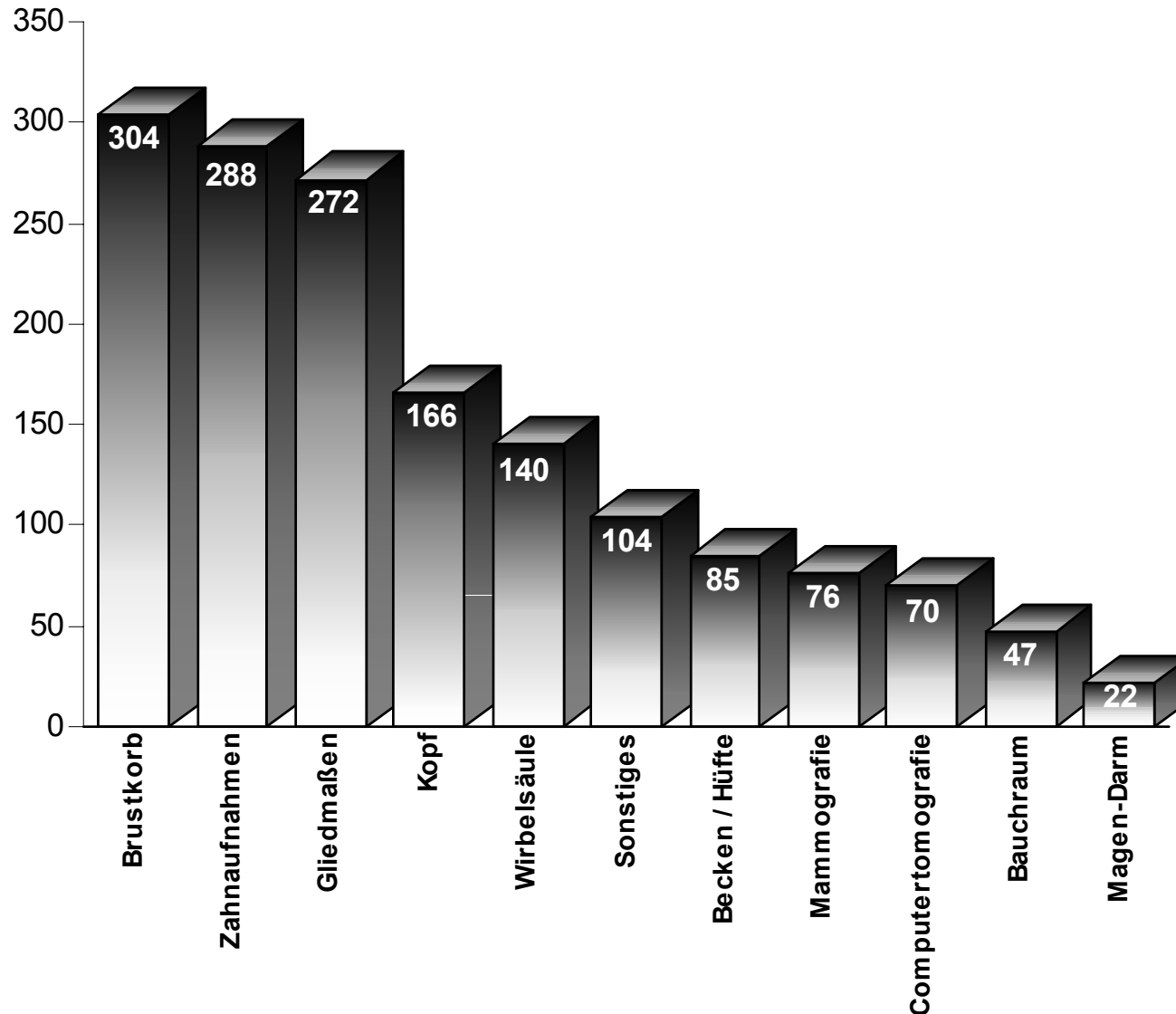


# Häufigkeit der Röntgenuntersuchungen in Deutschland

(angegeben in Untersuchungen je 1000 Einwohner)

aus Strahlenthemen, Januar 2003, BfS



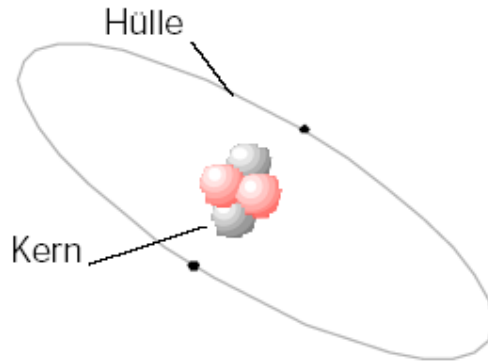
# Langstreckenflüge

aus Strahlenthemen, März 2003, BfS

Abflug	Ankunft	Dosisbereich [ $\mu\text{Sv}$ ]
Frankfurt	Gran Canaria	10 - 18
Frankfurt	Johannesburg	18 - 30
Frankfurt	New York	32 - 75
Frankfurt	Rio de Janeiro	17 - 28
Frankfurt	Rom	3 - 6
Frankfurt	San Francisco	45 - 110
Frankfurt	Singapur	28 - 50

