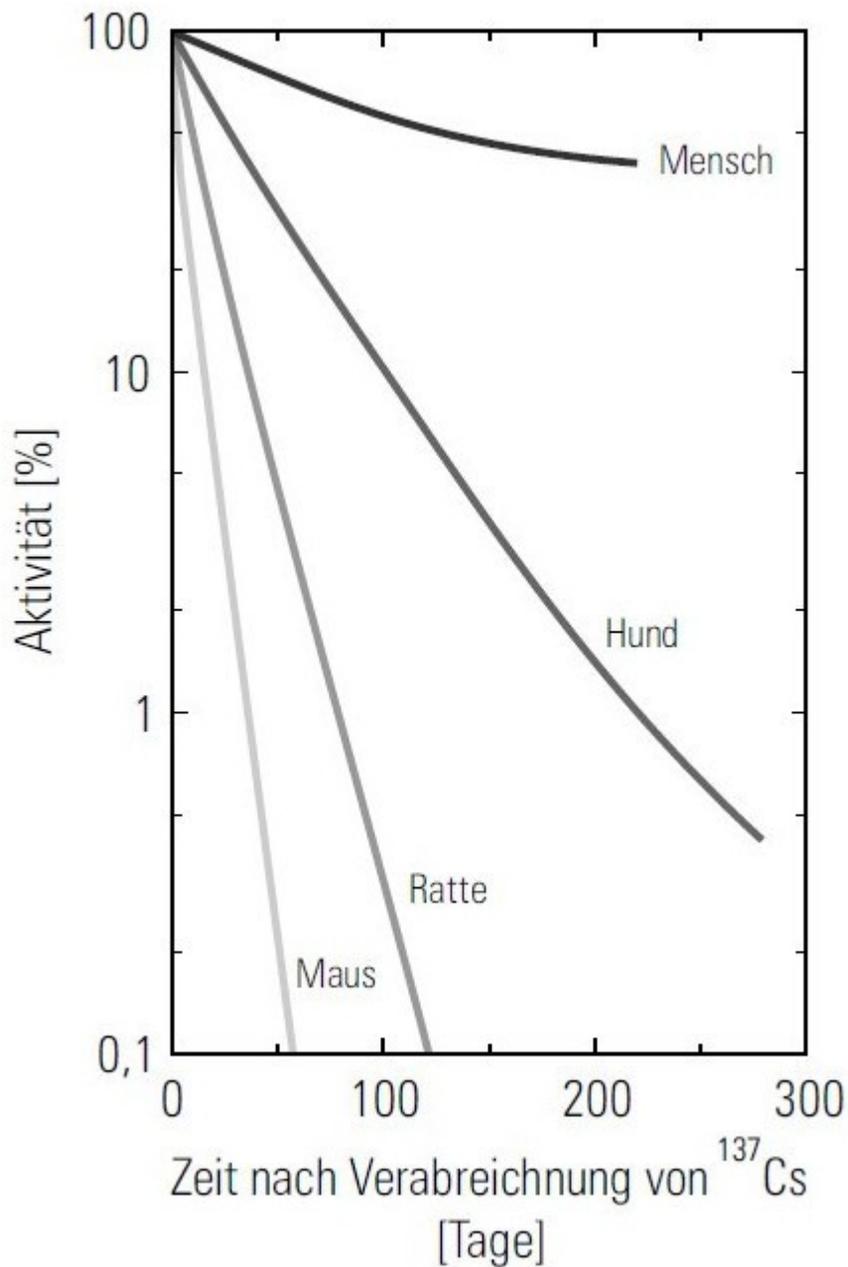


# Krebswahrscheinlichkeit durch ionisierende Strahlung

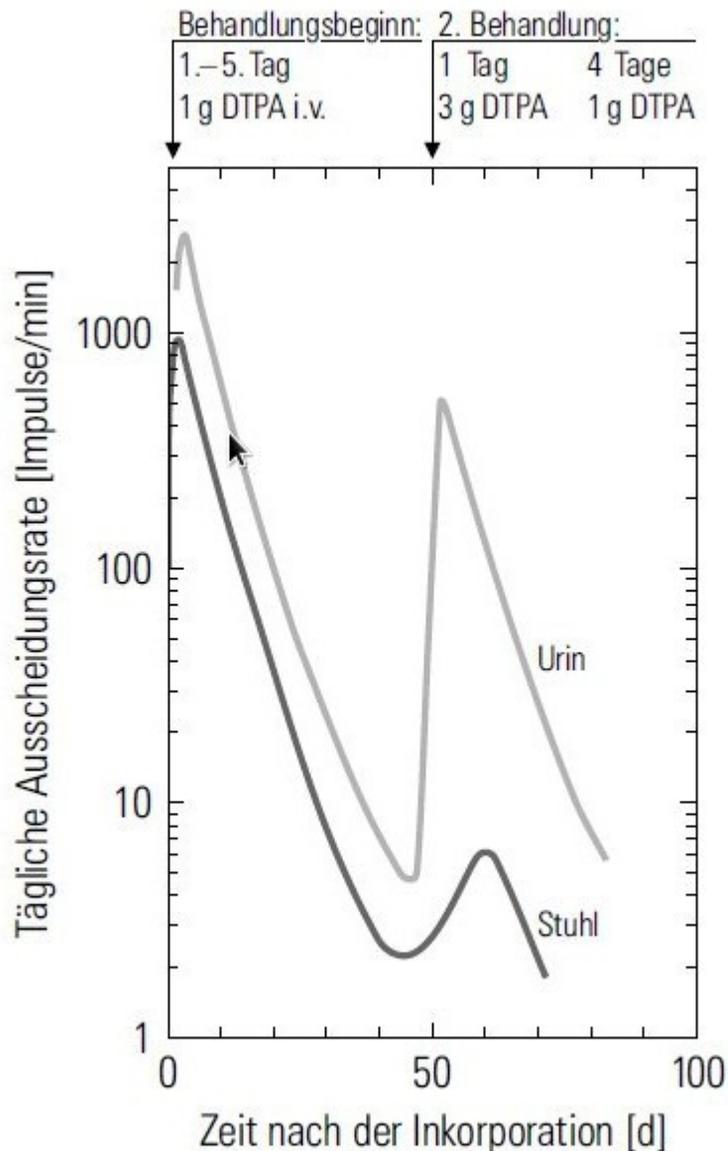


Abhängigkeit des Strahlenrisikos von der absorbierten Ganzkörperdosis im Vergleich zur „normalen“ Krebshäufigkeit

# Effektive Halbwertszeit



# Dekorporation



Ausscheidung von Plutonium im Urin und Stuhl beim Menschen nach einer unfallbedingten Plutoniuminkorporation

# Strahlenschäden

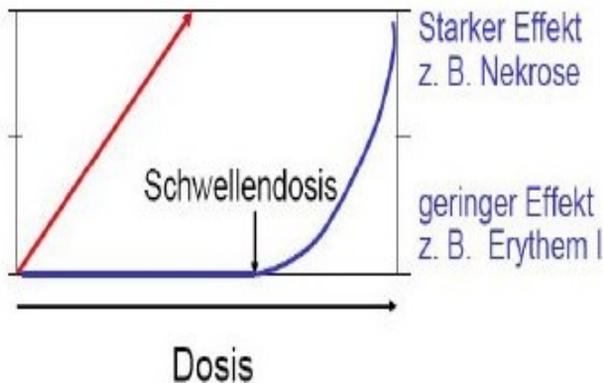
## Stochastische Effekte

- Wahrscheinlichkeit mit steigender Dosis zunehmend
- Kein Schwellenwert

## Deterministische Effekte

- Schweregrad mit steigender Dosis zunehmend
- Schwellenwert

Mutationen  
Krebsfälle



**Frühschäden** ab Dosen von 1000 mSv : Übelkeit, Blutungen, Erbrechen

**Spätschäden** nach Latenzzeit von 20 – 30 Jahren: Krebs, Leukämie Risikofaktor 5% pro Sievert ; linear, keine Schwelle

**Katastrophendosis** für  
**Feuerwehrlente** : 250 mSv,  
Krebsrisiko 1,25%

**Letale Dosis 4 Sv**

# Biologische Wirkungen

Frühschäden ab 1Sv

⇒ Strahlenkrankheit

Spätschäden: Krebs

Risikofaktoren für eine einmalige Ganzkörperbestrahlung mit 10 mSv:

Leukämie	$50 \cdot 10^{-6}$
Knochenkrebs	$5 \cdot 10^{-6}$
Darmkrebs	$85 \cdot 10^{-6}$
Leberkrebs	$15 \cdot 10^{-6}$
Lungenkrebs	$85 \cdot 10^{-6}$
Magenkrebs	$110 \cdot 10^{-6}$
übrige Organe	$150 \cdot 10^{-6}$

$500 \cdot 10^{-6}$  pro 10 mSv

1 Million Personen werden mit 10 mSv bestrahlt

500 werden innerhalb von 20-30 Jahren  
an Strahlenkrebs erkranken

Marie Curie, Otto Hahn !



14 Tage danach



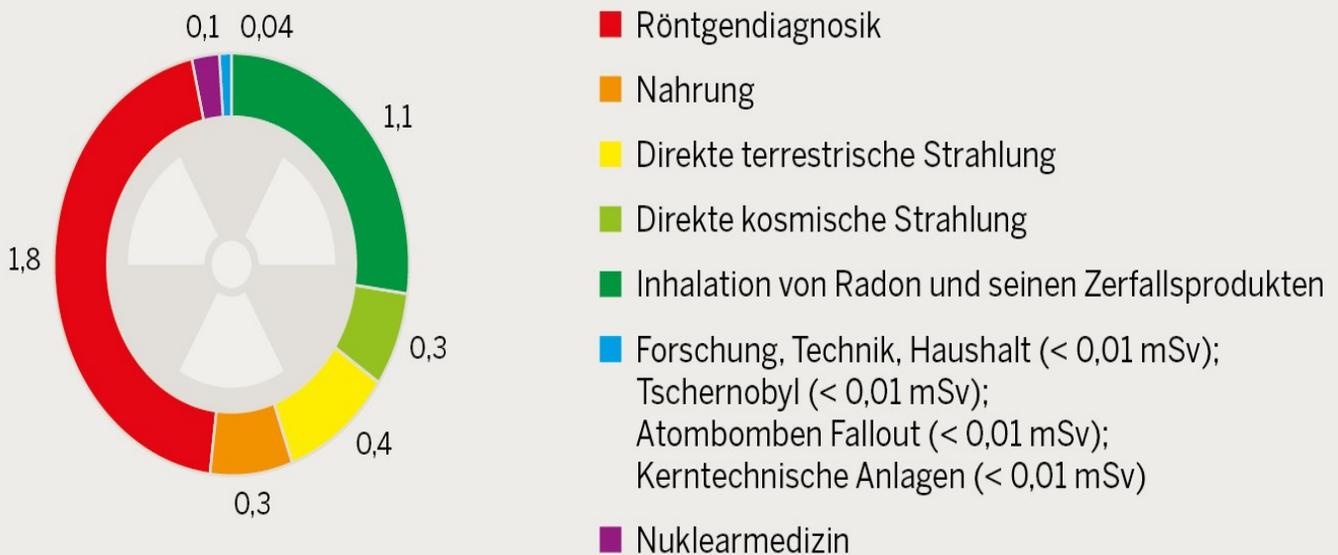
23 Tage danach



32 Tage danach

# Technische Strahlenbelastung

Effektive Jahresdosis einer Person durch ionisierende Strahlung in mSv im Jahr 2011 in Deutschland



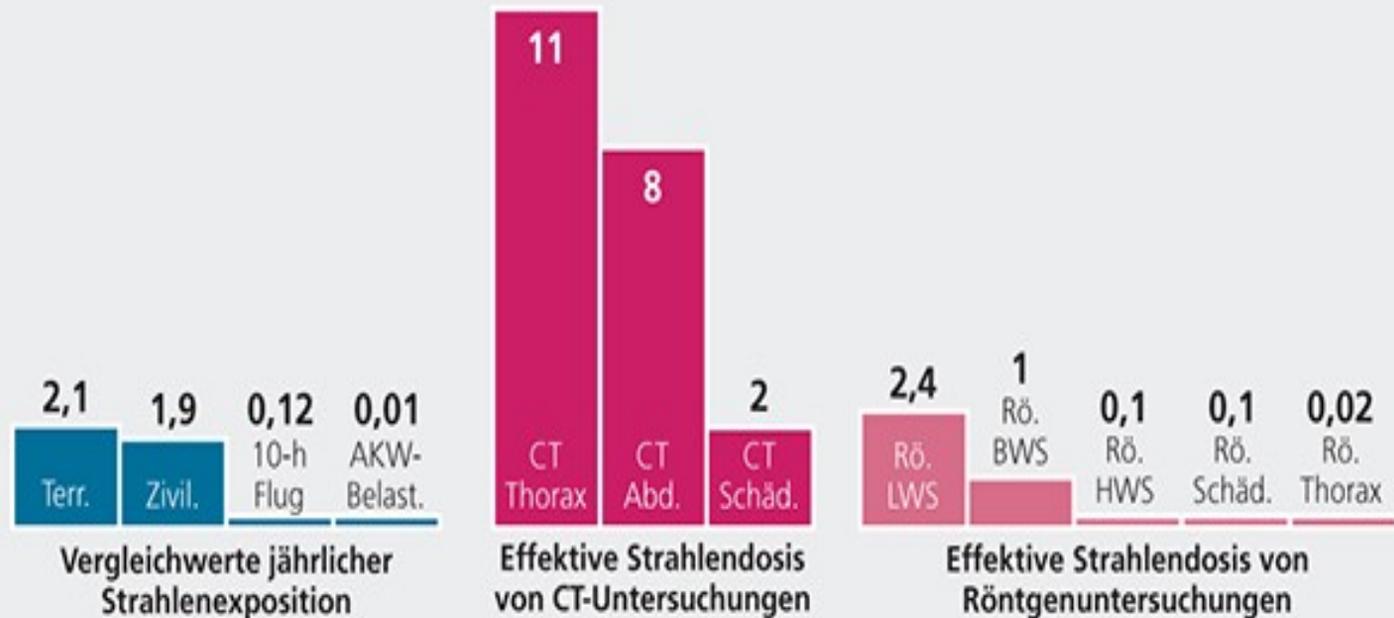
Quelle: Parlamentsbericht der Bundesregierung 2013  
zur Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung

Stand: Juni 2013

# Strahlenbelastung Medizin

## Ein Großteil der Strahlenbelastung stammt von Computertomografien

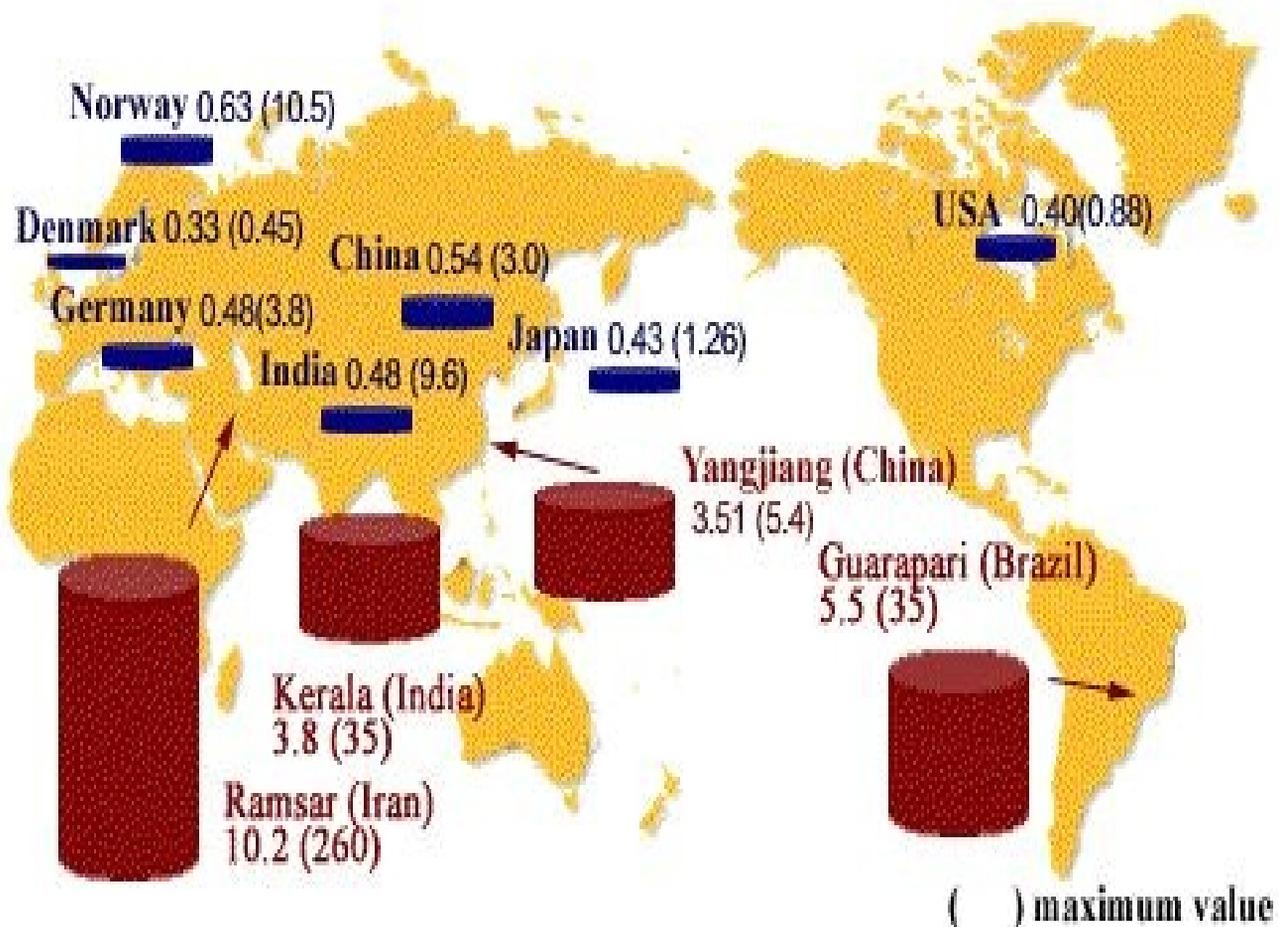
Strahlenbelastungen im Vergleich: Die Werte der jährlichen Strahlenexposition je Einwohner (blau) und die Durchschnittswerte von CT und Röntgen (rot, Exposition je Untersuchung). Alle Werte in Millisievert (mSv).



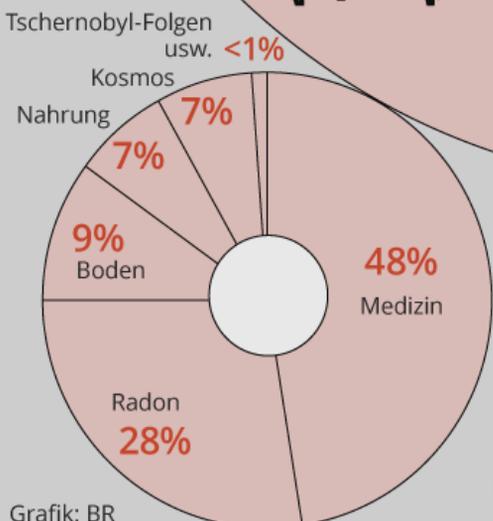
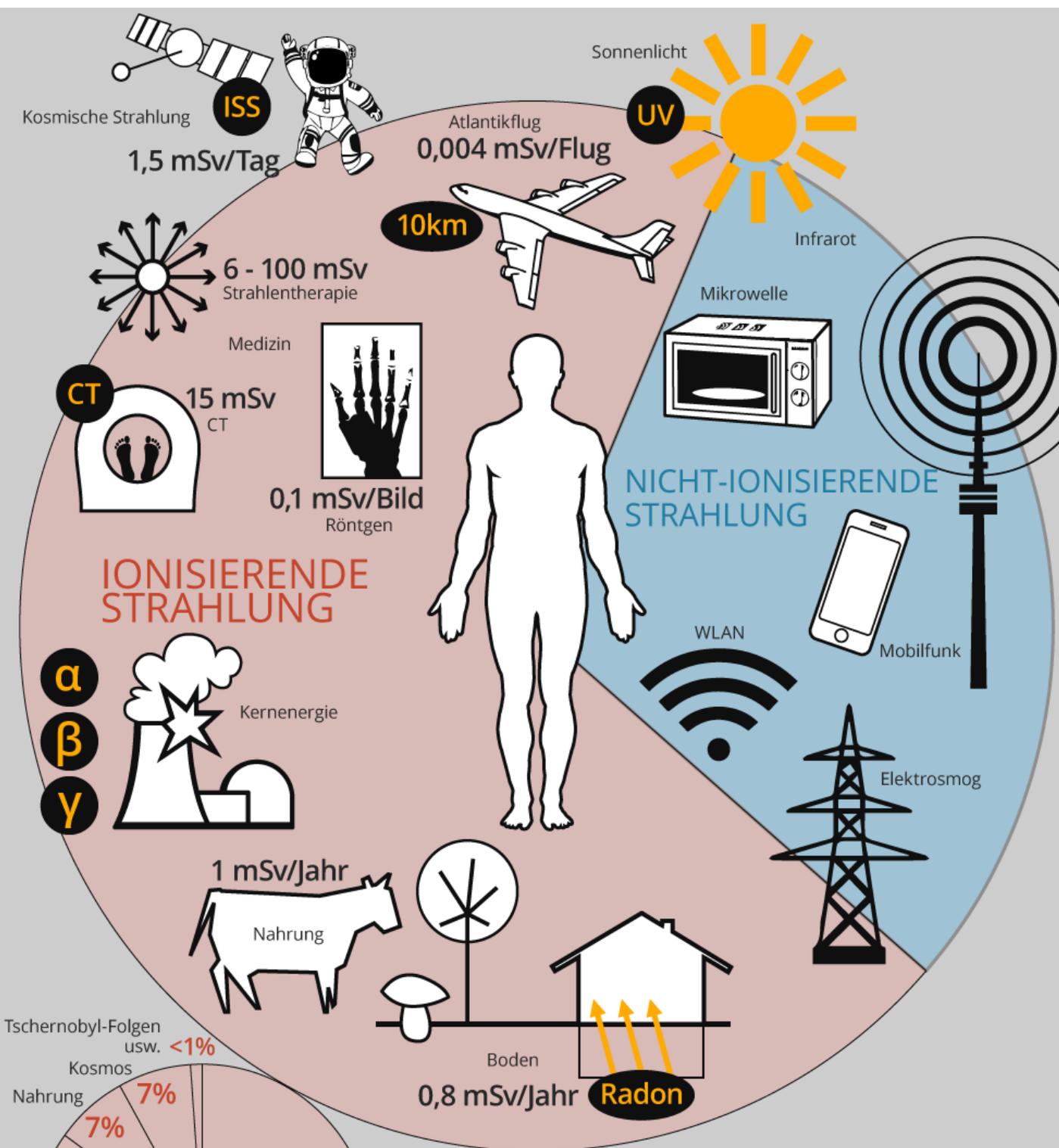
Quelle: Universität Zürich

Grafik: **ÄRZTE+ZEITUNG**

# terrestrische Jahresdosen weltweit



alle Angaben in mSv



**Anteile ionisierender Strahlung**

durchschnittliche Strahlendosis = 4 mSv/Jahr  
 Einheit Strahlenbelastung biologischer Organismen Sievert (Sv)  
 1 Sv = 1.000 mSv = 1.000.000 µSv