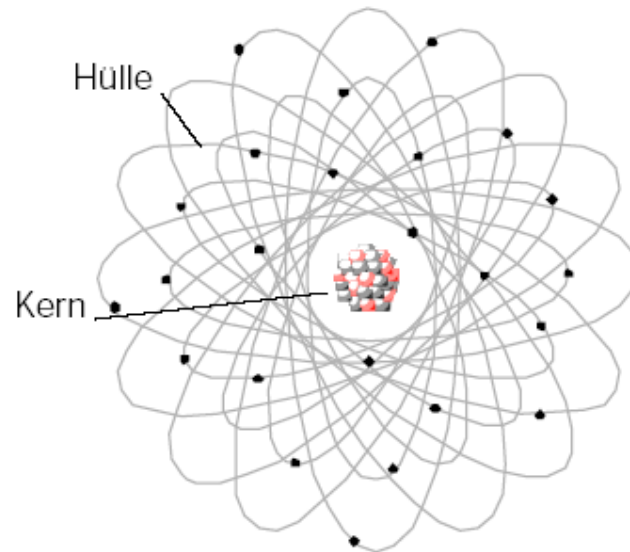
Die Schwankungsbreite geht hauptsächlich auf die Einflüsse von Sonnenzyklus und Flughöhe zurück

# Aufbau der Materie 1



## Helium-Atom

Kern: 2 Protonen  
2 Neutronen  
Hülle: 2 Elektronen

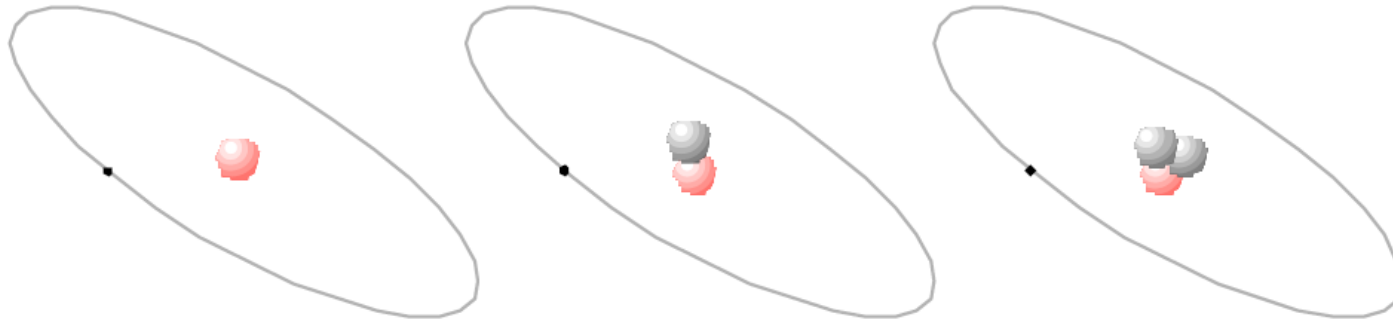


## Uran-Atom

92 Protonen  
146 Neutronen  
92 Elektronen

# Aufbau der Materie 2

## Isotope des Wasserstoffatoms:



Gewöhnlicher Wasserstoff	schwerer Wasserstoff	überschwerer Wasserstoff
H-1	H-2 (Deuterium)	H-3 (Tritium)
1 Proton	1 Proton	1 Proton
Kein Neutron	1 Neutron	2 Neutronen
1 Elektron	1 Elektron	1 Elektron

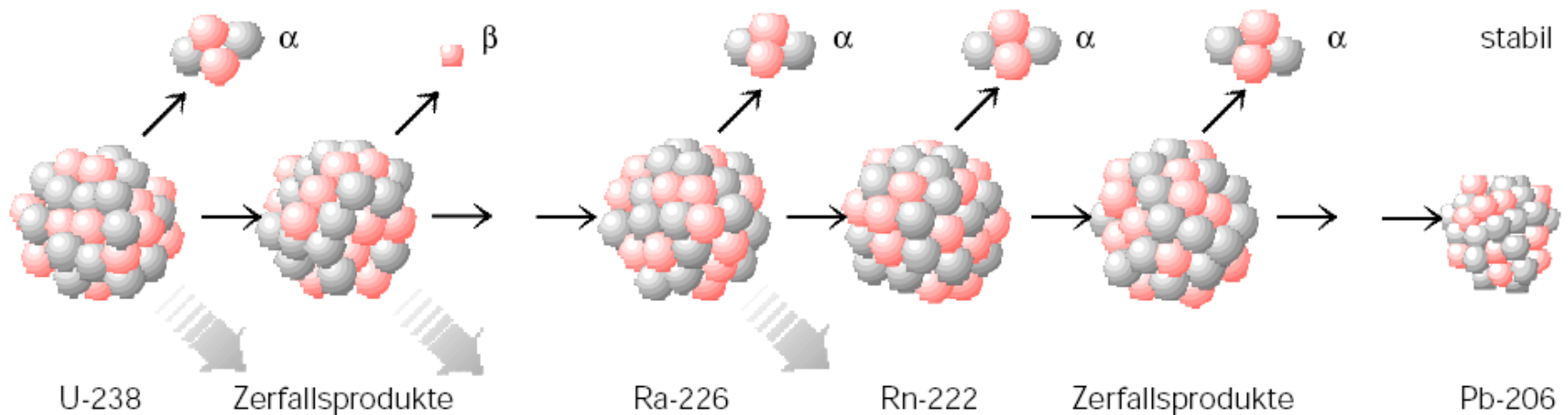
## Beispiele von Nukliden, die in der Natur vorkommen

Kohlenstoff-12	6 Protonen	6 Neutronen	(stabil)
Kohlenstoff-13	6 Protonen	7 Neutronen	(stabil)
Kohlenstoff-14	6 Protonen	8 Neutronen	(radioaktiv)
Blei-206	82 Protonen	124 Neutronen	(stabil)
Radon-222	86 Protonen	136 Neutronen	(radioaktiv)
Radium-226	88 Protonen	138 Neutronen	(radioaktiv)
Uran-235	92 Protonen	143 Neutronen	(radioaktiv)
Uran-238	92 Protonen	146 Neutronen	(radioaktiv)

# Zerfallsreihe

## Natürliche Zerfallsreihe von Uran-238

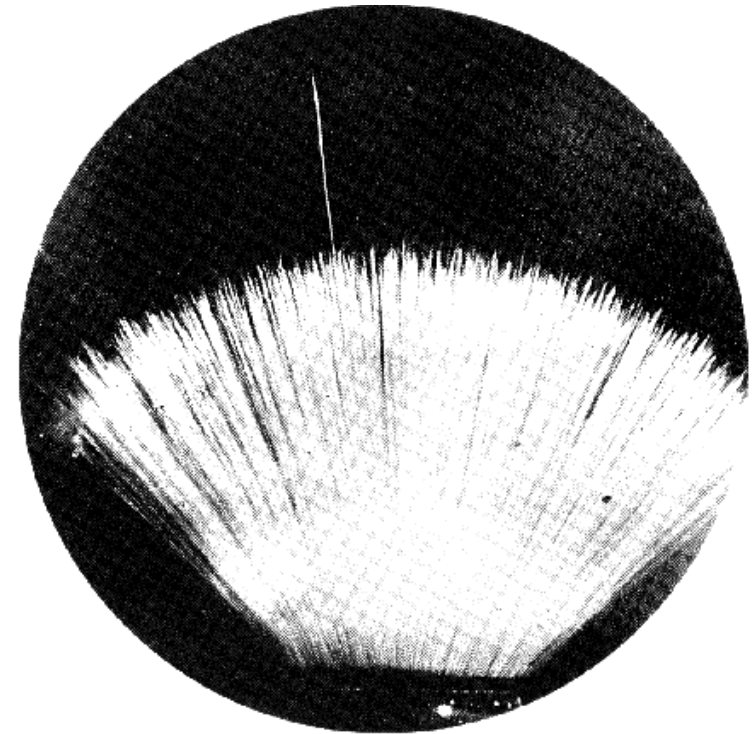
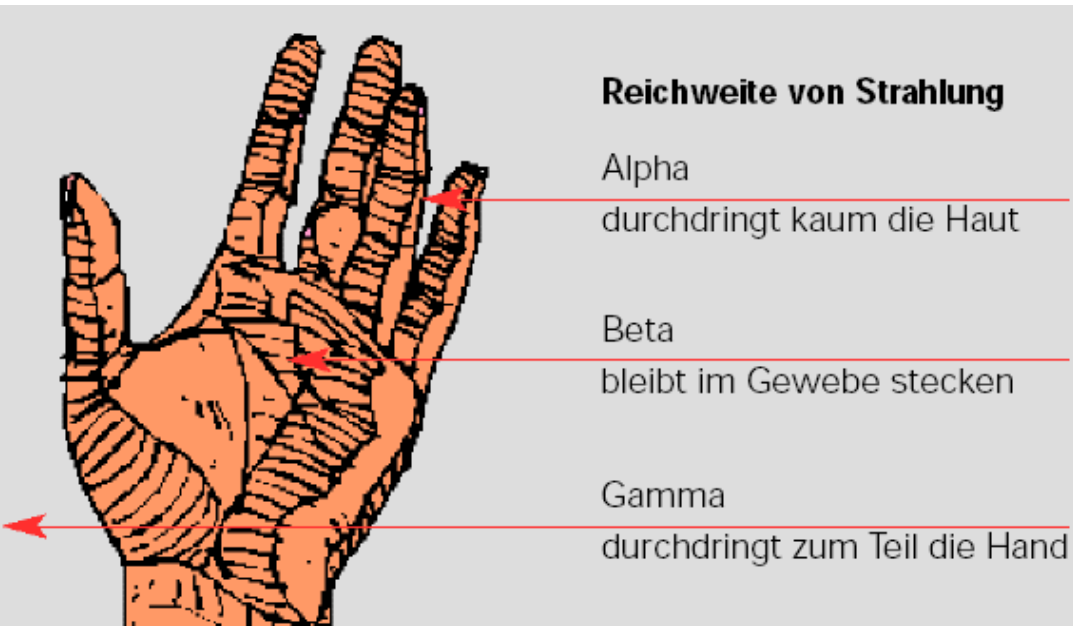
Die Zerfallsreihe führt über das Edelgas Radon-222 ins stabile Blei-206