# **Reaktortypen**

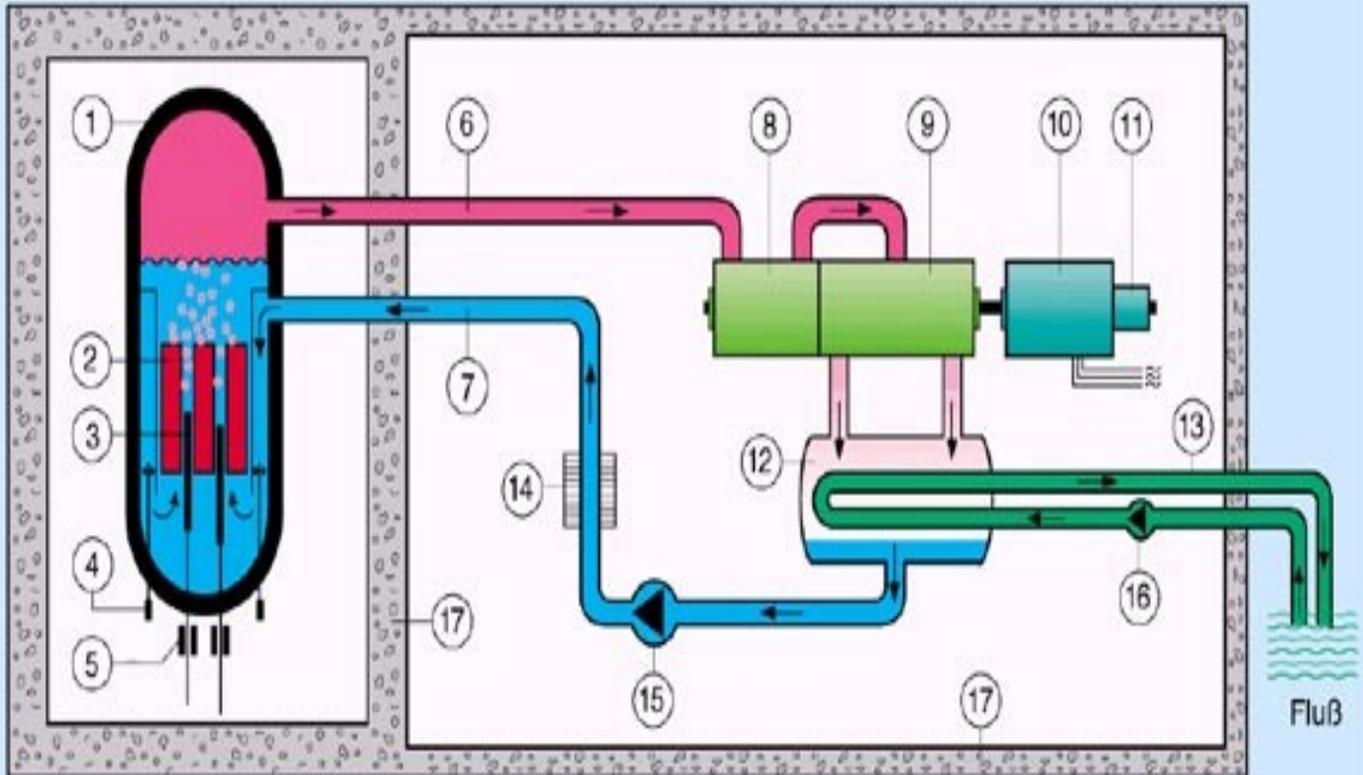
**Siedewasserreaktoren**

**Druckwasserreaktoren**

**Kugelhaufenreaktoren**

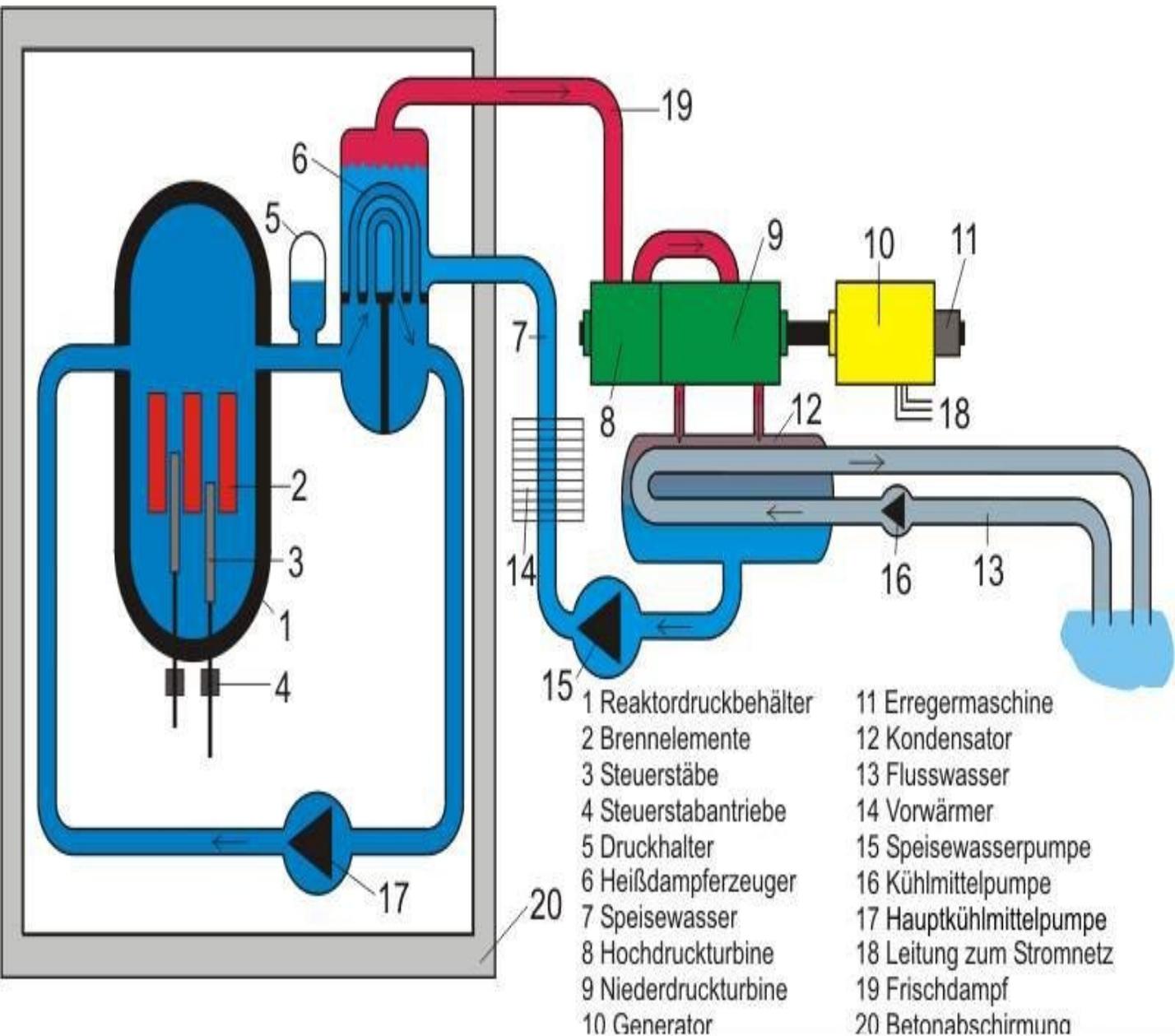
**(Dual-Fluid-Reaktor)**

# Siedewasserreaktor

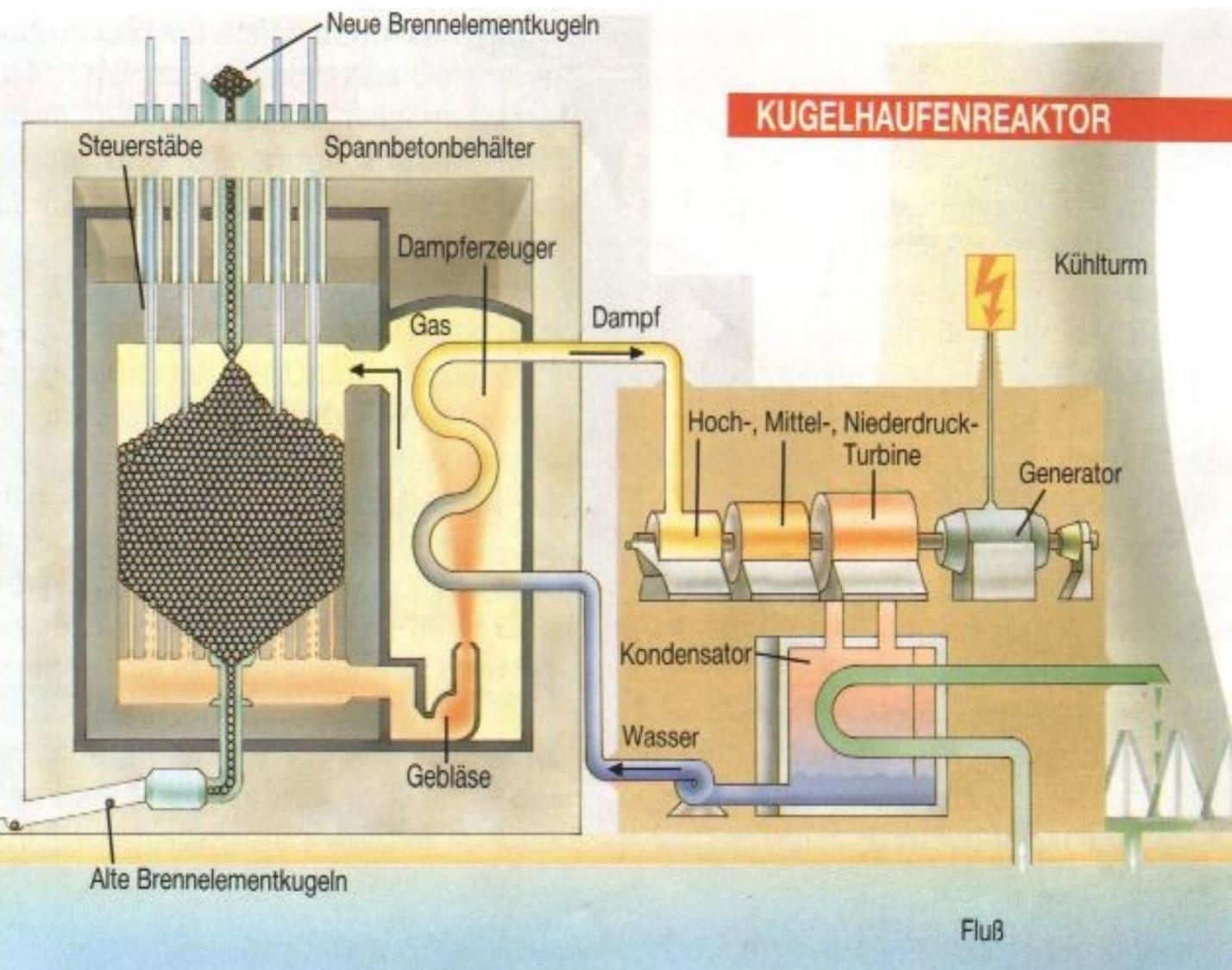


- |                        |                               |                    |                      |
|------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| 1 Reaktordruckbehälter | 6 Frischdampf                 | 10 Generator       | 14 Vorwärmanlage     |
| 2 Brennelemente        | 7 Speisewasser                | 11 Erregermaschine | 15 Speisewasserpumpe |
| 3 Steuerstäbe          | 8 Hochdruckteil der Turbine   | 12 Kondensator     | 16 Kühlwasserpumpe   |
| 4 Umwälzpumpen         | 9 Niederdruckteil der Turbine | 13 Flußwasser      | 17 Betonabschirmung  |
| 5 Steuerstabantriebe   |                               |                    |                      |

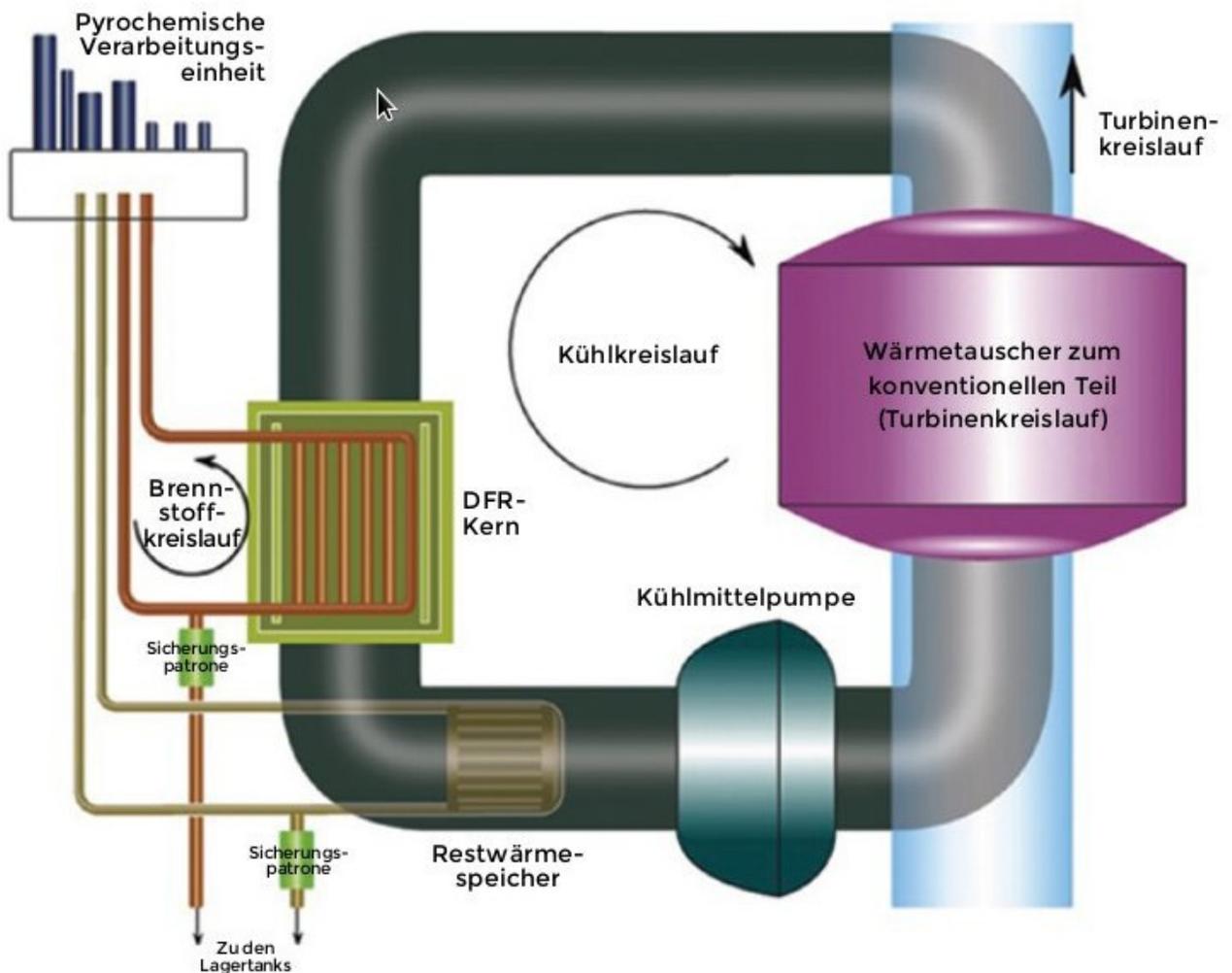
# Druckwasserreaktor



# Kugelhaufenreaktor, Hochtemperaturreaktor



# Ein experimenteller Reaktor: Der Dual-Fluid- Reaktor



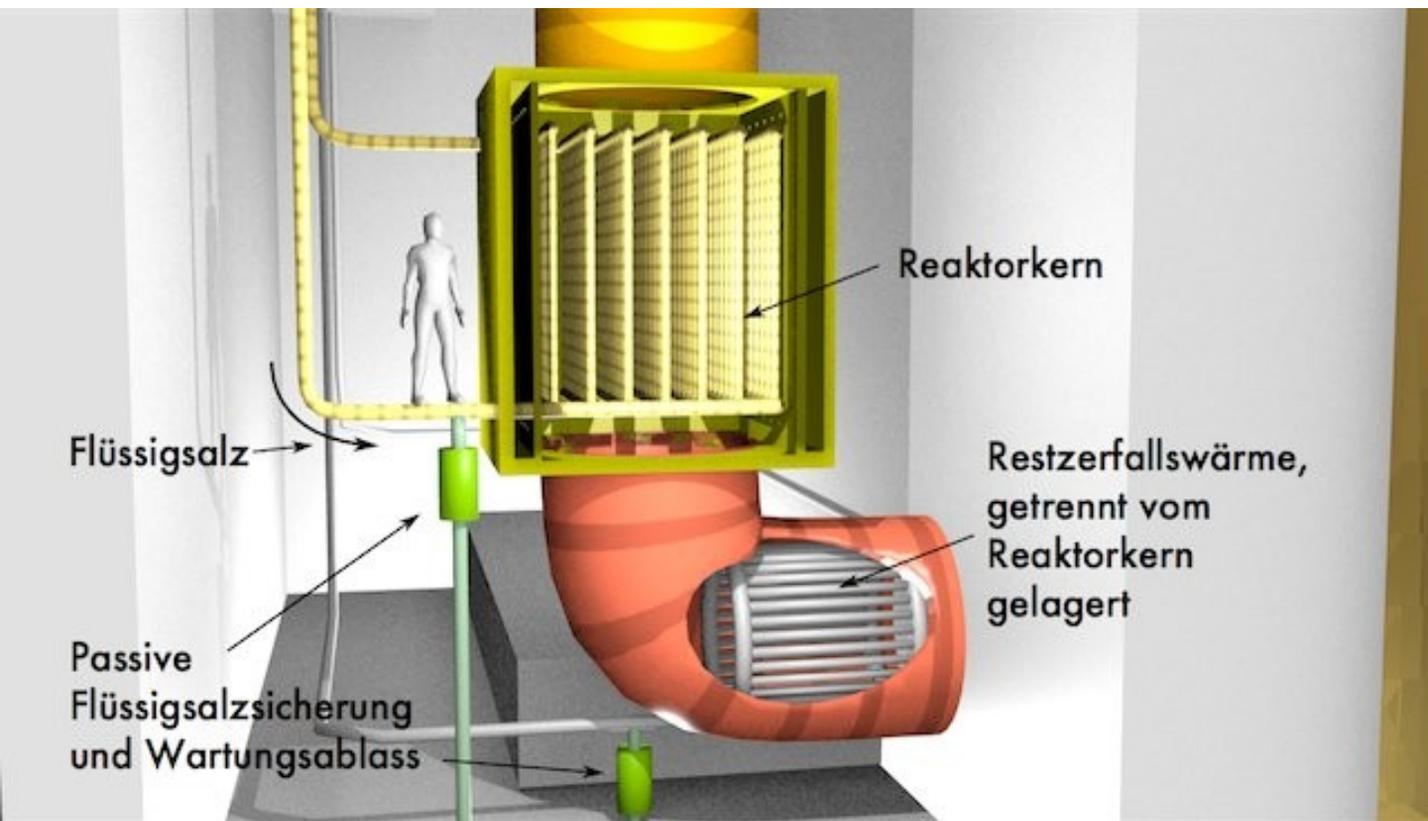
dual-fluid-reactor.org

# Funktionsweise des Dual-Fluid-Reaktors:

**Metallgekühlter Flüssigsalzreaktor**

**Brennstoff: Flüssigsalze von Uran oder Thorium (Trichloride)**

**Kühlmittel: flüssiges Blei (ca. 1000 °C)**



# **Vorteile des Dual-Fluid-Reaktors:**

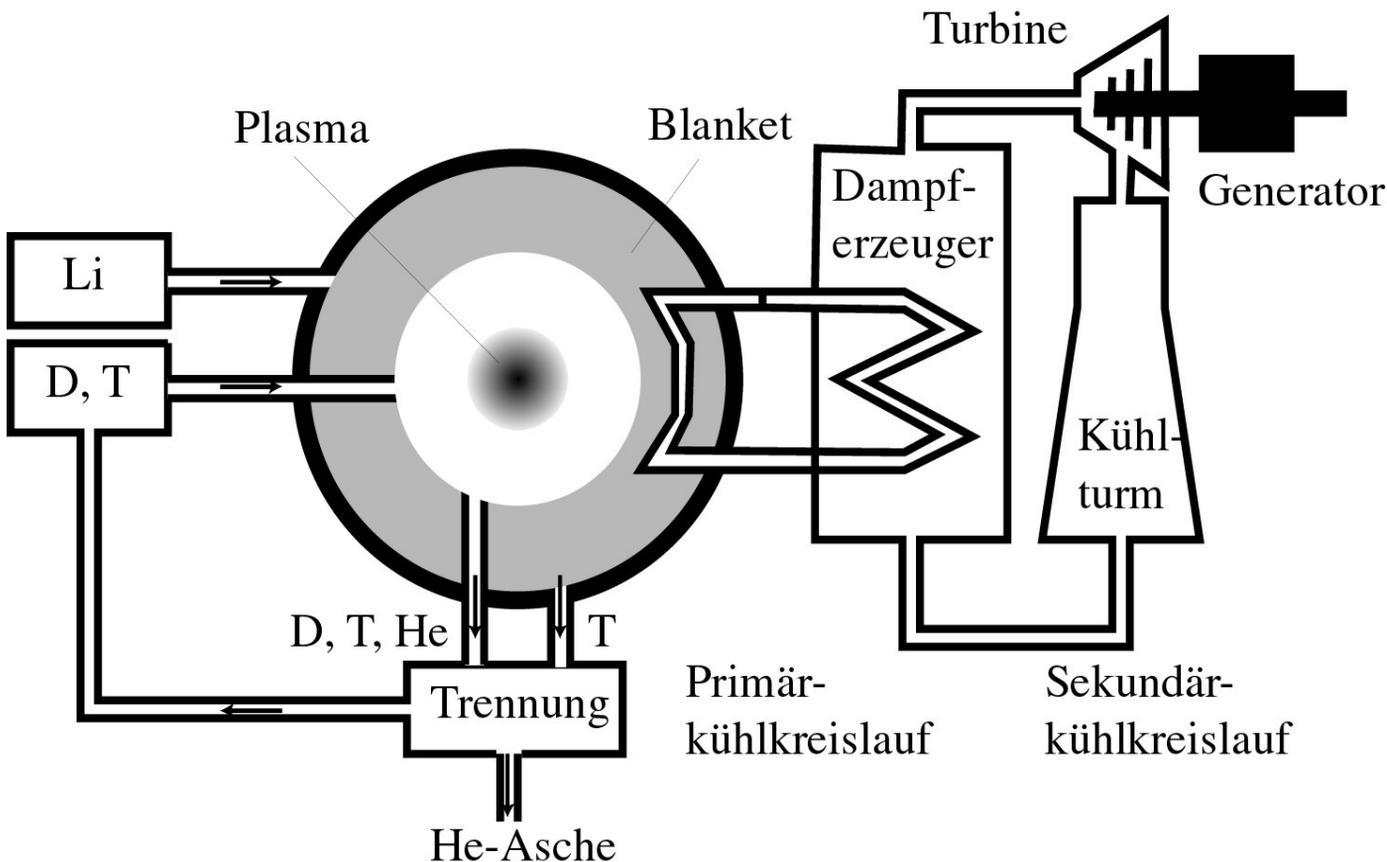
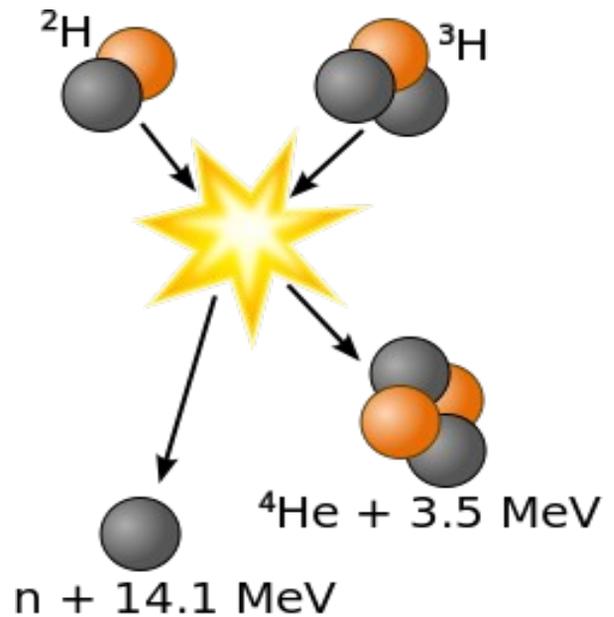
- **hohe Kühlmitteltemperatur:  
gute Effizienz**
- **kein Brennelementeaustausch**
- **es wird mehr Plutonium  
verbraucht als erbrütet**
- **langlebige Transurane werden  
gespalten (Transmutation)**
- **eingebaute Lagerung von  
Spaltprodukten**
- **negativer Reaktionskoeffizient**
- **GAU unmöglich**

## **Probleme des Dual-Fluid-Reaktors:**

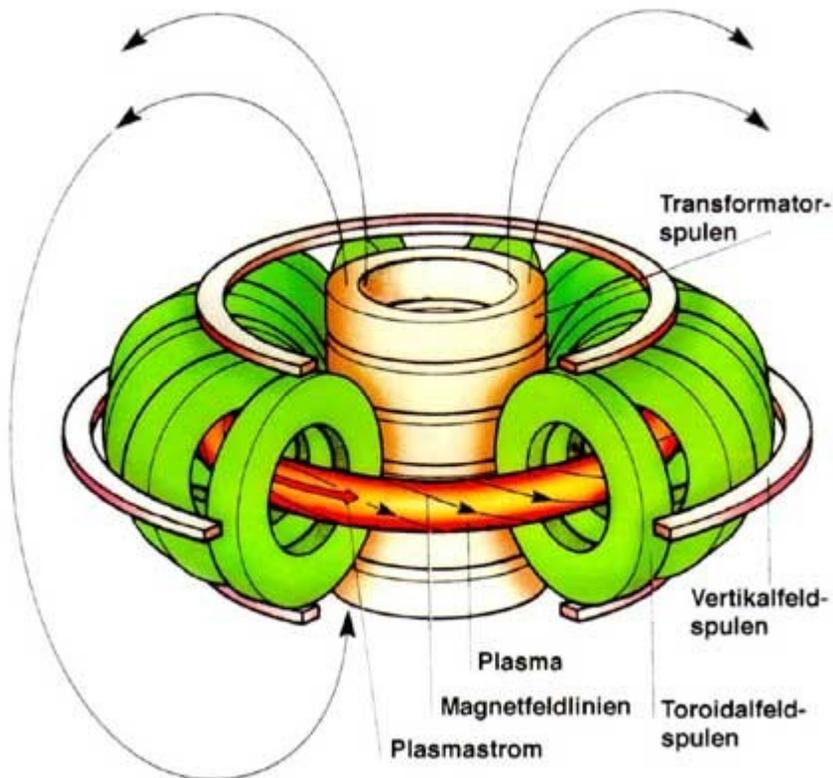
- **Verschleiß: Salze greifen Metalle an**
- **Festigkeitsverlust bei 1000 °C**
- **bei Rohrbruch gelangt der Brennstoff in den Kühlkreislauf**
- **falls die Temperatur unter 327 °C fällt, gefriert das Blei**
- **Es gibt noch keinen Prototyp**

# Fusionsreaktoren

## Tokamaks Laserfusion



# Tokamaks: magnetische Flasche



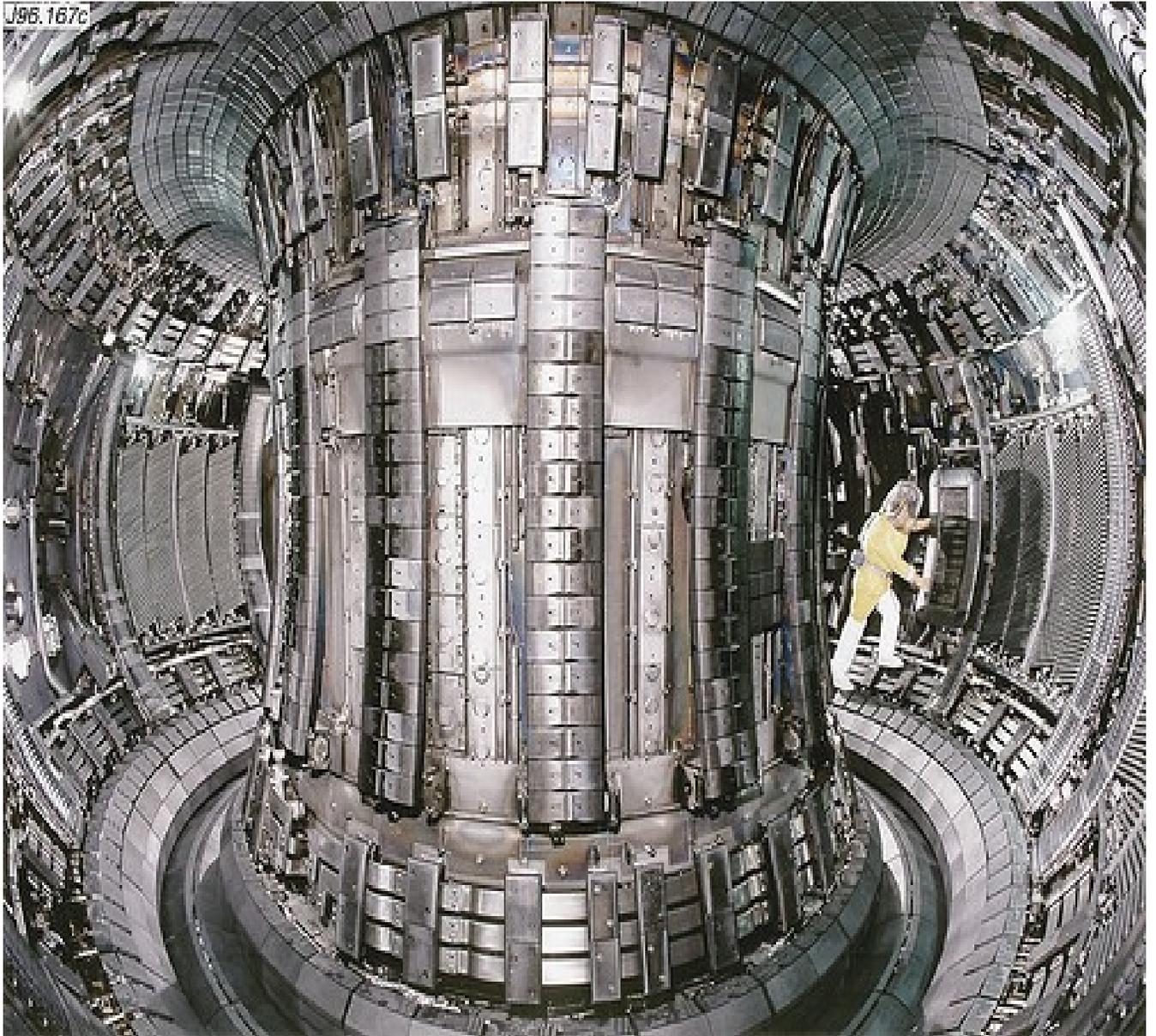
**Plasmaheizung:**

**Induktionsströme (ohmsche  
Heizung)**

**Hochfrequenzheizung**

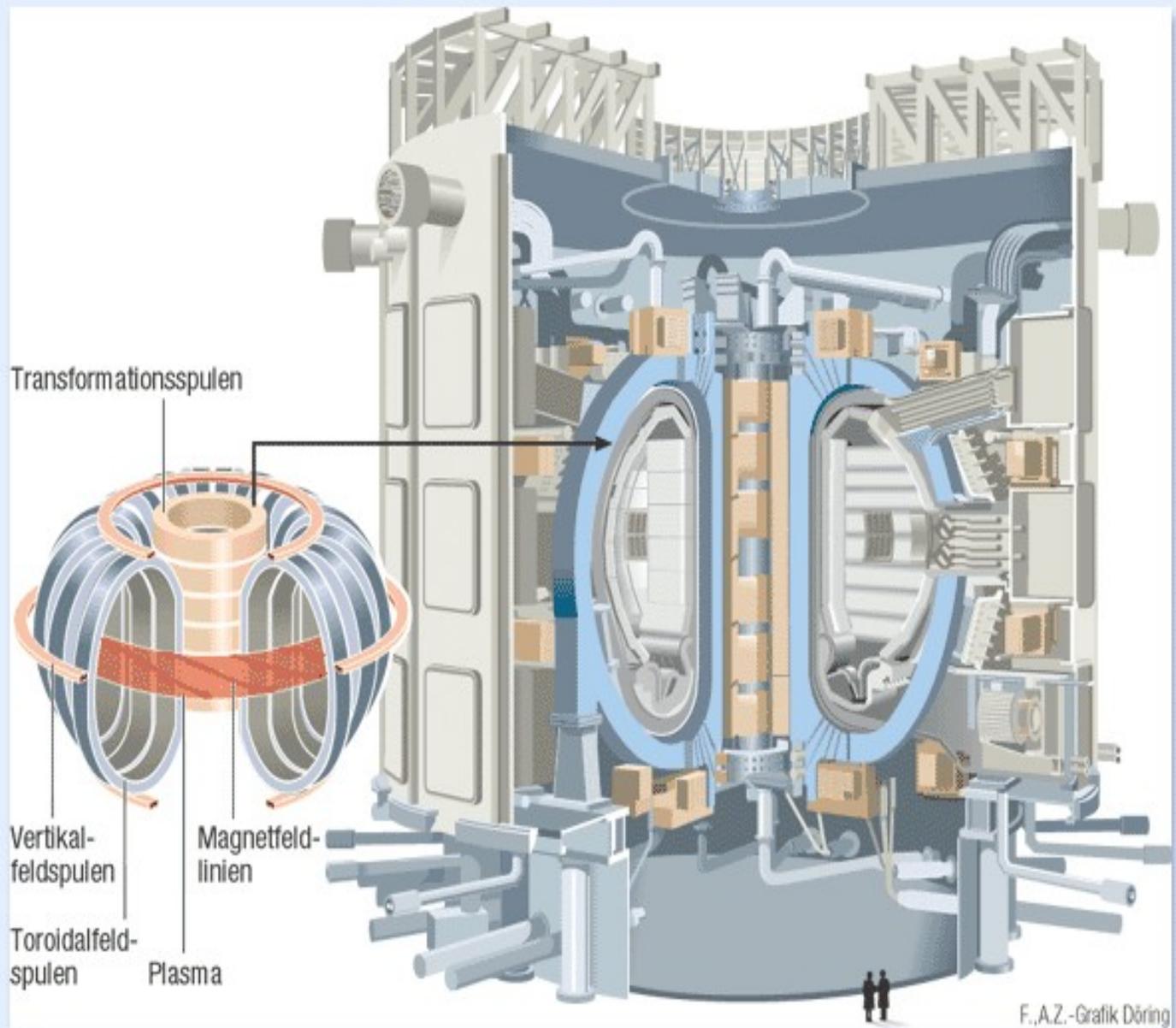
**Neutralteilchenheizung**

# JET, Culham, UK

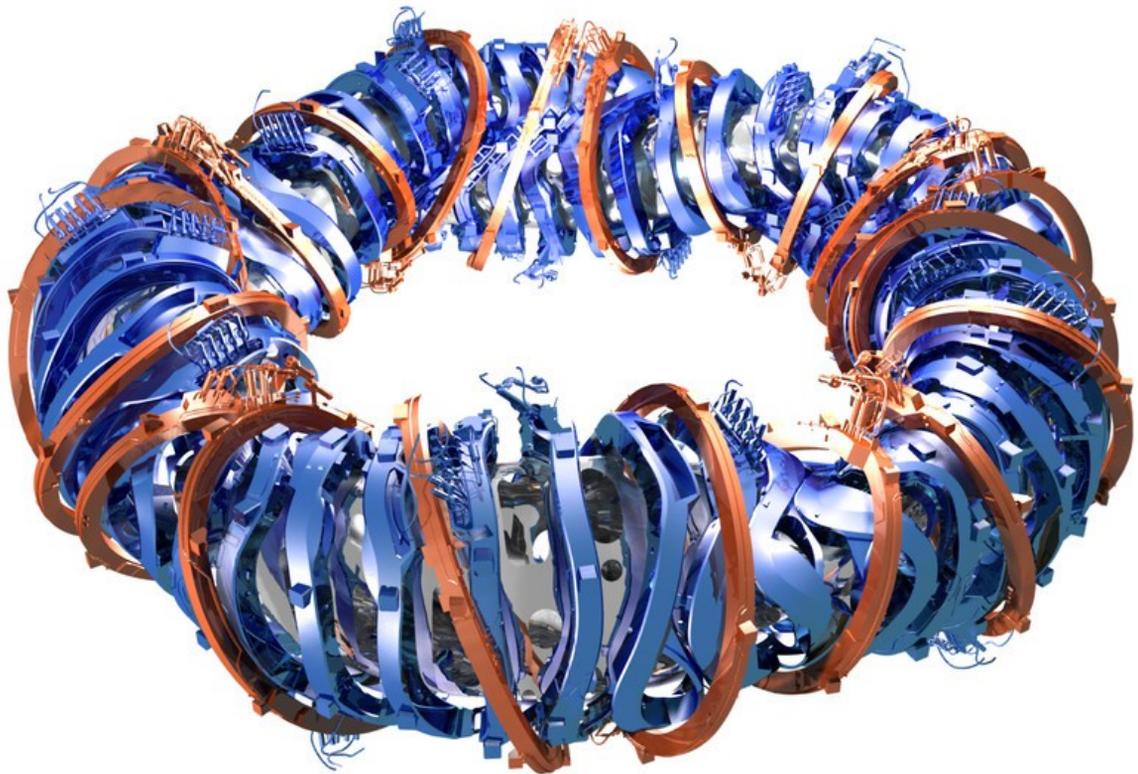


# ITER, Cadarache, Frankreich

## Fusionsreaktor Iter (Querschnitt)



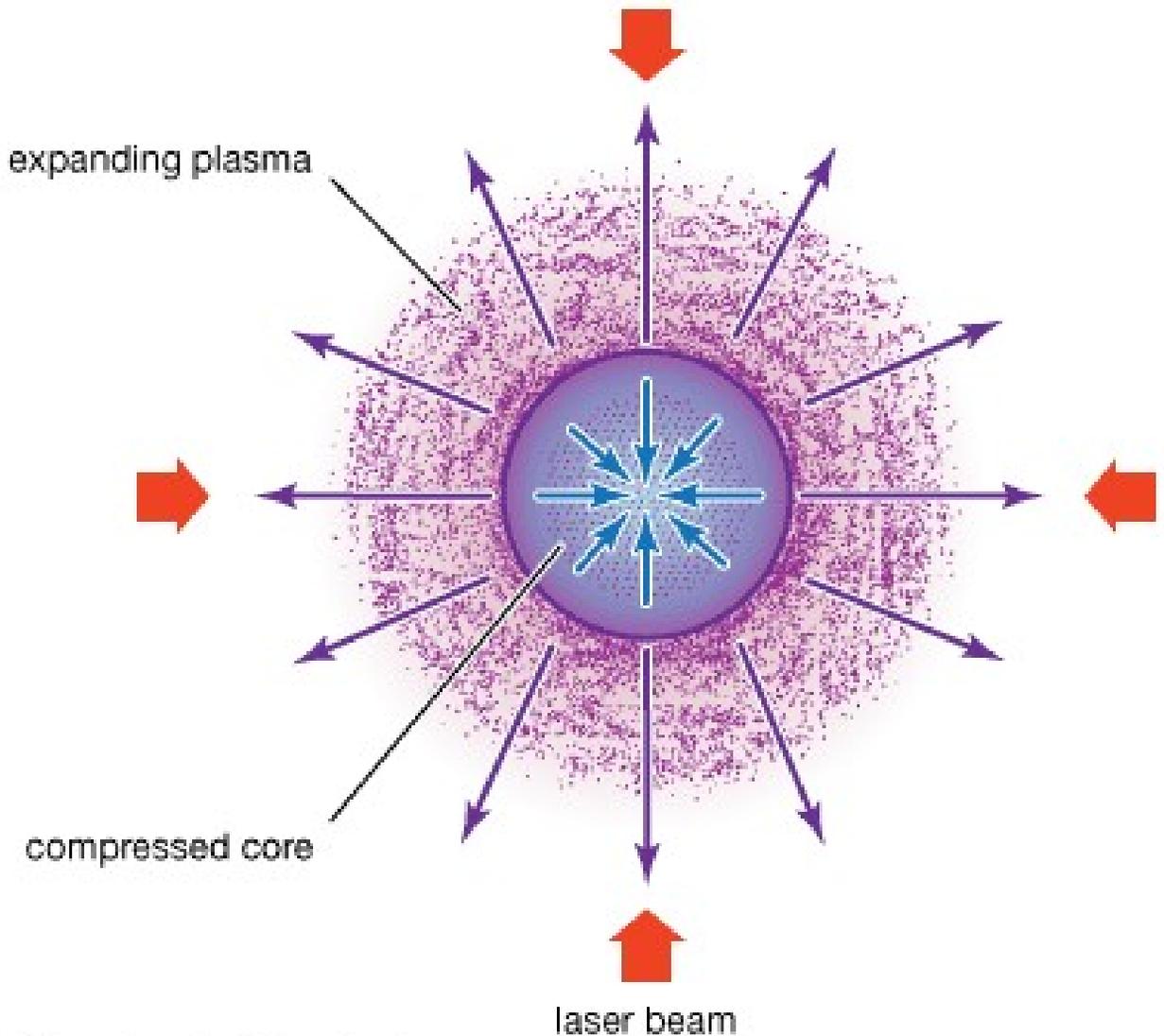
# Stellarator, Greifswald



**... könnte im Dauerbetrieb laufen**

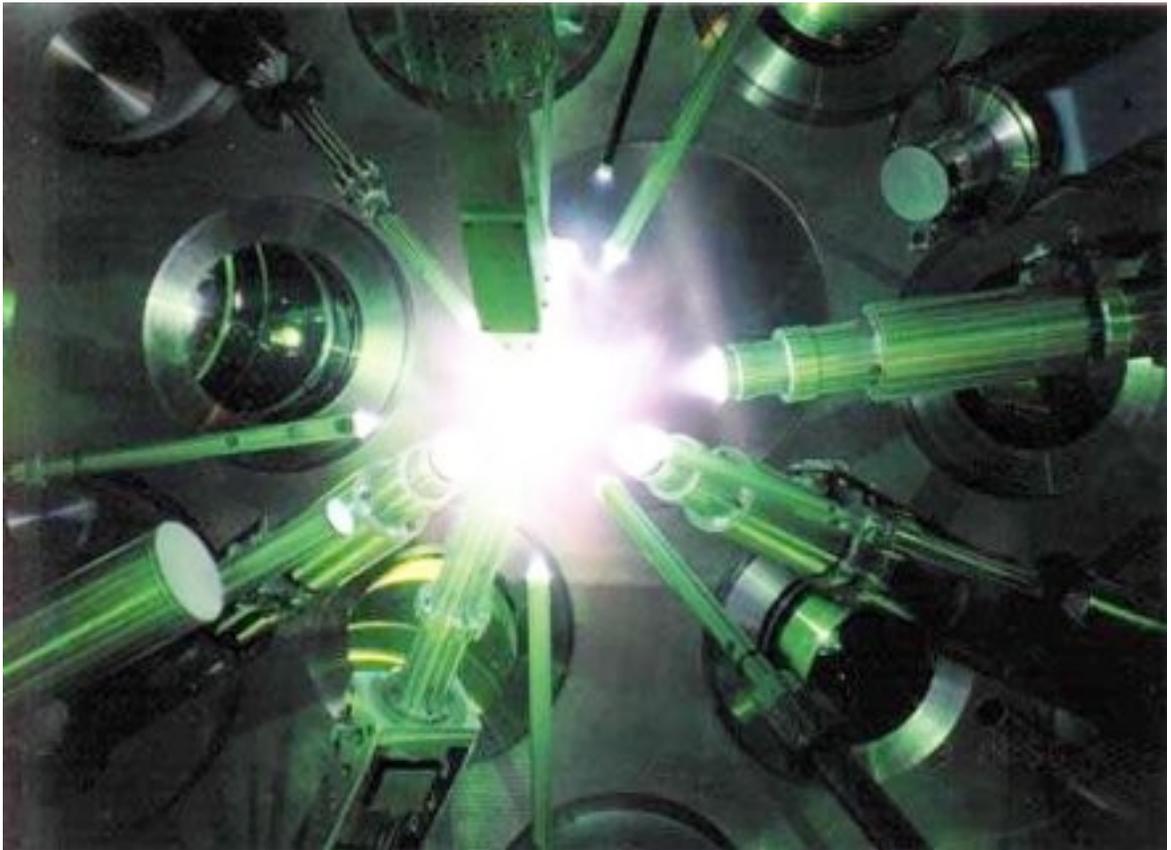
# Fusion durch Trägheitseinschluss

## Laser fusion



© 2009 Encyclopædia Britannica, Inc.

# Fusion mit Peta-Watt Lasern



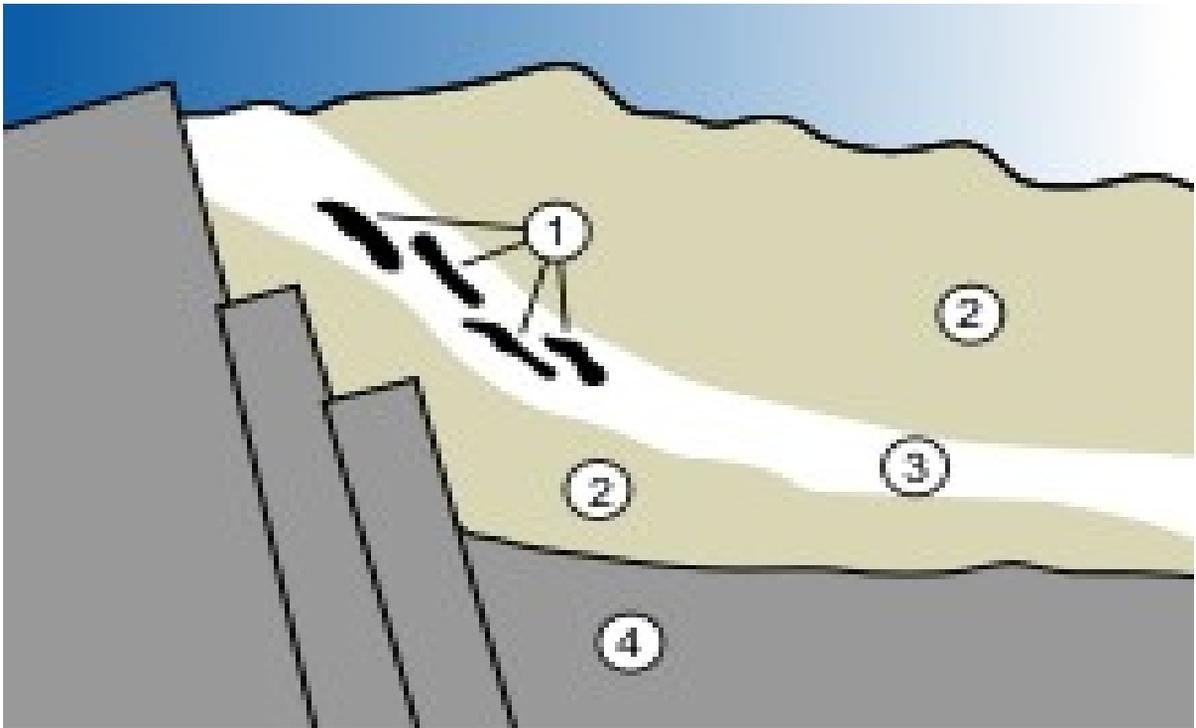
**NIF:National Ignition Facility**

# Einige Laser-Batterien der NIF



**Die Natur zeigt, wie man einen  
sicheren Reaktor und ein sicheres  
Endlager bauen kann.**

**Gabun, Zentralafrika**



**Uranerz**

# **Eigenschaften Oklo**

**Laufzeit: einige Millionen Jahre**

**Leistung: 100 kW**

**Moderation: Regenwasser,  
moduliert durch Regen- und  
Trockenzeiten**

**Migration der Spaltprodukte:  
einige Meter im Gestein**

**Verseuchung des Grundwassers:  
keine**

**Sicherheit der Lagerung:  
mehr als einige Millionen Jahre**

# **Strahlenunfälle**

**Kyschtym 1957; Majak  
Kontaminationsunfall**

**Three Mile Island 1979**

**Tschernobyl 1986**

**Tokaimura 1999**

**Fukushima 2011**

# Majak

Die dortige Wiederaufarbeitungsanlage lagerte ihre Abfallprodukte in großen Tanks. Durch den radioaktiven Zerfall der Stoffe entsteht Wärme, weswegen diese Tanks ständig gekühlt werden müssen. Nachdem im Laufe des Jahres 1956 die Kühlleitungen eines dieser jeweils 250 m<sup>3</sup> fassenden Tanks undicht geworden waren, und deshalb die Kühlung abgestellt wurde, begannen die Inhalte dieses Tanks zu trocknen. Ausgelöst durch einen Funken eines internen Messgerätes explodierten die enthaltenen Nitratsalze und setzten große Mengen an radioaktiven Stoffen frei.

**Da die kontaminierte Wolke bodennah blieb, entsprach die Belastung der Gegend um das russische Kyschtym nahezu der doppelten Menge des Tschernobyl-Unfalls.**

**Da die Kontamination sich auf den Ural beschränkte, schlugen Messgeräte in Europa keinen Alarm, wodurch der Unfall vor der Weltöffentlichkeit 30 Jahre lang geheim gehalten werden konnte**

**Seit 1948 wurden von Majak Sr-90 und Cs-137 mit einer Aktivität von insgesamt 8,9 Exa-Becquerel ( $8,9 \cdot 10^{18}$  Bq) in die Umwelt abgegeben. Ebenso wurde Pu-239 freigesetzt.**

**Etwa 500 000 Personen wurden erhöhten Strahlenbelastungen ausgesetzt.**

**Die Anlage wird auch noch heute genutzt.**

# Majak



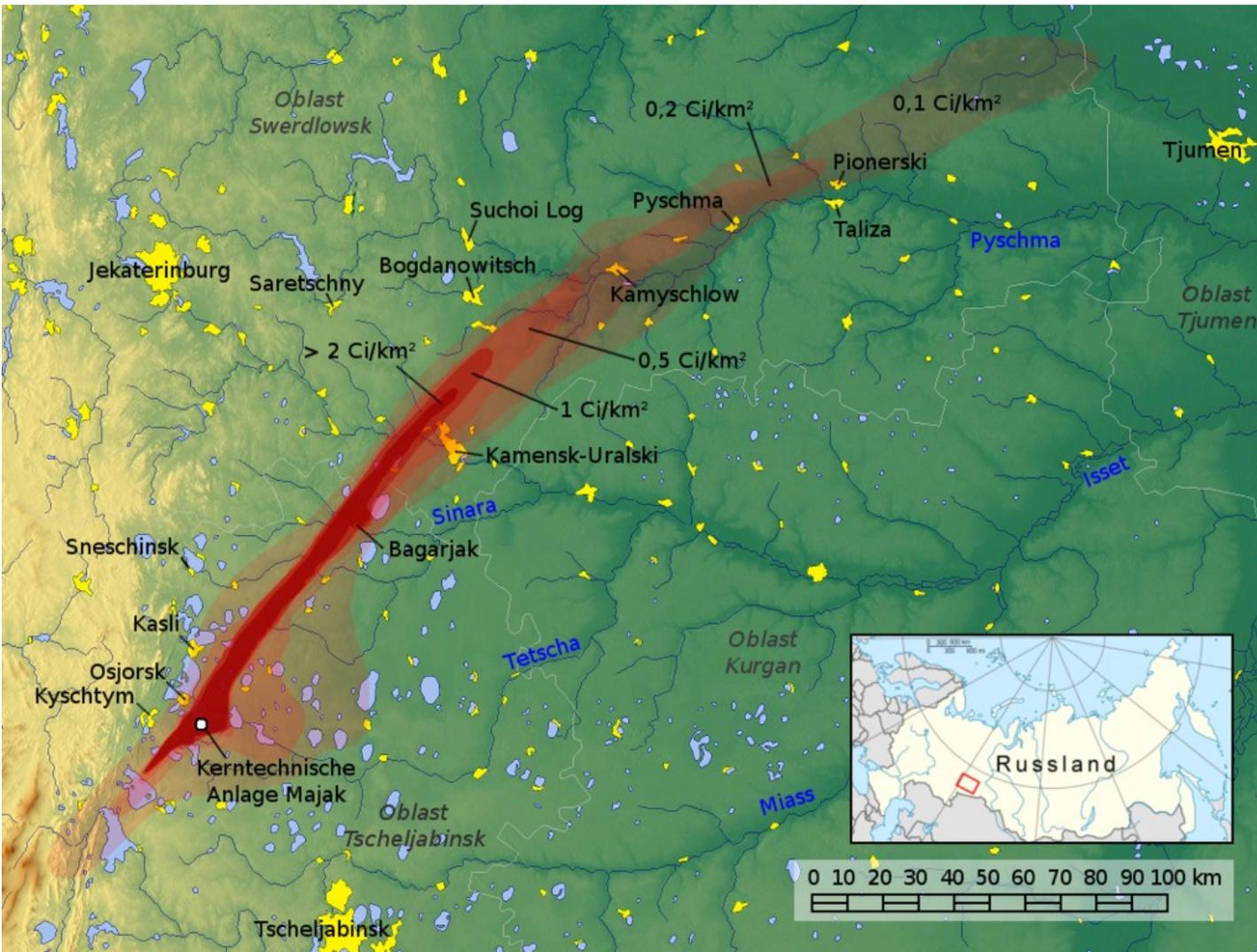
# Majak

Durch die hohe Konzentration der Radioaktivität, aber auch durch mangelnde Aufklärung, die nicht flächendeckende Evakuierung der Gegend und unzureichende Entseuchung entstand ein hohes Maß an Schäden und insbesondere Folgeschäden in der betroffenen Region. Eine genaue Opferzahl kann kaum angegeben werden.



Zum Gedenken an  
die Liquidatoren  
Kyschtym 1957

# Bodenkontamination Majak



# Three Mile Island 1979

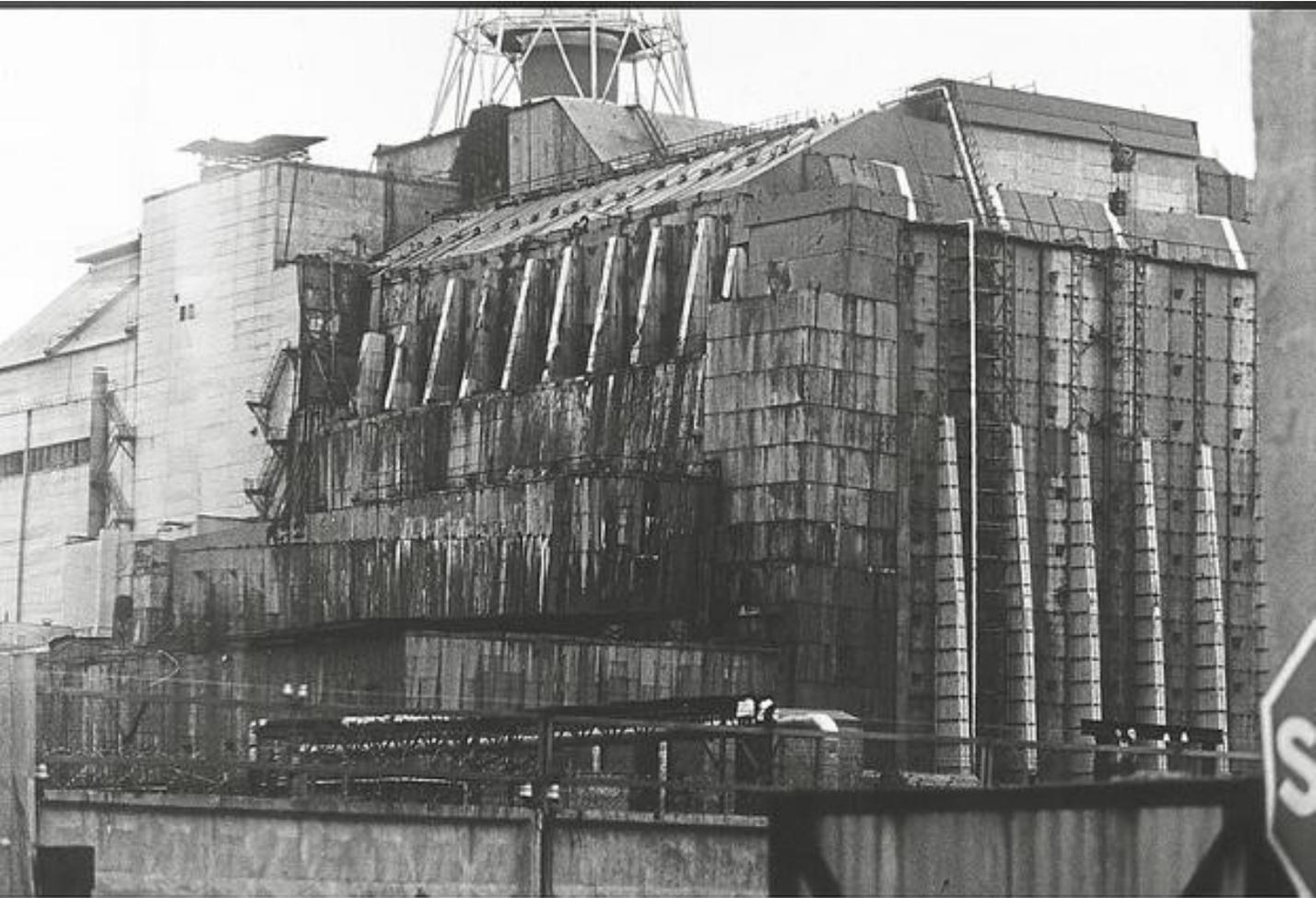
**Im Kernkraftwerk Three Mile Island bei Harrisburg, USA führten Versagen von Maschinenteilen und Messsignalen sowie Bedienungsfehlern der Mannschaft zum Ausfall der Reaktorkühlung, wodurch es zur partiellen Kernschmelze (50 % des Kerns) und Freisetzung von 90 TBq an radioaktiven Gasen kam. Dieser Unfall ist bis heute der schwerste in einem kommerziellen Reaktor in den USA.**

# Three Mile Island (Druckwasserreaktor)

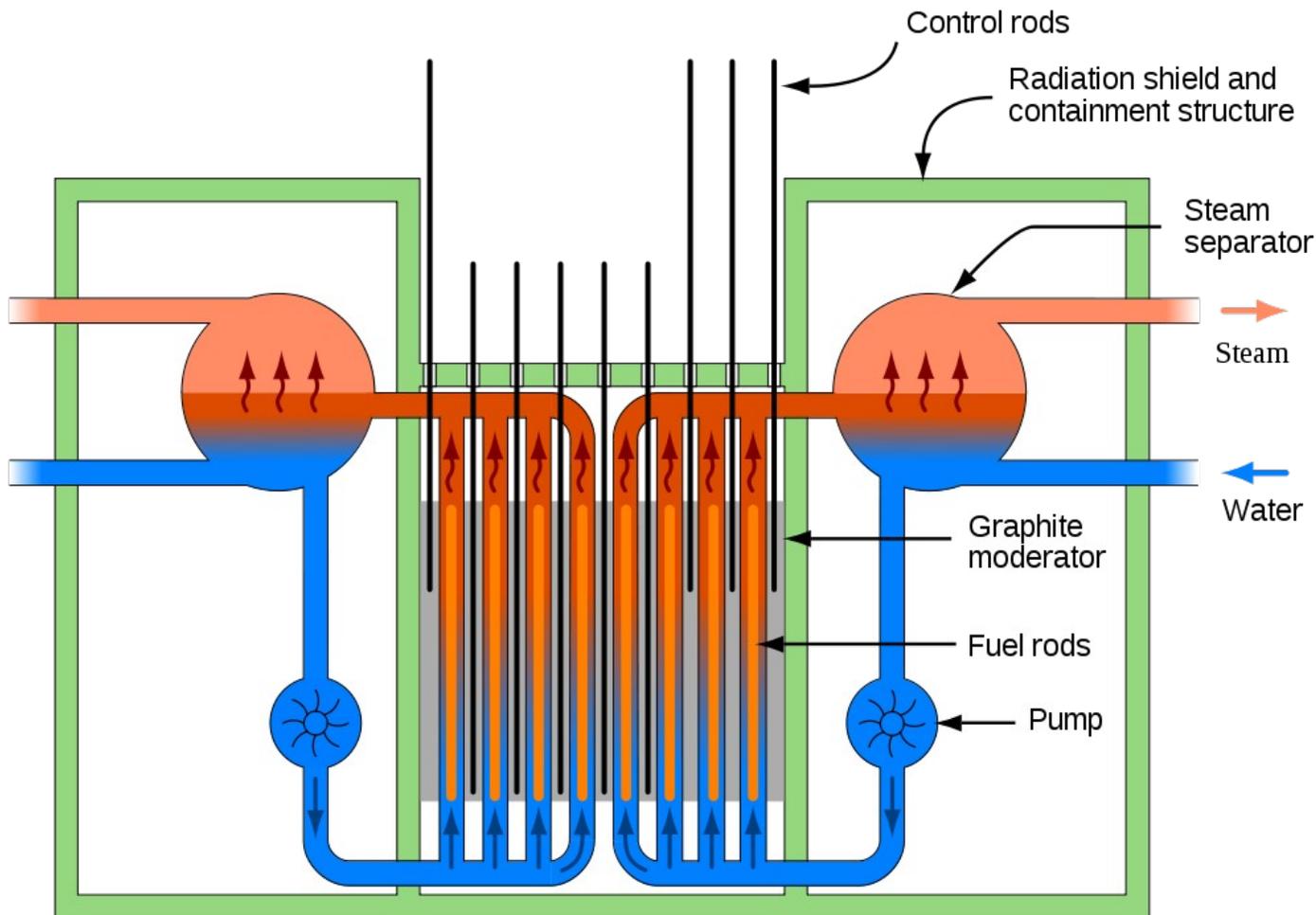




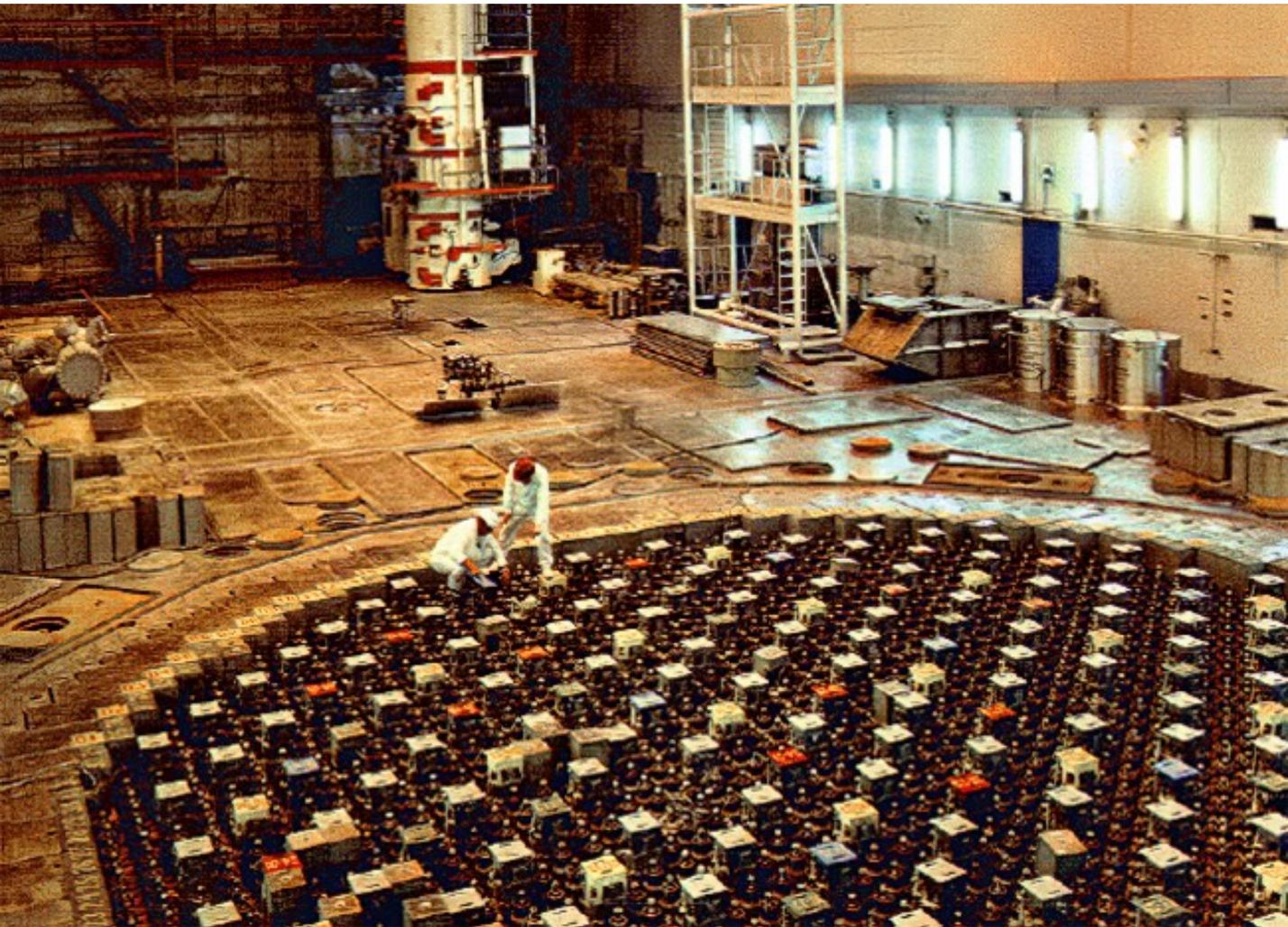
# Tschernobyl 1986 (graphit-moderierter Siedewasserreaktor)



# Vereinfachter Aufbau des Tschernobyl- Reaktors



# Reaktorbehälter Tschernobyl



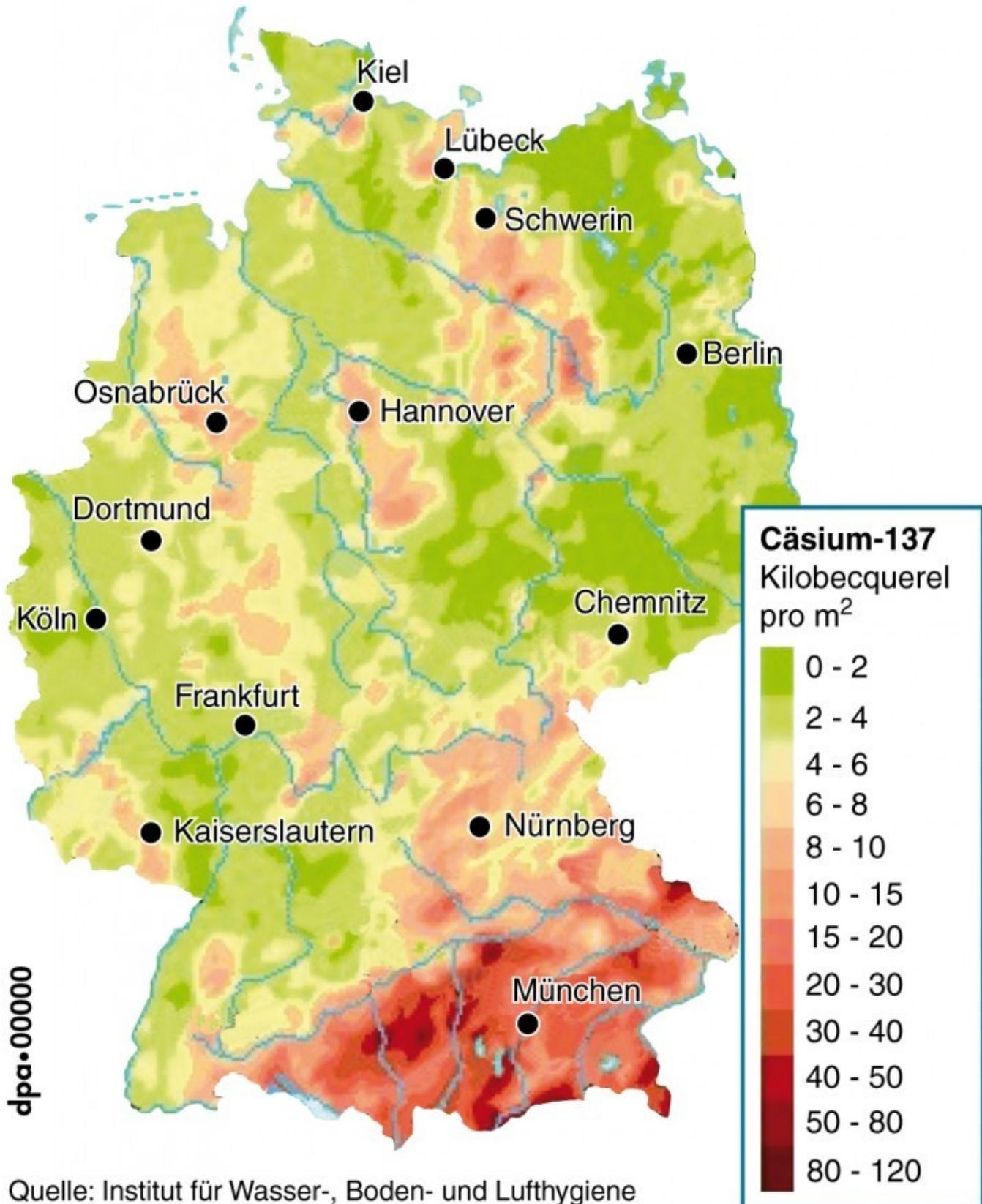
# Freisetzungsgrade

Die wichtigsten freigesetzten Radionuklide<sup>[16]</sup>

Radionuklid $\blacklozenge$	Halbwertszeit <sup>[17]</sup> $\blacklozenge$	Aktivität in $10^{15}$ Bq $\blacklozenge$	Masse g $\blacklozenge$
$^{85}\text{Kr}$	10,8 a	33	2290
$^{133}\text{Xe}$	5,25 d	6500	939
$^{129\text{m}}\text{Te}$	33,6 d	240	215
$^{132}\text{Te}$	3,2 d	$\approx 1150$	100
$^{131}\text{I}$	8,02 d	$\approx 1760$	382
$^{133}\text{I}$	20,8 h	910	21
$^{134}\text{Cs}$	2,06 a	$\approx 47$	980
$^{136}\text{Cs}$	13,2 d	36	13
$^{137}\text{Cs}$	30,2 a	$\approx 85$	26587
$^{89}\text{Sr}$	50,5 d	$\approx 115$	106
$^{90}\text{Sr}$	28,8 a	$\approx 10$	1959
$^{103}\text{Ru}$	39,3 d	$>168$	140
$^{106}\text{Ru}$	374 d	$>73$	599
$^{140}\text{Ba}$	12,8 d	240	89
$^{95}\text{Zr}$	64,0 d	84	105
$^{99}\text{Mo}$	2,74 d	$>72$	4
$^{141}\text{Ce}$	32,5 d	84	79
$^{144}\text{Ce}$	285 d	$\approx 84$	713
$^{239}\text{Np}$	2,36 d	400	46
$^{238}\text{Pu}$	87,7 a	0,015	23
$^{239}\text{Pu}$	24 100 a	0,013	5661
$^{240}\text{Pu}$	6 560 a	0,018	2142
$^{241}\text{Pu}$	14,4 a	$\approx 2,6$	682
$^{242}\text{Pu}$	375 000 a	0,00004	274
$^{242}\text{Cm}$	163 d	$\approx 0,4$	3

# Radioaktivität im Boden 1986

Bodenkontamination mit radioaktivem Cäsium-137 nach der Tschernobyl-Reaktorkatastrophe



Quelle: Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene

# Folgen Tschernobyl

Todesopfer:

Offizielle russische Angaben:

31 unter den Liquidatoren

Atomenergiekommission: 4000

Krebsraten:

Anstieg beim Schilddrüsenkrebs

Kein Anstieg bei Leukämiefällen

Auffällige Missbildungen



# Tschernobyl- Sarkophag



# Sarkophag



# Messung vor Ort am ENC



# Fukushima 2011 (Siedewasserreaktor)

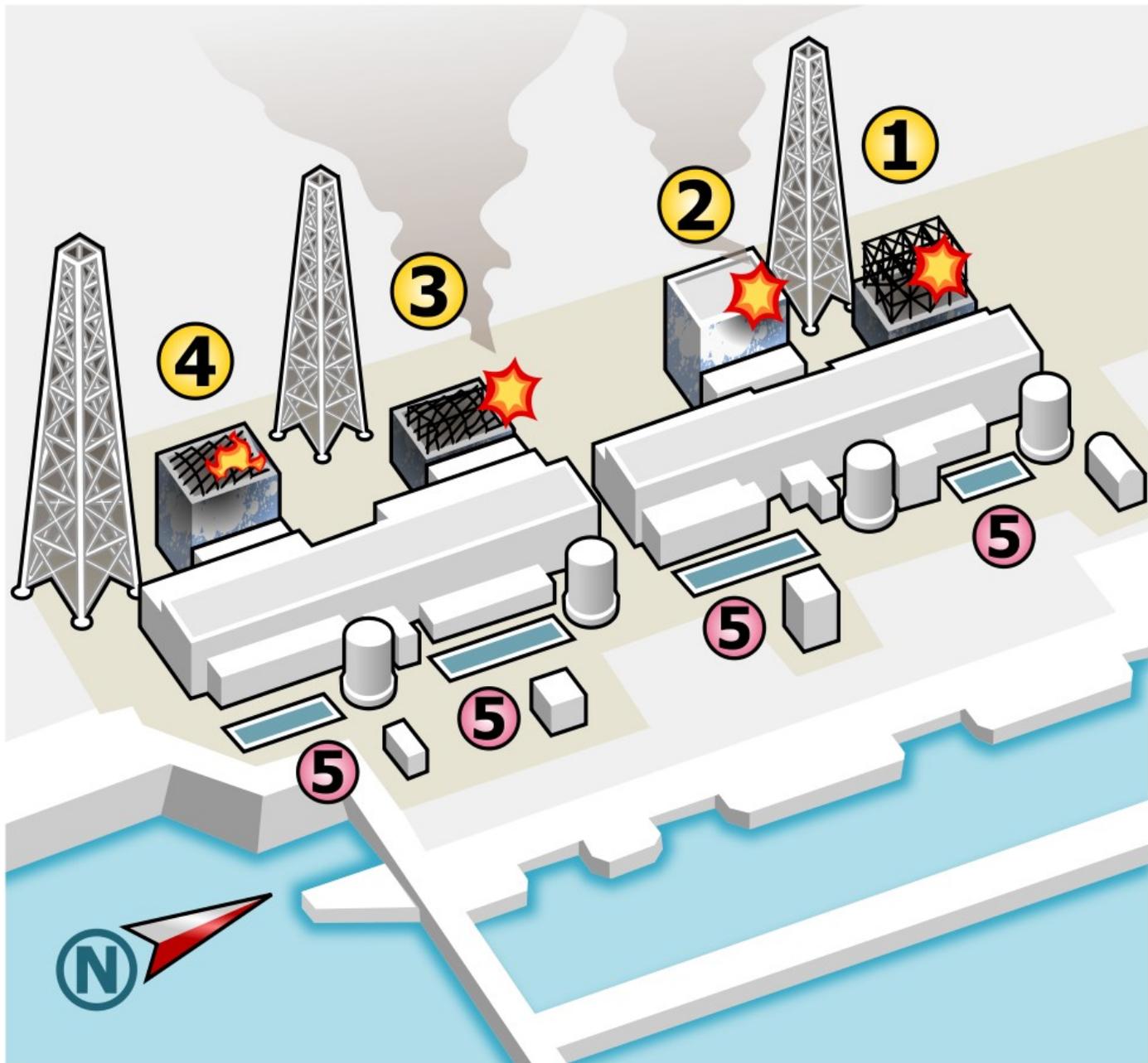


# Tsunami 14 m hoch



Aufnahme weiter nördlich von  
Fukushima (mit geringerer Höhe)

# Prinzipieller Aufbau



Kernschmelze in den Blöcken 1, 2, 3

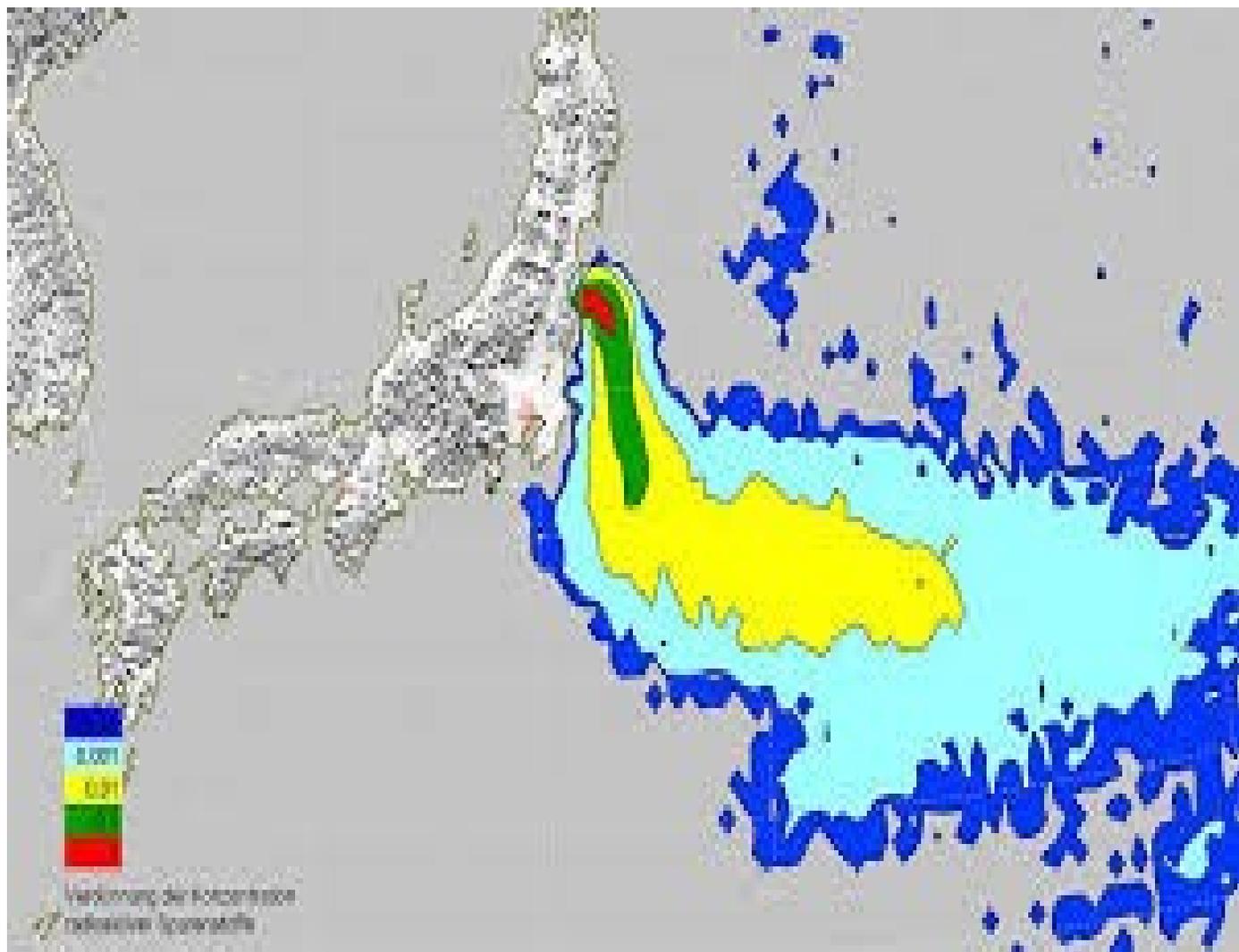
# Fukushima



# Löscharbeiten nach Ausfall der Kühlung

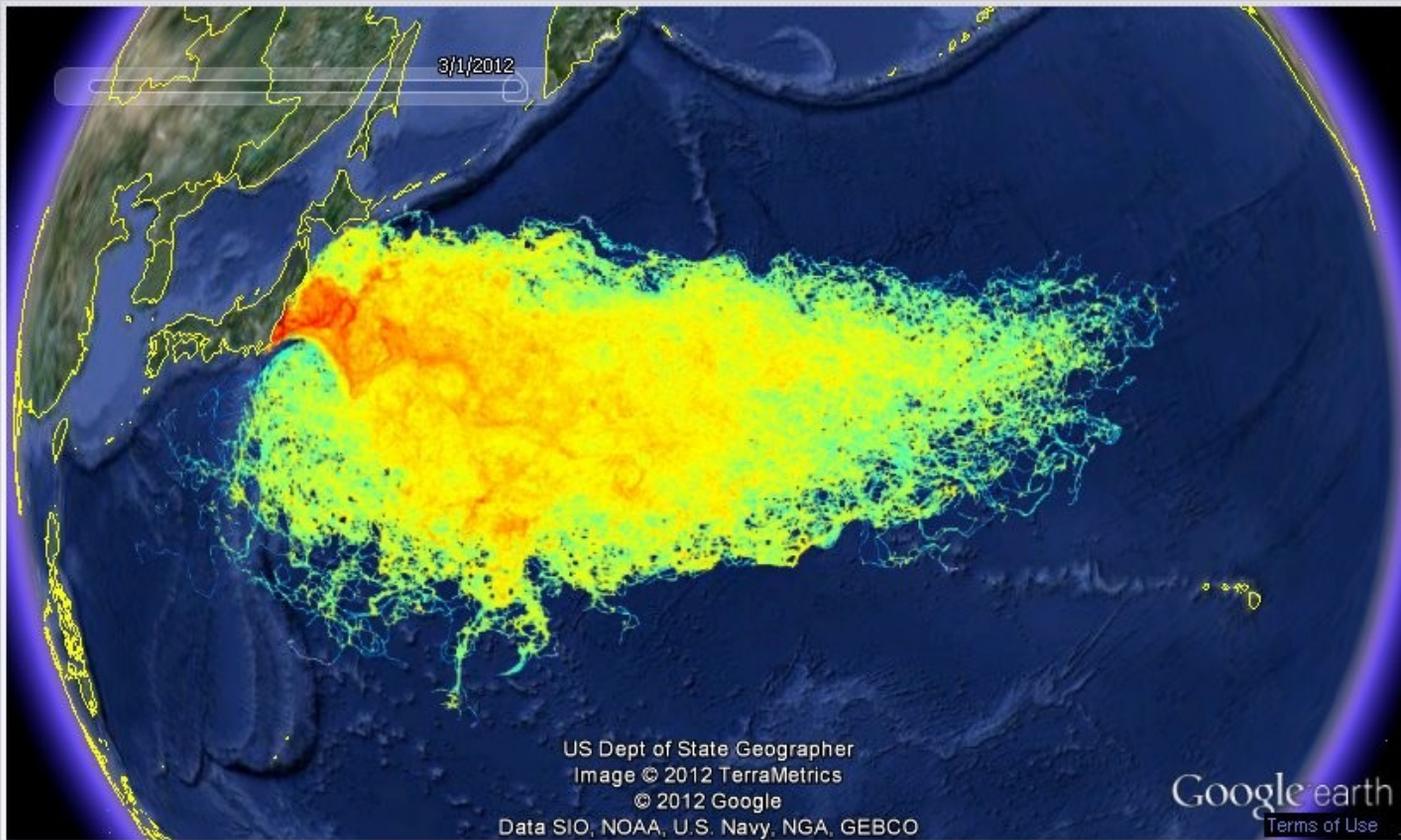


# Ausbreitung der Radioaktivität



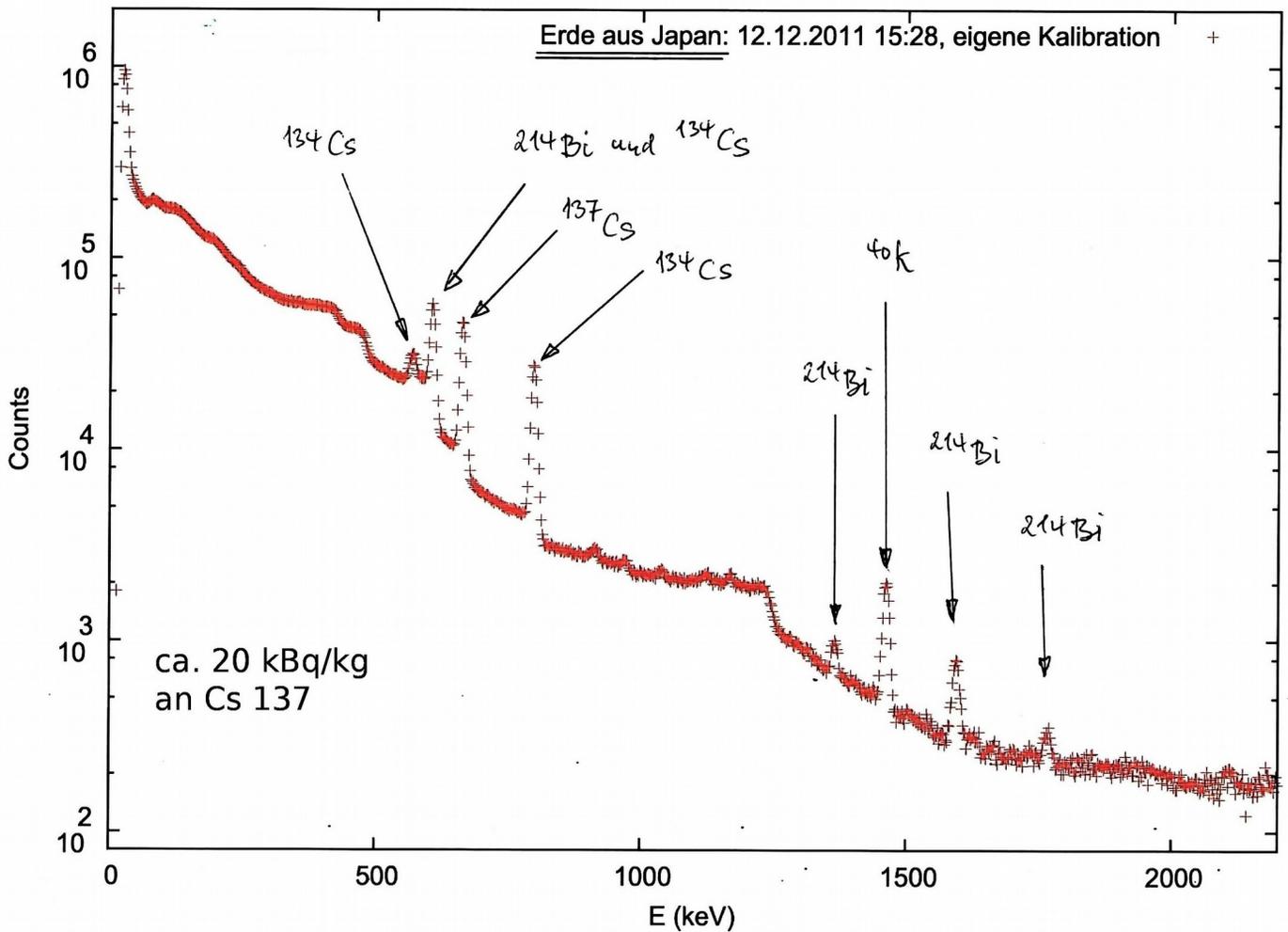
# Fukushima: Kontamination des Seewassers

Radioactive Seawater Impact Map (update: March 2012)



# Fukushima 2011

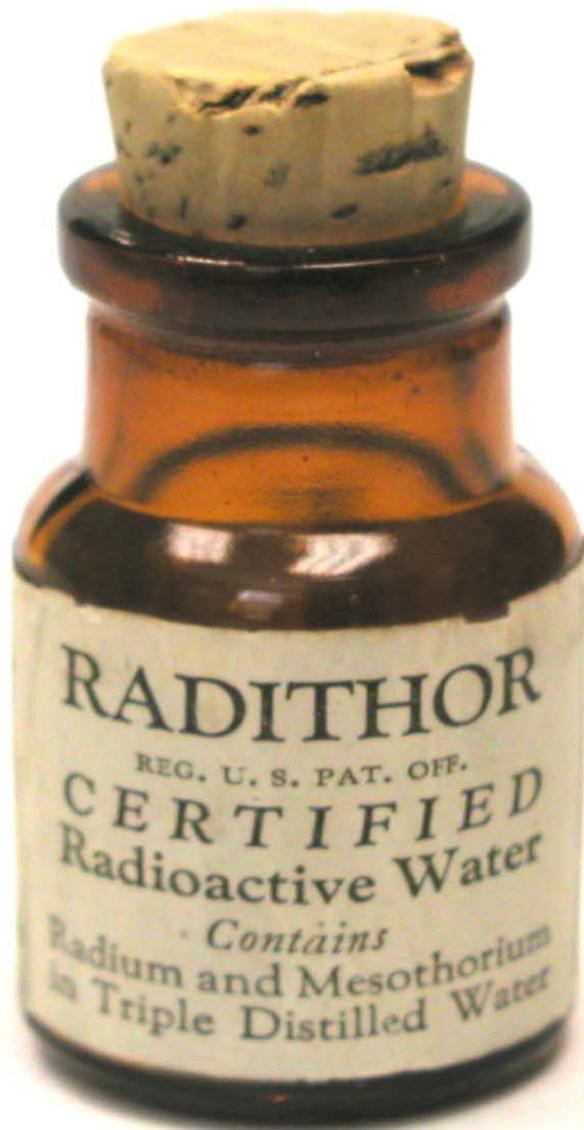
## Gammaskpektrum einer Bodenprobe



# Unsinnige Strahlenbelastungen

- Schuhdurchleuchtungen
- Radioaktives Haarwasser  
Radium Lotion „Rezall“  
Die wundervollste Entdeckung des Jahrhunderts  
Für die Konservierung des Haares  
„Kein Haarausfall mehr, keine Kahlköpfigkeit,  
keine grauen Haare mehr!“
- Radioaktive Zahnpasta DORAMAD  
„Die Strahlen dieser Zahncreme massieren das  
Zahnfleisch und erfrischen die gesamte  
Mundhöhle.“
- Kontrastmittel „Thorotrast“  
Darstellung der Gefäße und Verdauungsorgane  
⇒ Lebertumore
- Radium-Trinkkuren
- Radon-Inhalationen

**... soll gegen Rheuma,  
Kopfschmerzen, Neuralgien  
und Verstopfung helfen**



... radioaktive Zahnpasta, sorgt für vorzeitigen Zahnausfall



Viagra vor hundert Jahren

## VITA RADIUM SUPPOSITORIES

FOR RESTORING SEX POWER



Actual Size  
of Vita Radium

VITA RADIUM SUPPOSITORIES, for rectal use by men, are tone restorers of sex and energizers for the entire nervous, glandular and circulatory systems. These Suppositories contain a result-producing amount of highly refined soluble RADIUM, carried in a cocoa butter base. The radium is absorbed thru the walls of the lower colon, enters the blood stream and is carried to all parts of the body—to the weakened organs that need its vitalizing aid. After leaving its durably HEALTHY RESULTS, the radium is gradually eliminated in about three days. Vita Radium Suppositories are guaranteed entirely harmless. Recommended for sexually weak men who, however, should use the NU-MAN Tablets in connection for best results. Also splendid for piles and rectal sores. Try them and see what good results you get!

# 5 Doramad-Zahnpfleger stellen sich vor



Ich bin die radioaktive Substanz.  
Meine Strahlen massieren das  
Zahnfleisch. Gesundes Zahn-  
fleisch - gesunde Zähne.



Ich bin die medizinische Seife -  
mein Schaum reinigt die ganze  
Mundhöhle bis in alle Winkel.



Ich - der Emulgator - Sorge  
dafür, daß „DORAMAD“  
immer sahnig und frisch bleibt!



Ich bin das Aroma - durch mich  
erfrischt „DORAMAD“ köstlich  
die gesamte Mundhöhle!



Ich - der ganz feine Putzkörper  
- mache die Zähne blendend  
weiß, schone den Schmelz!

*Das ist die radioaktive biologisch wirksame  
Zahncreme*



KLEINE TUBE 45,-  
GROSSE TUBE 75,-

EIN ERZEUGNIS DER  
AUERGESSELLSCHAFT · A · G · BERLIN · N · 65

**Rexall**

**"93" HAIR TONIC**

Two Sizes, 50c. and \$1.00

**Preserves and Promotes Hair Growth**

**Your Money Back if it Doesn't**

Sold and guaranteed by Only One Druggist in a place. Look for *The Jenall Stars*.  
They are in over 2500 towns and cities in the United States.

UNITED DRUG COMPANY, 50 LEON STREET, BOSTON, MASS.

... sorgt für Haarausfall



... hat einen angenehmen  
warmen Nachgeschmack



zum Essen und Trinken  
(NACH Dr. SENFTNER D.R.P.)

Sind Sie gesund, so erhalten Sie  
dadurch Ihr kostbares Gut, sind Sie  
leidend, so erhöhen Sie Ihre Aus-  
sicht, wieder gesund zu werden!

Versuchen Sie auch die übrigen  
Burkbraun-Edelerzeugnisse: Kakao,  
Schokolade, Pralinen, Sie werden  
darin Ihre Marke finden, denn alles,  
was den Namen *Burkbraun* trägt,  
ist einzigartig köstlich!

**BURK & BRAUN**  
KAKAO-U.SCHOKOLADENFABRIK  
C O T T B U S

**Radon-Brunnen:  
Radon wird em  
Trinkwasser  
beigemischt. Wirkt  
erfrischend.**



**10 nCi pro  
Tablette,  
Verdauungs-  
fördernd  
= 40 Bq**

... nicht nur deutsche Firmen  
preisen diese dubiosen Mittel an:



## Wohlfühl-Wasser- Behälter

enthält Thorium-232

“delicious water for  
drinking, cooking  
rice, washing fruits  
and vegetables,  
making ice, mixing  
whiskey and  
preparing tea or  
coffee.”

... darf es auch etwas mehr sein



# ... etwas für die Kleinen



# **Medizinischen Anwendungen**

**Röntgen**

**Autoradiographie**

**Positronen-Emissions-Tomographie  
(PET)**

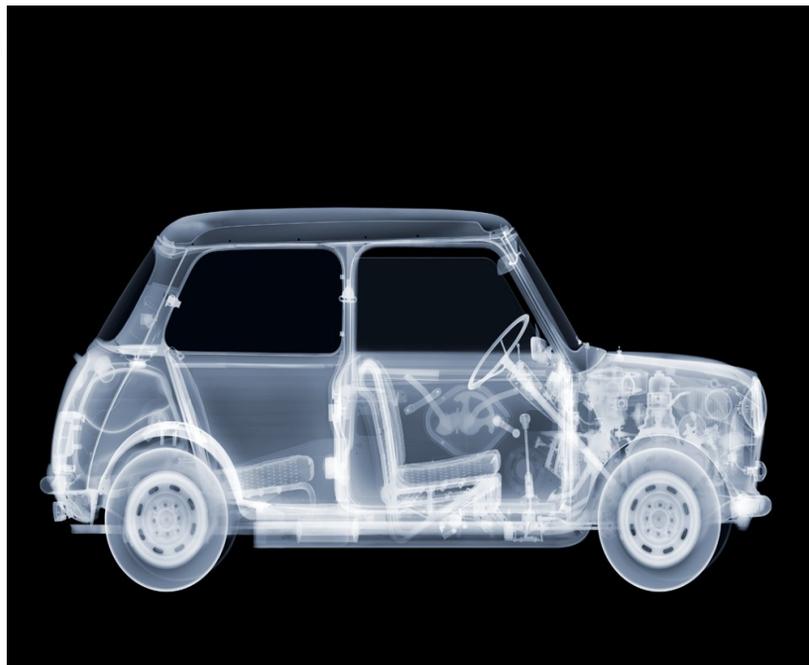
**Zwei-Energie Subtraktionstechnik**

**Mammographie**

**X Ray-Computed-Tomography (CT)**

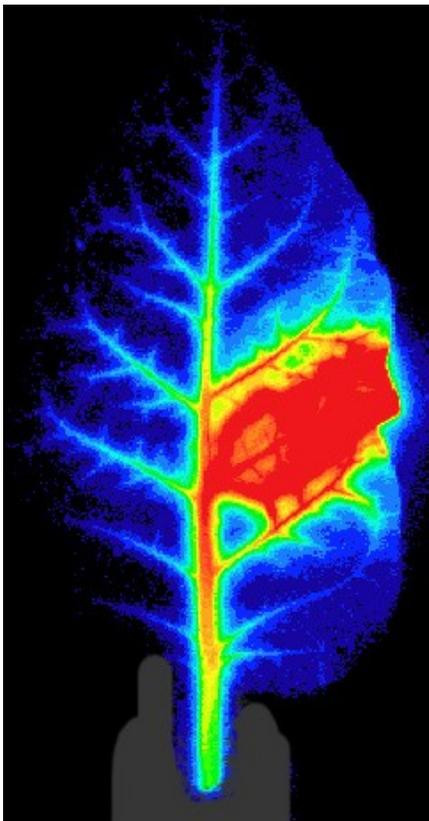
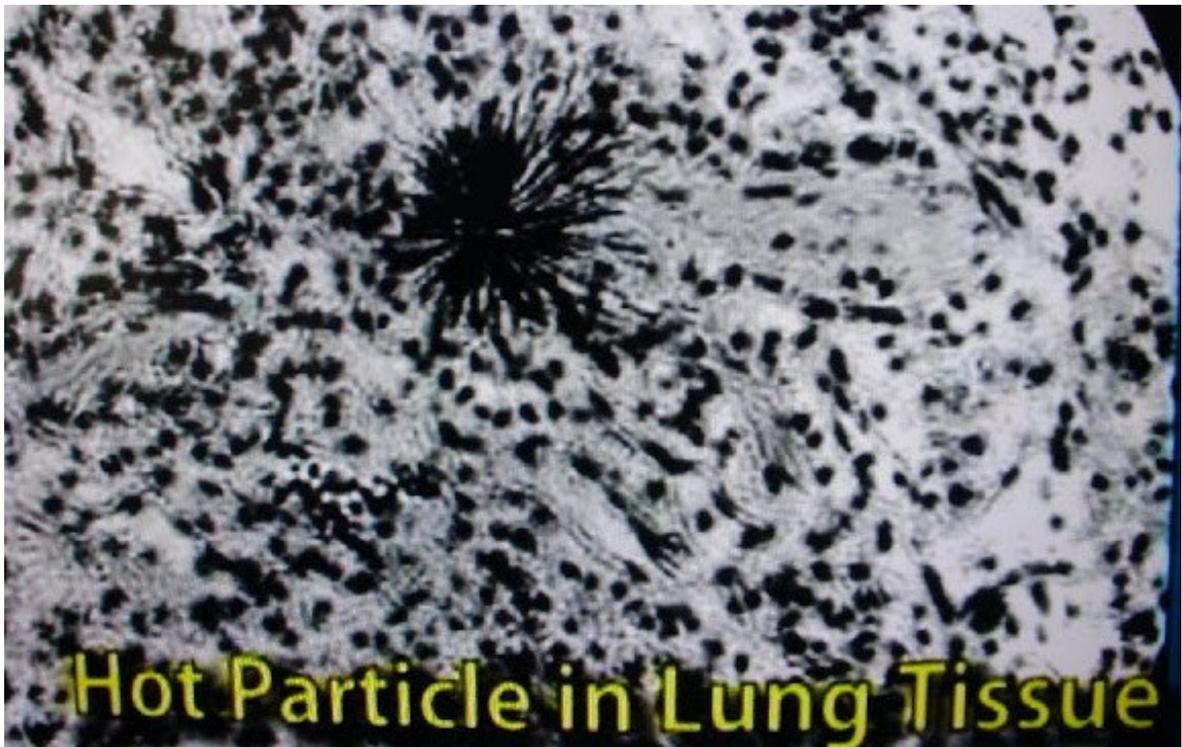
**Single-Photon-Emission-Computed-  
Tomography (SPECT)**

# Röntgen



Armbruch 2015

# Autoradiographie

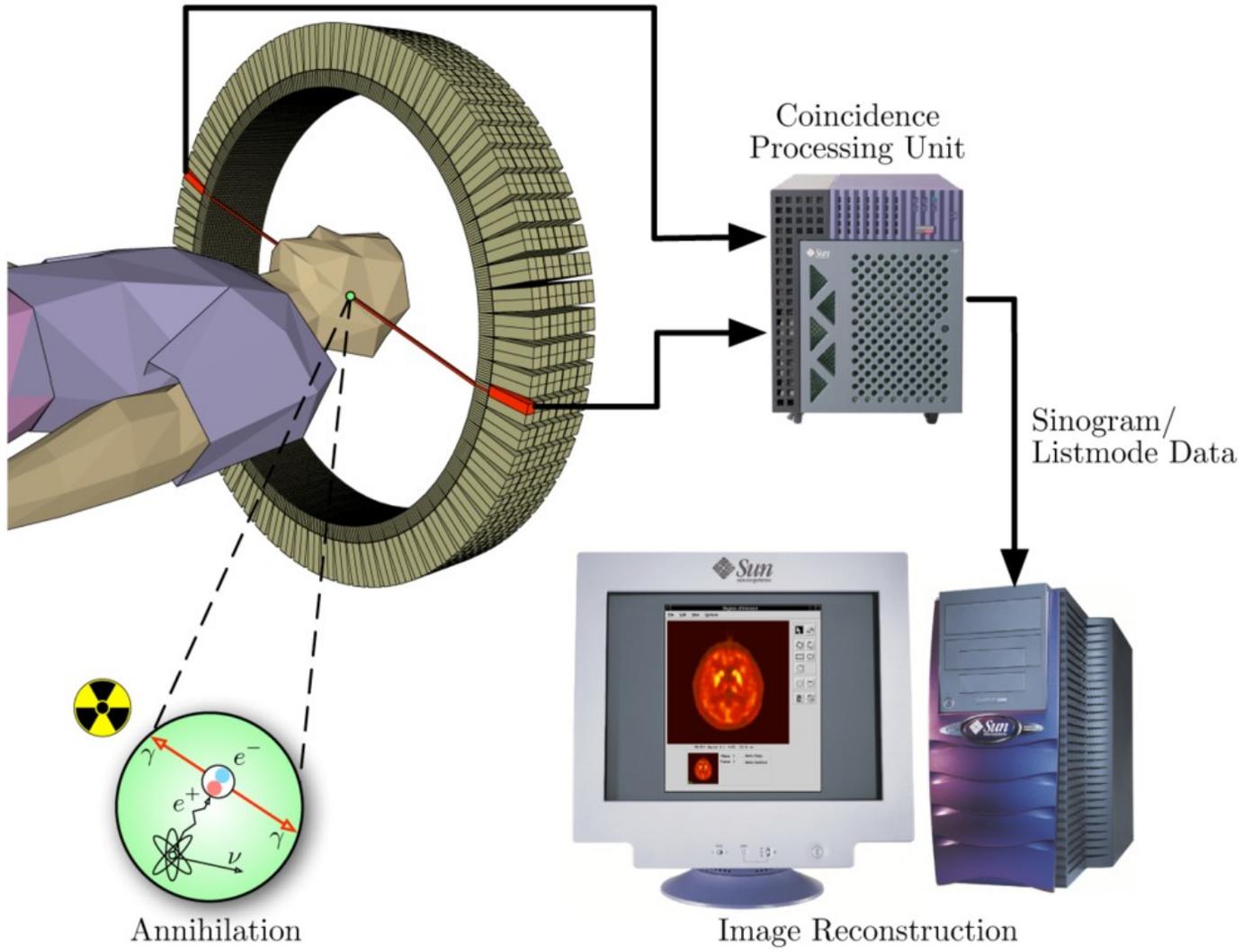


<sup>11</sup>C

2

Mit <sup>11</sup>C markiertes  
Tabakblatt:  
Injektion im rechten  
Blatt. Durch  
Photosynthese bildet  
sich C-11-Glucose,  
die zum Stiel wandert.

# PET



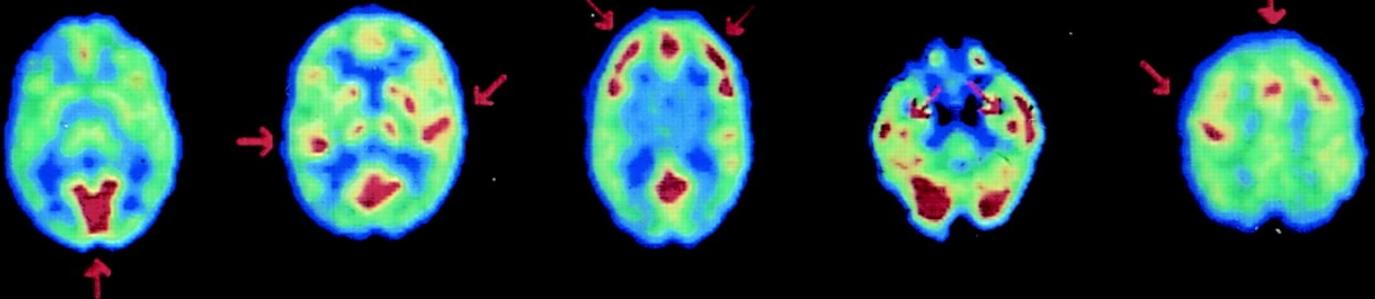
**LOOKING**

**LISTENING**

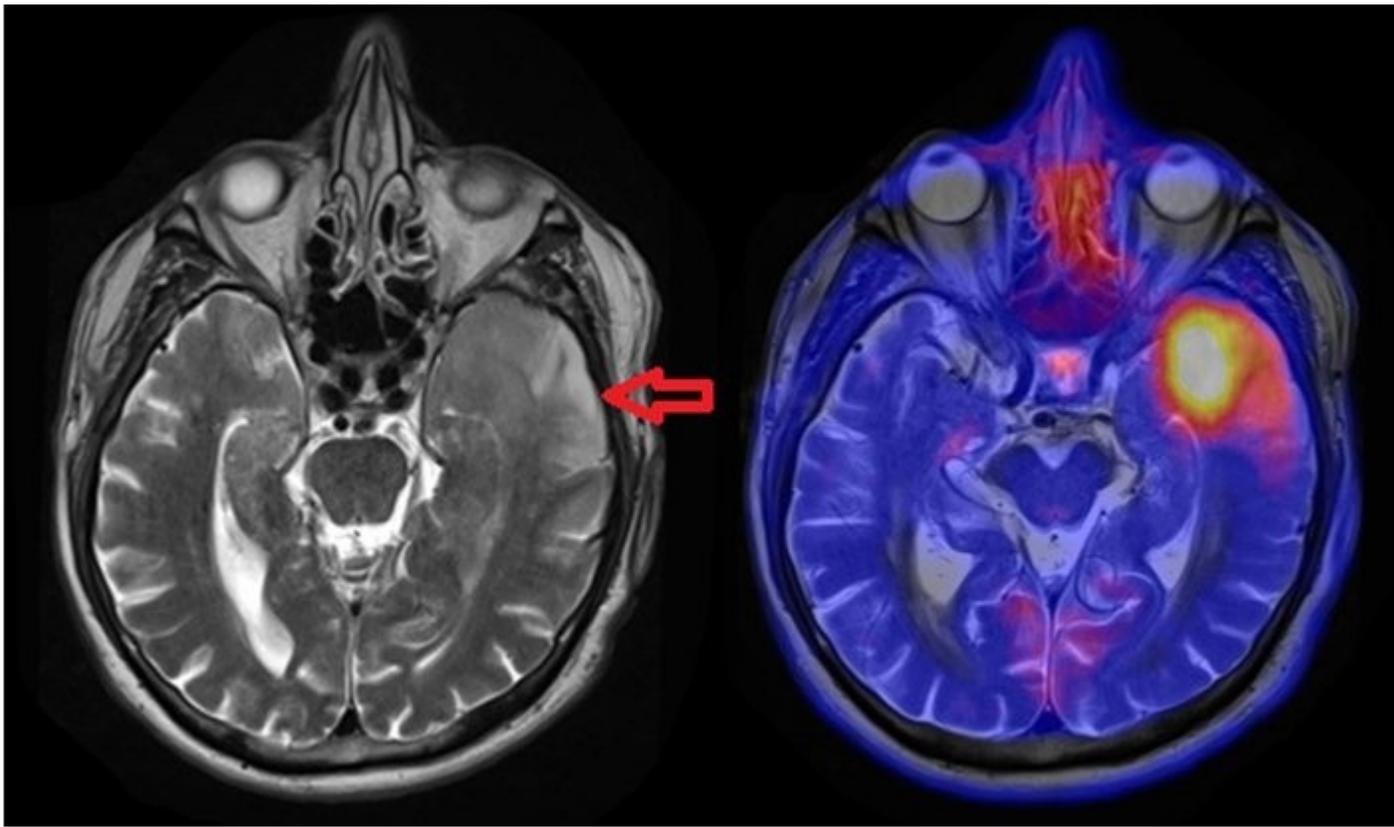
**THINKING**

**REMEMBERING**

**WORKING**

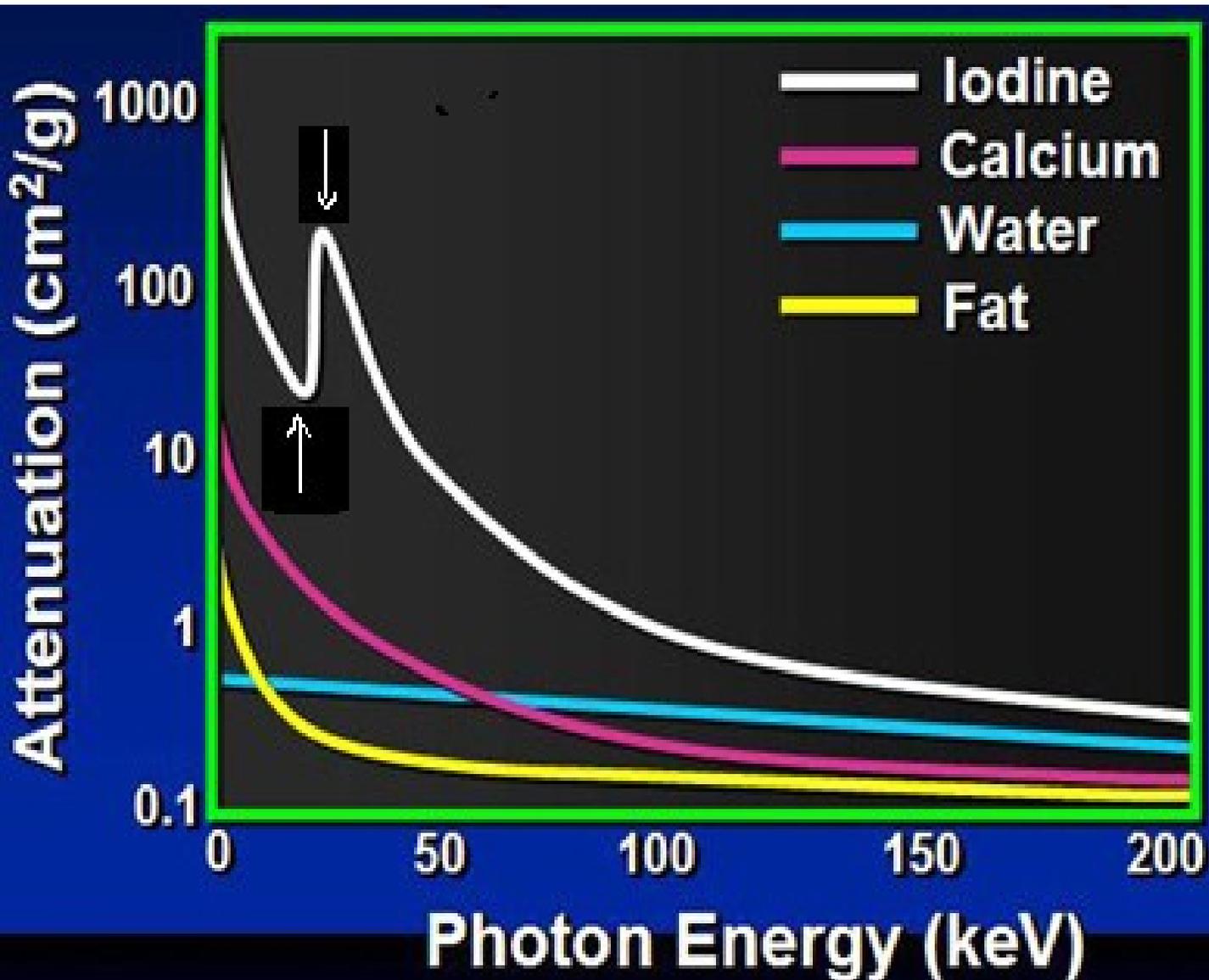


# Vergleich PET - MRT

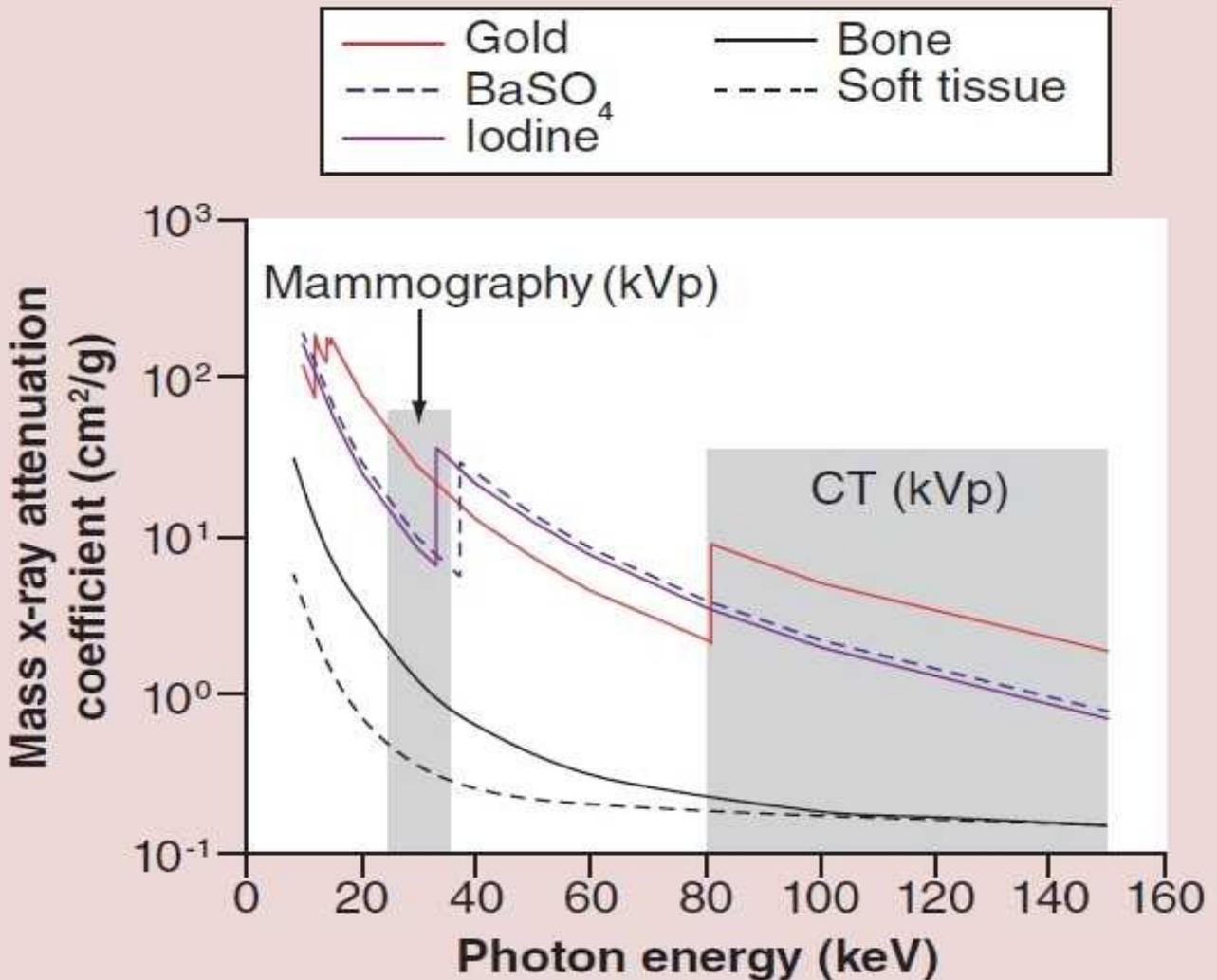


**Der Gehirntumor ist sehr gut im PET (rechts), aber kaum im MRT (links) erkennbar.**

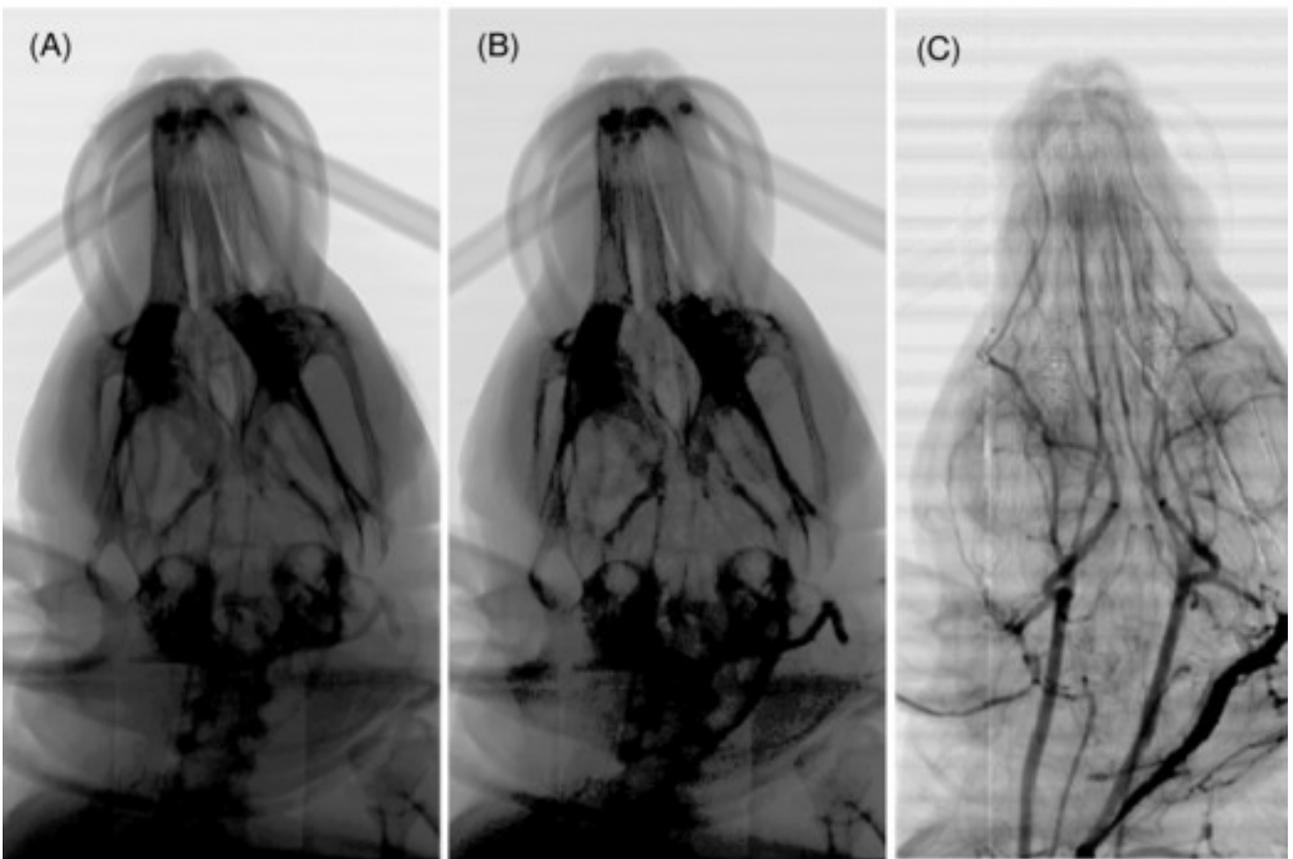
# Duale-Energie Technik (halb-logarithmisch nicht- invasive Koronar- Angiographie)



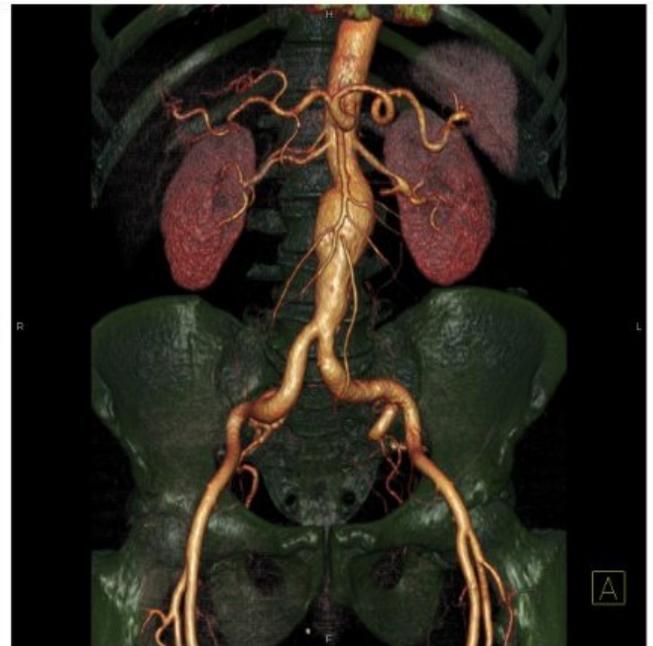
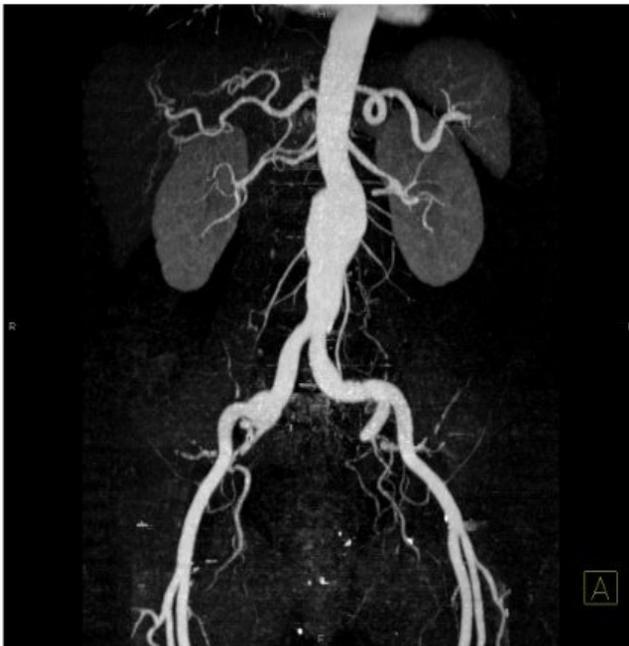
# Subtraktionstechnik



kVp – Peak kV an der Röntgenröhre

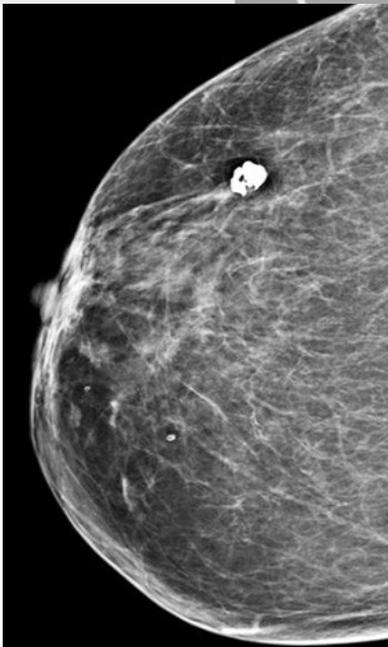
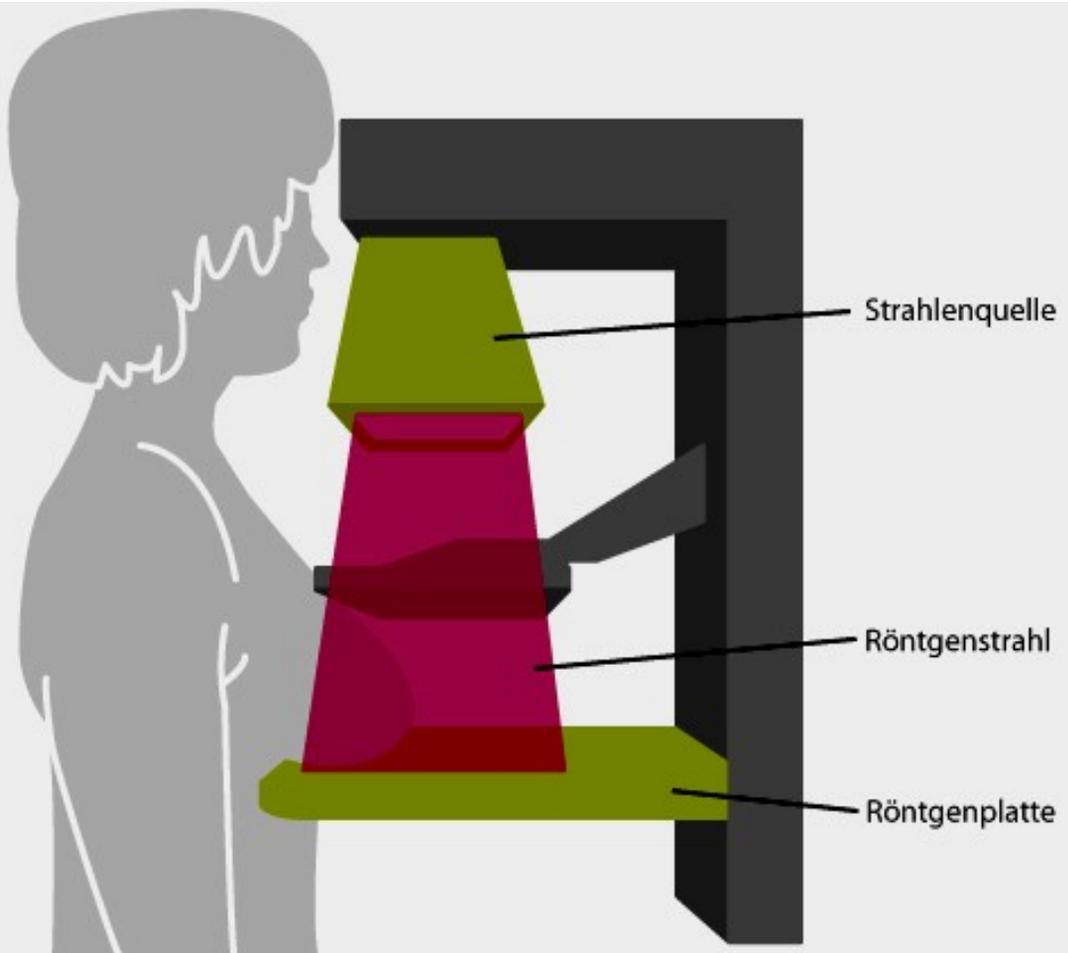


## **unterhalb      oberhalb      Differenz** **Kaninchen: Iod-Subtraktion**



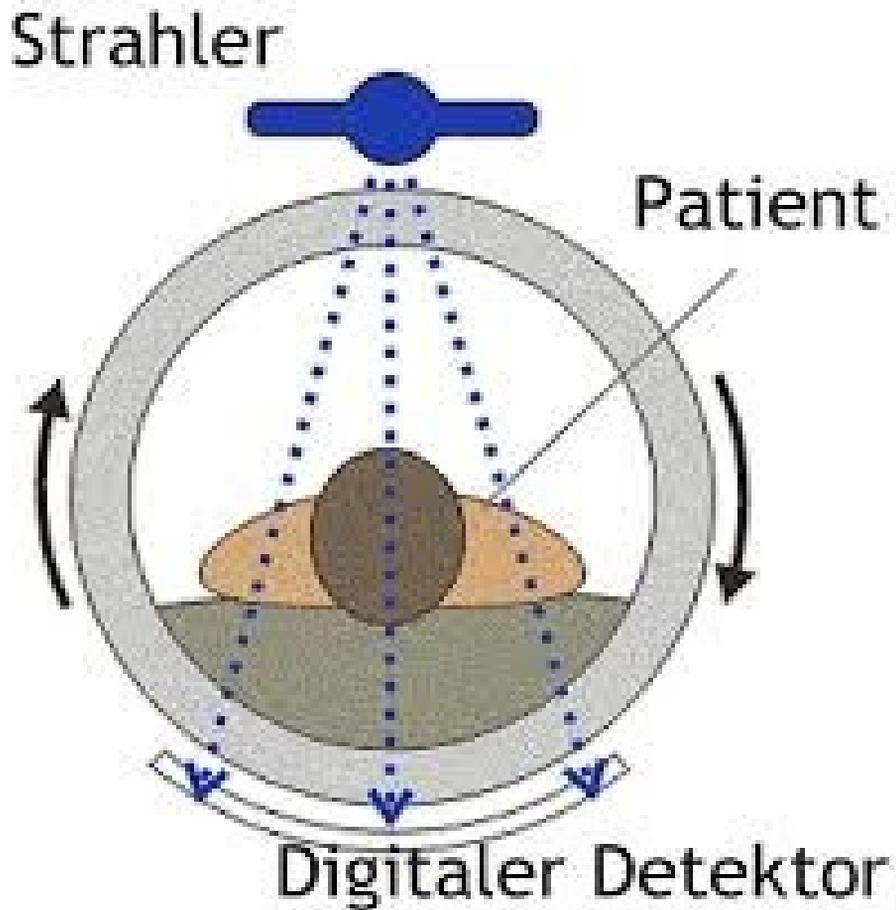
Separation von Iod und Knochen mit Hilfe einer Dual-Energy Akquisition unter Ausnutzung der Energieabhängigkeit der Schwächungskoeffizienten.

# Mammographie

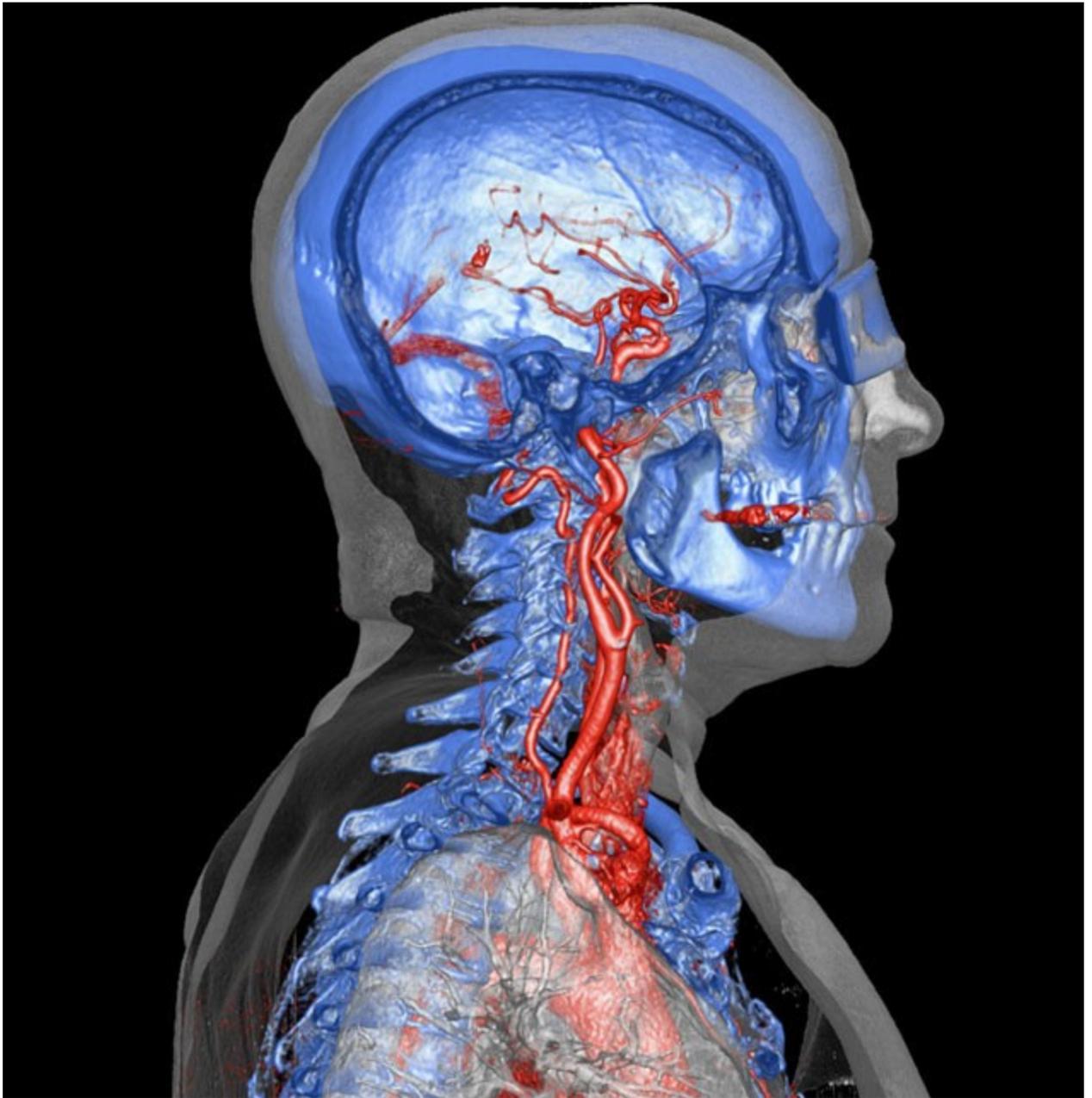


**frühe Entdeckung von  
Mikro-Kalzifikationen**

# Computed Tomographie



Becken,  
Nieren, ...



Darstellung der Blutgefäße im Kopf und  
Brustraum mit 22 ml Kontrastmittel (Iod);  
Aufnahmezeit: 1 Sekunde

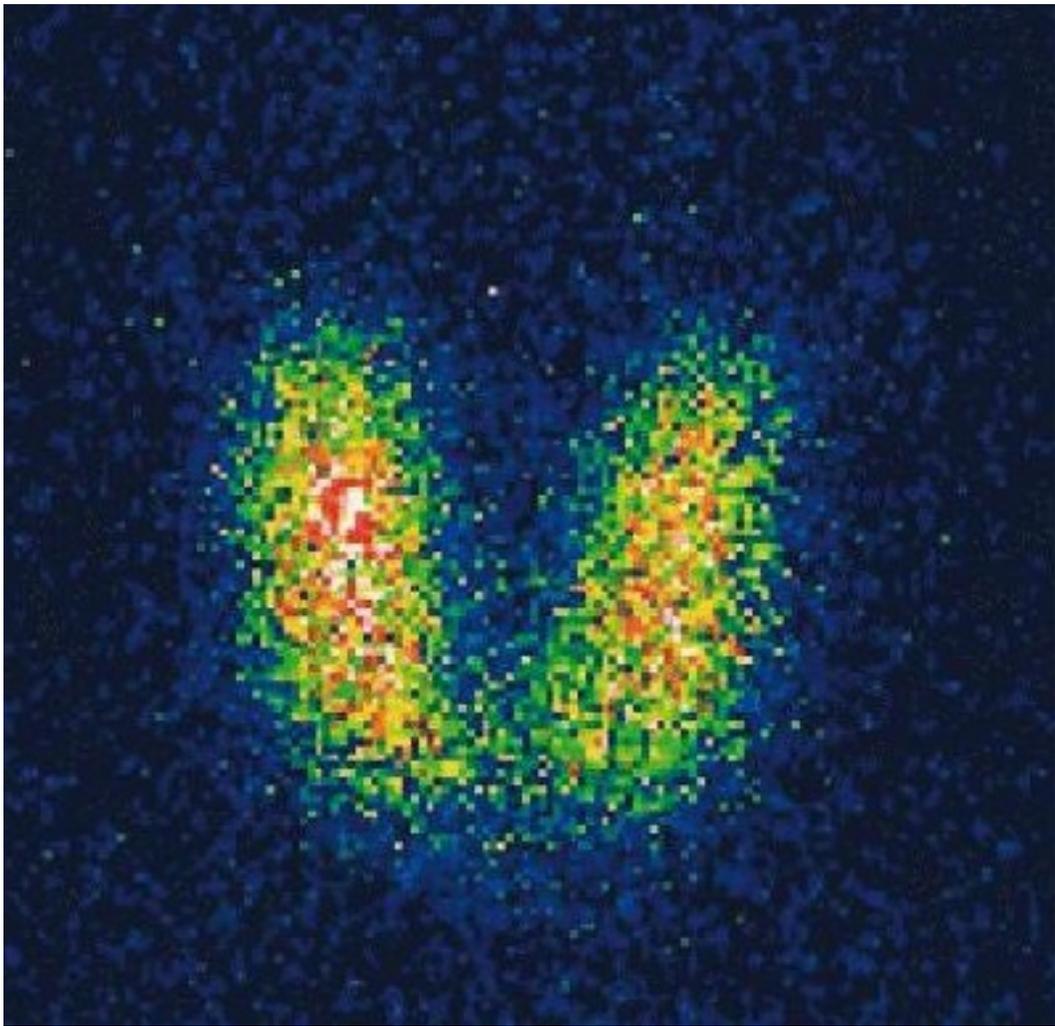
Dosis: 2.3 mSv

Bild nachbearbeitet mit Rechner 153

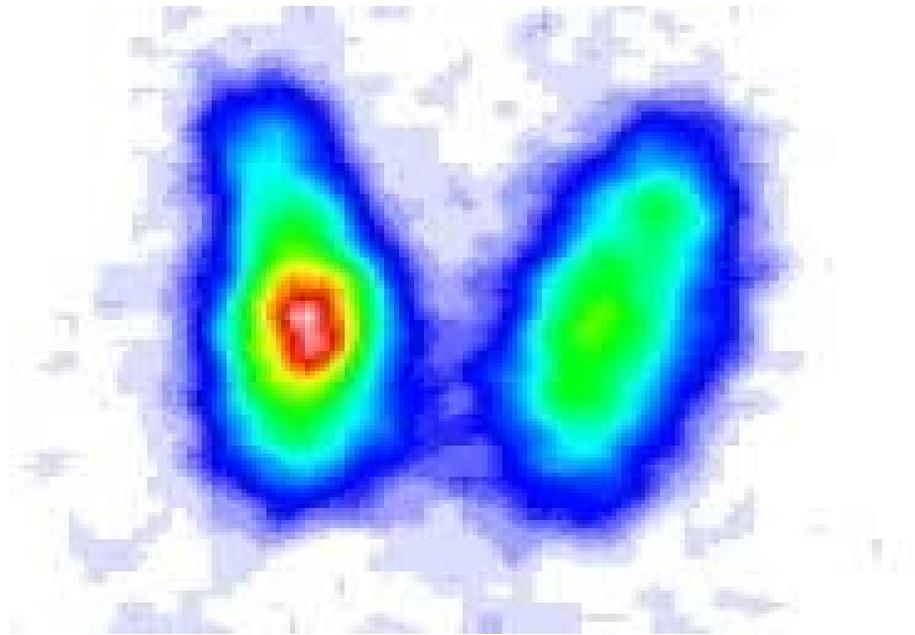
# SPECT

## Einzelphotonen- Emissions- Computertomographie

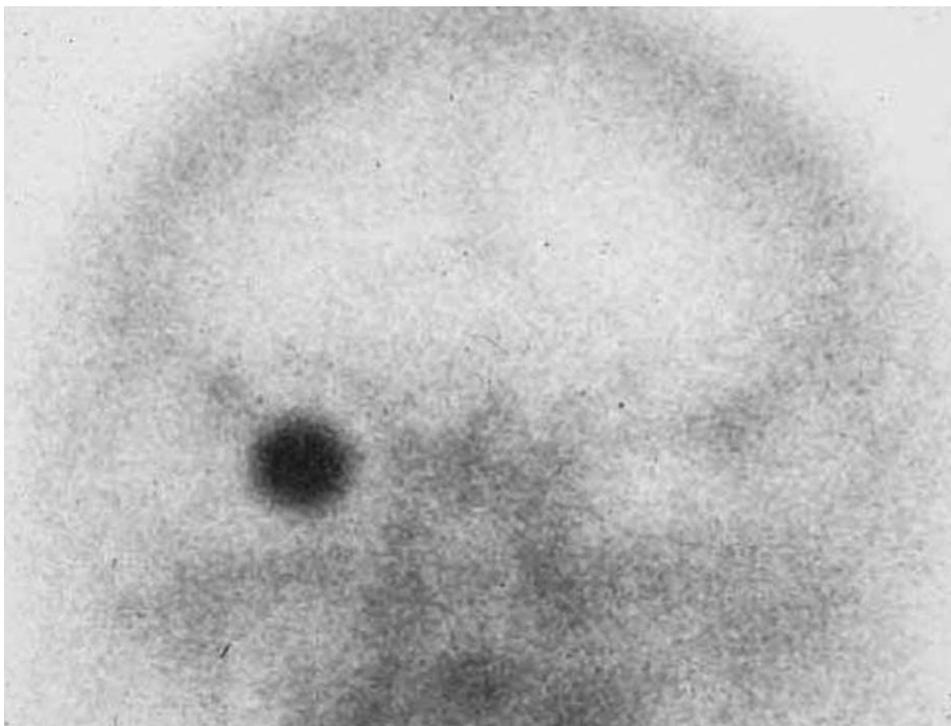
SPECT-Bilder zeigen die Verteilung  
eines Radiopharmakons im Körper.



Normale Schilddrüse mit  $^{99\text{m}}\text{Tc}$   
lange Belichtungszeiten

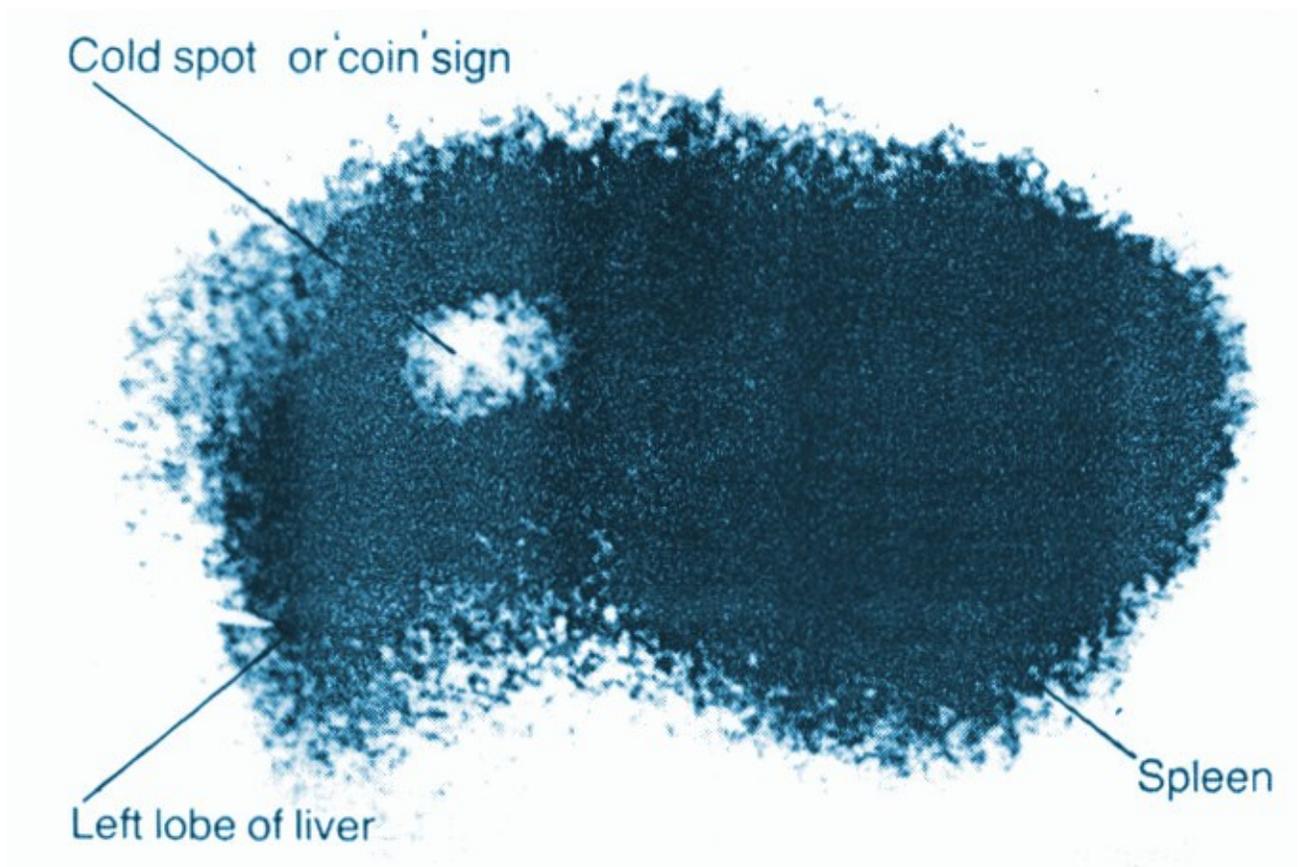


Schilddrüse mit heißem Knoten  
(Überfunktion)



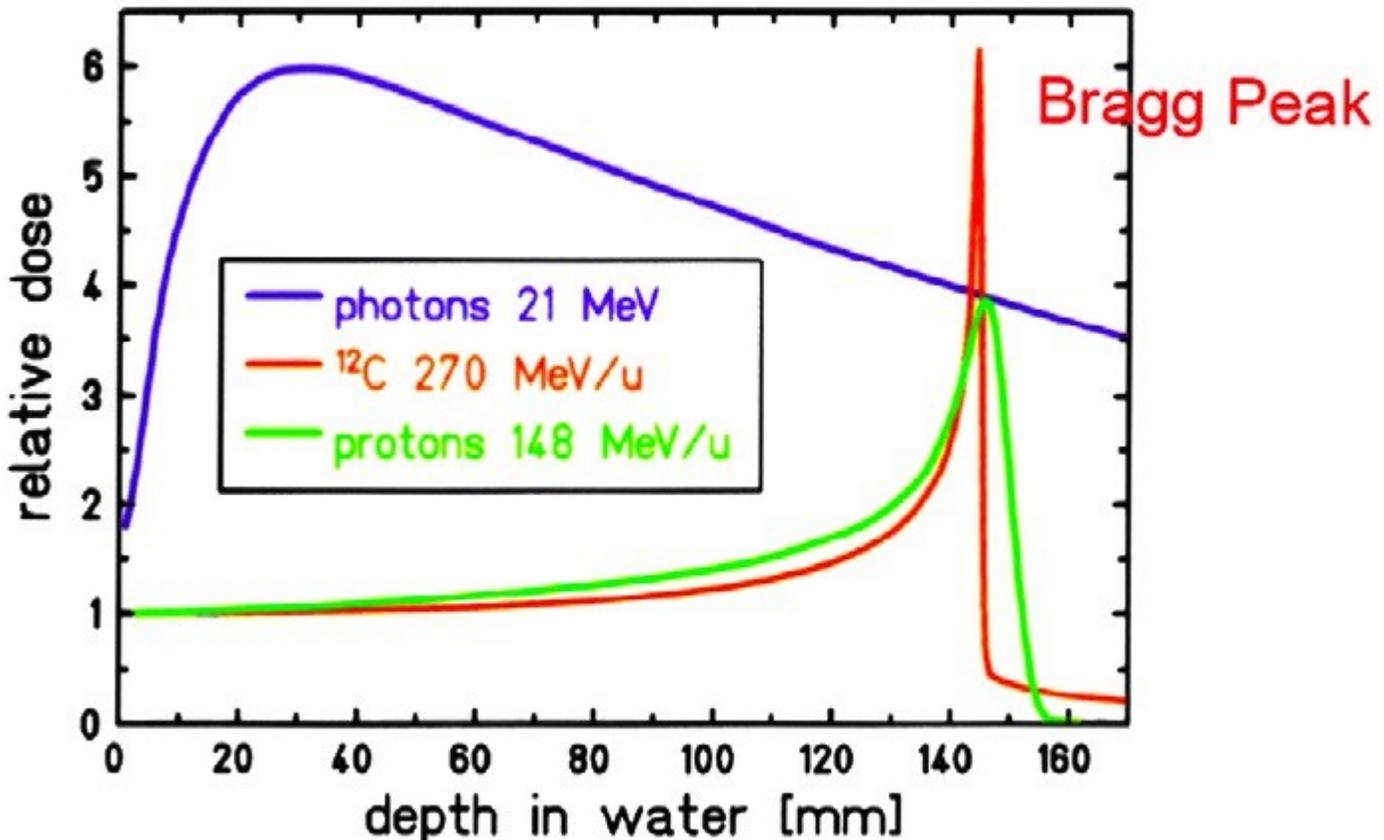
Schädelszintigramm mit  
Glasauge;  $^{99m}\text{Tc}$

# Frühes Szintigramm von der Leber und der Milz mit einem Artefakt einer vergessenen Münze im Pyjama des Patienten

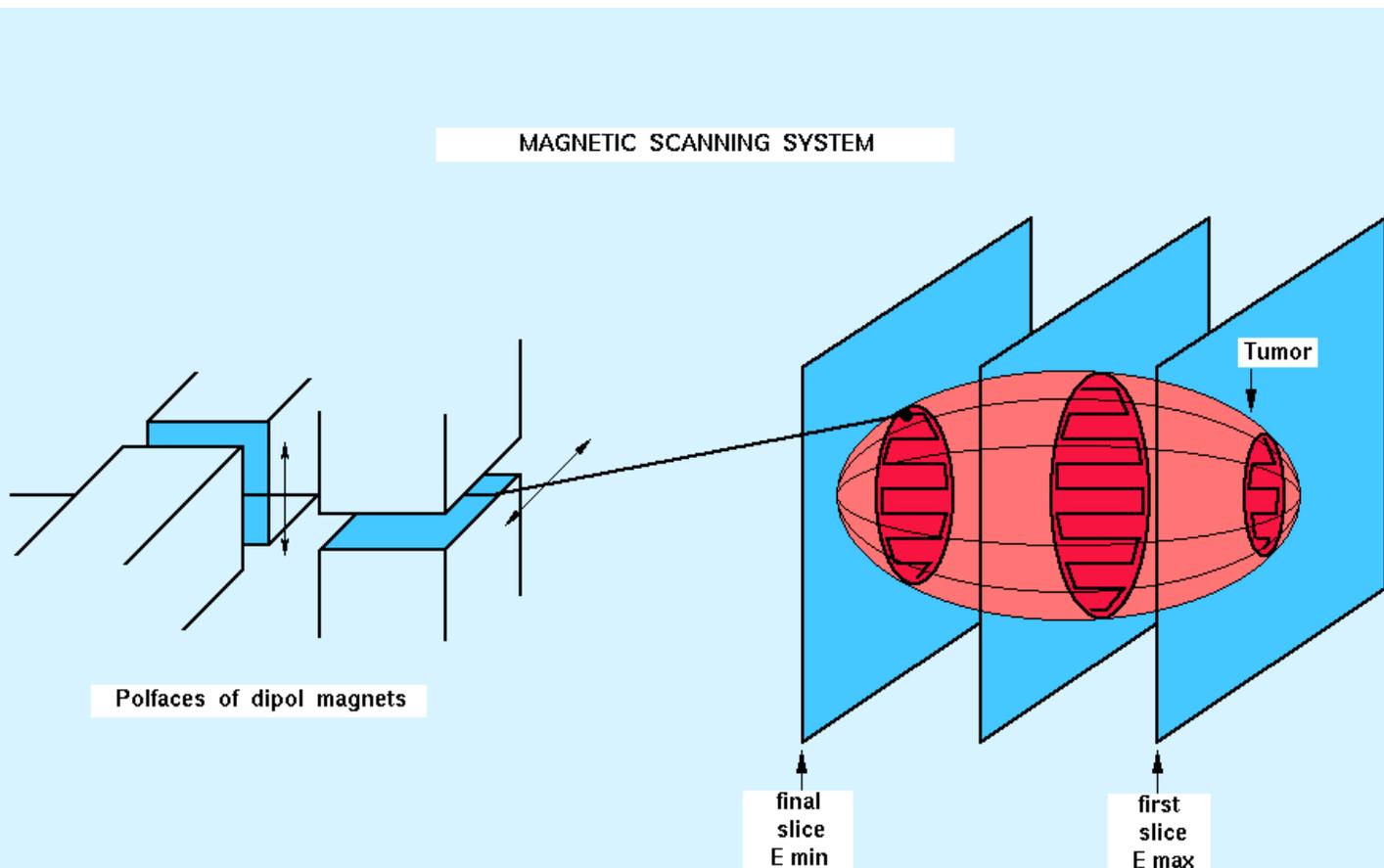


# Partikeltherapie

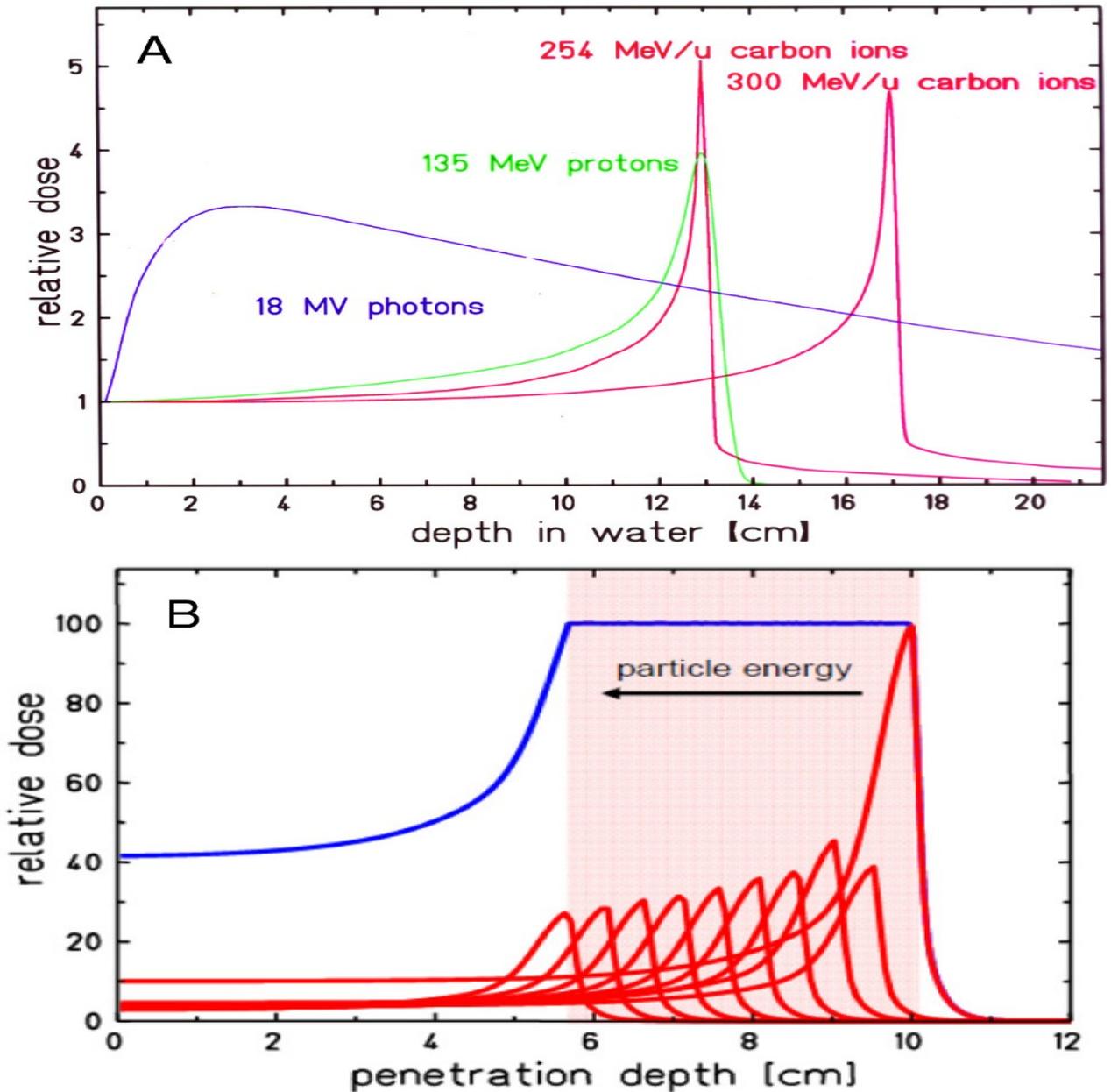
Dosisverteilung als Funktion der Tiefe im Gewebe für 21 MeV Photonen, 270 MeV pro Nukleon für C-12 Kerne (270 MeV/Nukleon) und 148 MeV Protonen.



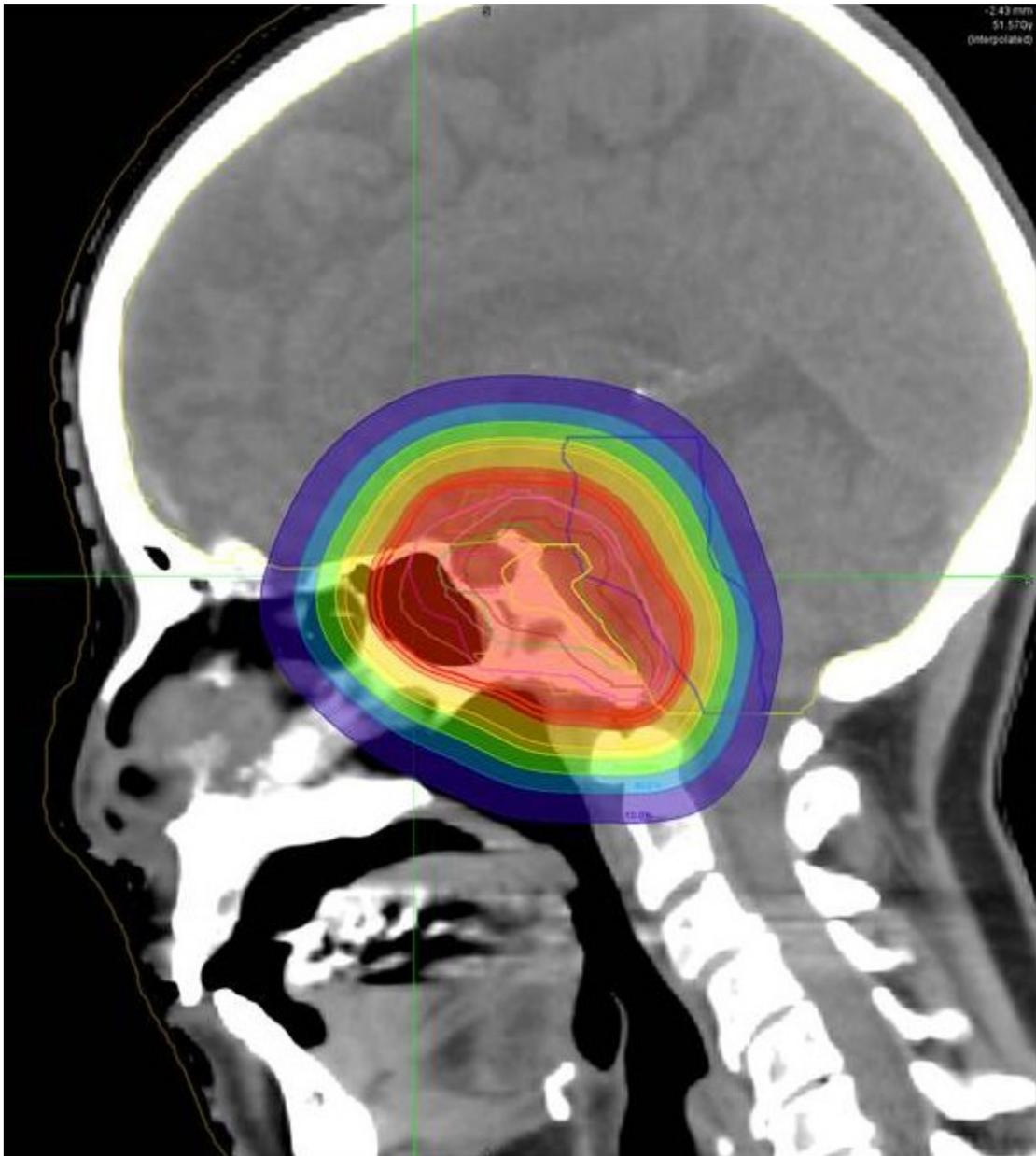
# Raster-Scan-Verfahren zur Behandlung lokalisierter Tumore. Der Tumor wird voxelweise mit dem Ionenstrahl 'beschrieben'.



# Dosis-Tiefen-Kurve für einen Tumor von 6 bis 10 cm Tiefe



# Dosisverteilung bei der Behandlung eines Hirntumors hinter dem Auge



# Partikeltherapie



# Resumee

- Radioaktivität ist ein Teil der natürlichen Umwelt.
- Das Leben auf der Erde hat sich z.T. nur **wegen** der natürlichen Radioaktivität entwickelt.
- Die Radioaktivität des Menschen trainiert sein Immunsystem
- Die zivilisationsbedingte Strahlenbelastung hat ihren Ursprung ganz überwiegend in der **Medizin**.
- Störungsfrei arbeitende Kernkraftwerke stellen nur eine geringfügige zusätzliche Belastung dar.
- **aber:** Tschernobyl, Three Mile Island, Fukushima, ...





# Zusammenfassung

# Radon und Rauchen

## Radon-Inhalationen

gegen rheumatische Erkrankungen?

## Radium-Trinkkuren?

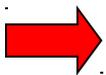
(die Aktivität rührt vom  $^{222}\text{Rn}$  her)

## Radon-Konzentrationen

„Heilstollen“	100 000 Bq/m <sup>3</sup>
Keller (mit Bodenritzen)	~ 200 Bq/m <sup>3</sup>
im Freien	~ 10 Bq/m <sup>3</sup>
in normalen Häusern	~ 30 Bq/m <sup>3</sup>
in Häusern aus Naturstein oder mit Lehmboden	bis zu 1000 Bq/m <sup>3</sup>

## Rauchen:

Unvollständige Exhalation der Radon-Folgeprodukte



Erhöhung des Lungenkrebsrisikos um den

**FAKTOR 30 !**

# Der natürliche Radioaktivitätsgehalt des Menschen

~ 4000 Bq	$^{14}\text{C}$	(Radiokohlenstoff, Halbwertszeit 5736 Jahre)
~ 4400 Bq	$^{40}\text{K}$	(Halbwertszeit 1,3 Milliarden Jahre)
~ 25 Bq	$^3\text{H}$	( $T_{1/2} = 12,3$ Jahre)
~ 10 Bq	$^{210}\text{Pb}$	( $T_{1/2} = 22,3$ Jahre)
~ 12 Bq	$^{226}\text{Ra}$	( $T_{1/2} = 1620$ Jahre)
~ 7 Bq	$^{238}\text{U}$	( $T_{1/2} = 4,5$ Milliarden Jahre)

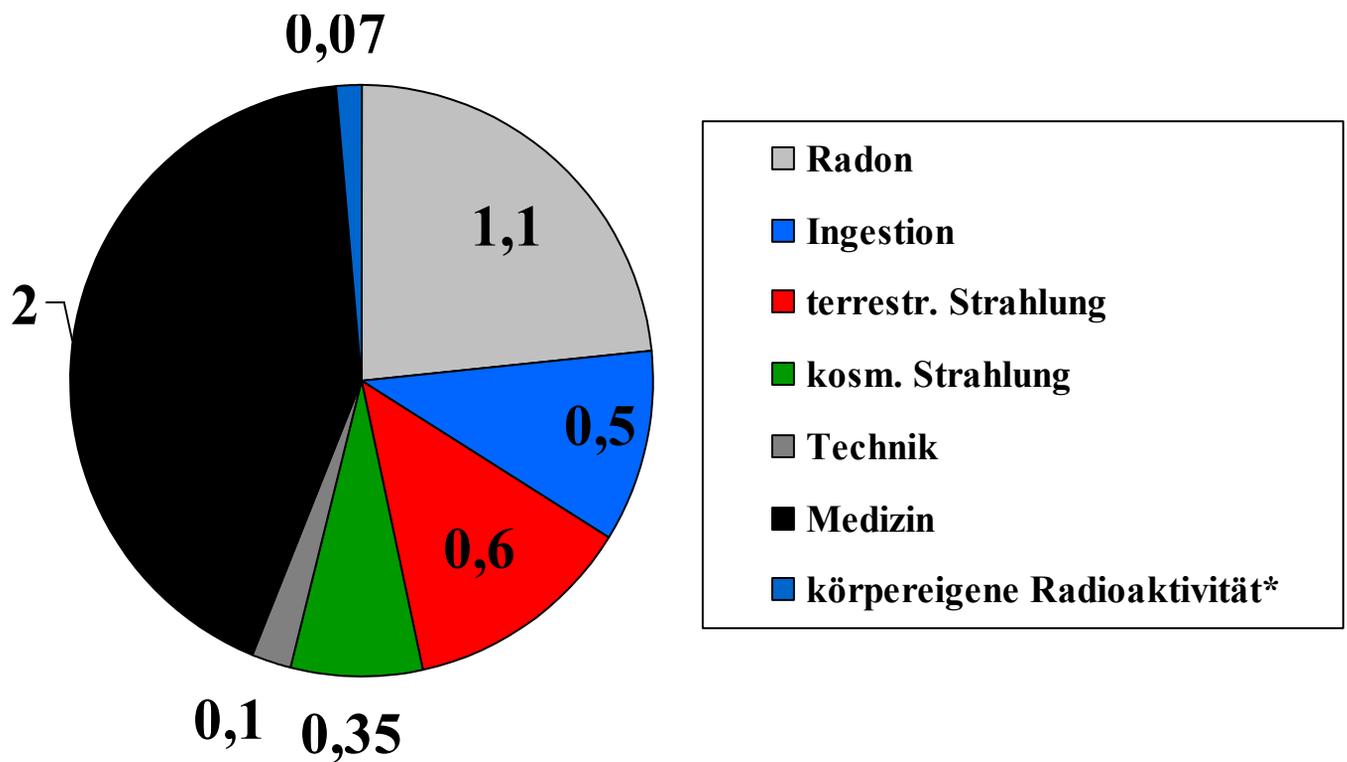
plus eine Prise (mit abnehmender Tendenz)

~ 3 Bq	$^{137}\text{Cs}$	( $T_{1/2} = 30$ Jahre)
~ 1 Bq	$^{90}\text{Sr}$	( $T_{1/2} = 28$ Jahre)



## Was kommt so (natürlicherweise) in unseren Lebensmitteln, Bau- und Brennstoffen vor?

	<sup>14</sup> C	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>222</sup> Rn
Mehl	110 Bq/kg	100 Bq/kg	2 Bq/kg	-/-
Bier	-/-	0,1 Bq/l	-/-	10 Bq/l
Ziegel	-/-	1000 Bq/kg	100 Bq/kg	-/-
Steinkohle	-/-	200 Bq/kg	40 Bq/kg	-/-
Siegerländer Gartenerde	20 Bq/kg	400 Bq/kg	100 Bq/kg	-/-



**Gesamte Strahlenbelastung: ~ 4,7 mSv/a**

\*Die Eigenstrahlung bewirkt für eine andere Person im Abstand von 50 cm in  $365 \times 8 \approx 3000$  Stunden eine Dosis von  $0,1 \mu\text{Sv/a}$ .

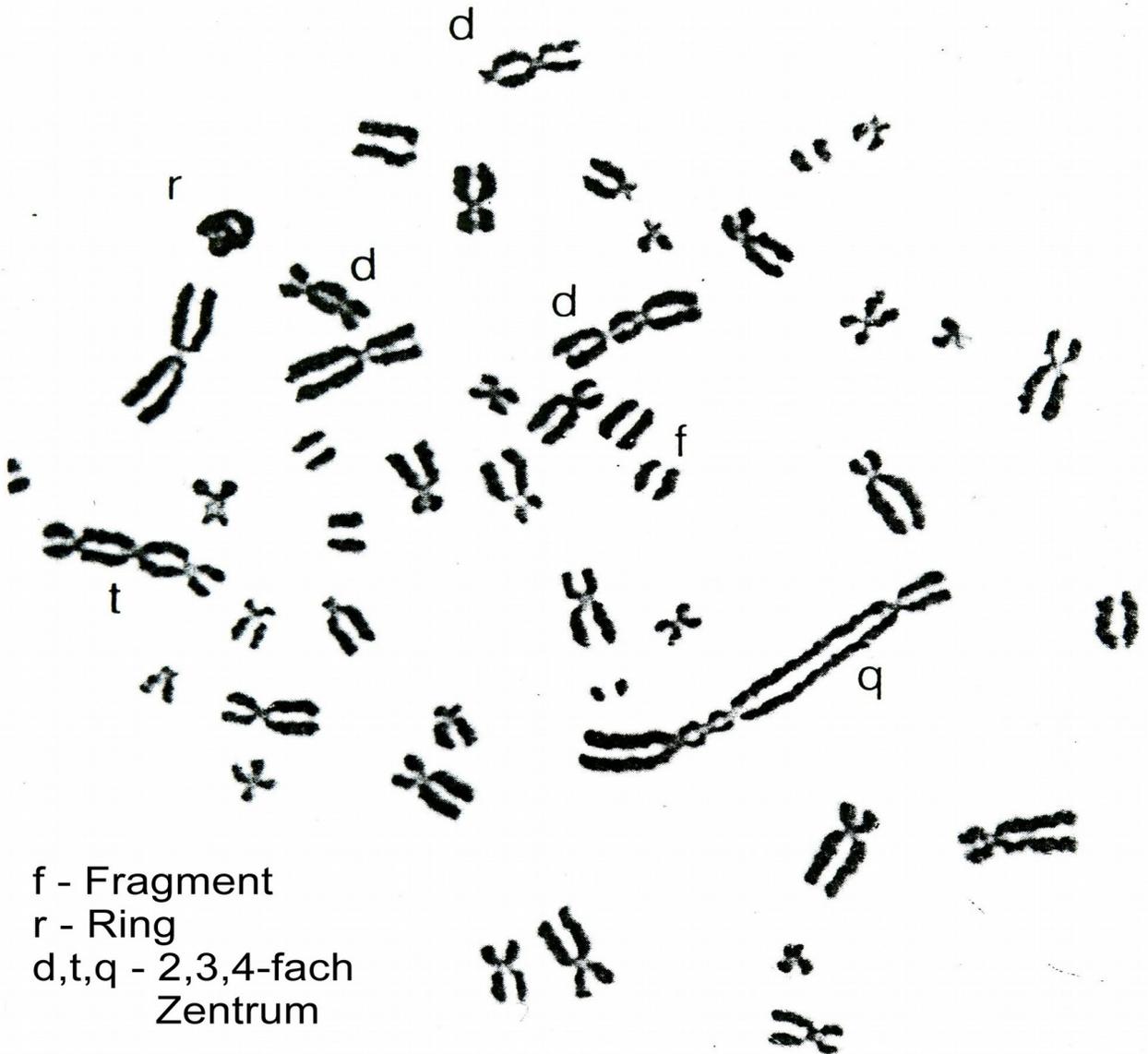
# Strahlenbelastung durch diagnostische Röntgenuntersuchung

untersuchte Region	Ganzkörperdosis [mSv]
Niere	1
Magen	0,5
Lunge	0,1
Zahn	0,01

## Strahlenbelastung durch diagnostische Verfahren in der Nuklearmedizin

untersuchte Region	Nuklid	Dosis im untersuchten Organ [mSv]
Schilddrüse	$^{131}\text{I}$	1000
Schilddrüse	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	3
Leber	$^{198}\text{Au}$	60
Skelett	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	4

## Chromosomen-Aberrationen nach Bestrahlung



# Zivilisationsbedingte Strahlenbelastung

Röntgendiagnostik ~ 1,8 mSv/a

Nuklearmedizin ~ 0,2 mSv/a

berufsbedingte  
Strahlenexposition ≤ 0,1 mSv/a

Sonstiges wie

Leuchtzifferblätter ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^3\text{H}$ )

Glas und Keramik ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ )

Düngemittel ( $^{238}\text{U}$ )

Feuermelder ( $^{241}\text{Am}$ )

Schweißelektroden ( $^{232}\text{Th}$ )

Kohlekraftwerke ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) ~ 0,05 mSv/a

Lampen ohne Strom ( $^3\text{H}$ )

Fernsehgeräte (Bremsstrahlung)

Glühstrümpfe ( $^{232}\text{Th}$ )

Antistatika ( $^{241}\text{Am}$ )

Kernkraftwerke ( $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ , ...)

~ 0,02 mSv/a

Kernwaffentests

Reaktorunfälle

Summe ~ 2,2<sup>173</sup> mSv/a