### Beispiele von Radionukliden mit ihren Halbwertszeiten natürlichen Ursprungs

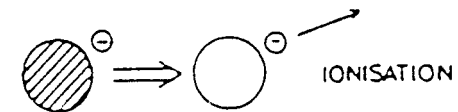
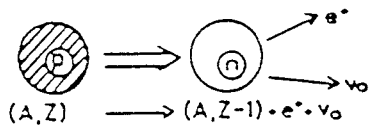
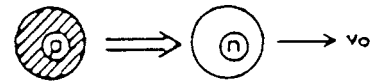
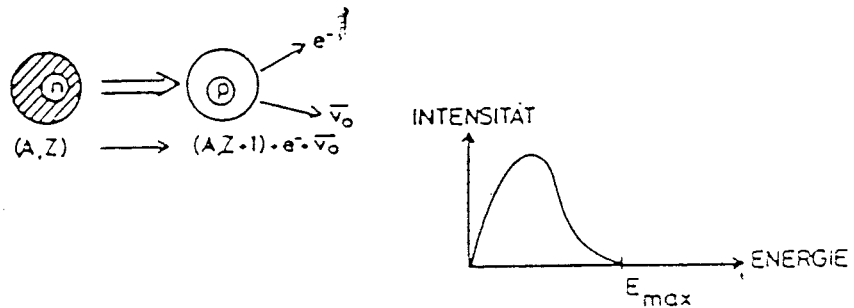
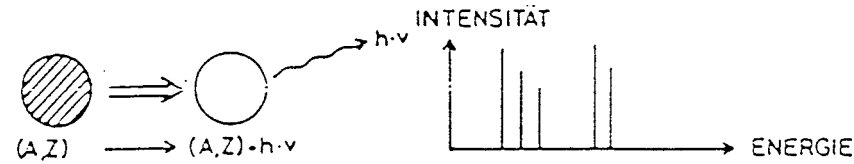
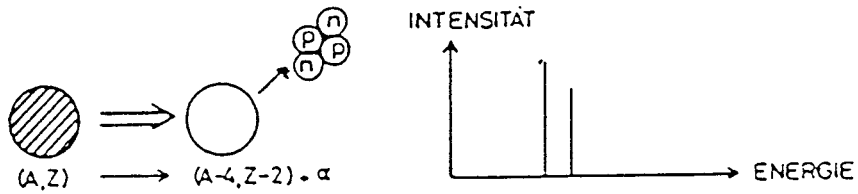
Kohlenstoff-14	5730 Jahre
Kalium-40	1,3 Mrd. Jahre
Radon-222	3,8 Tage
Radium-226	1600 Jahre
Uran-235	700 Mio. Jahre
Uran-238	4,5 Mrd. Jahre

# Reichweiten



**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.

# Zerfallsarten



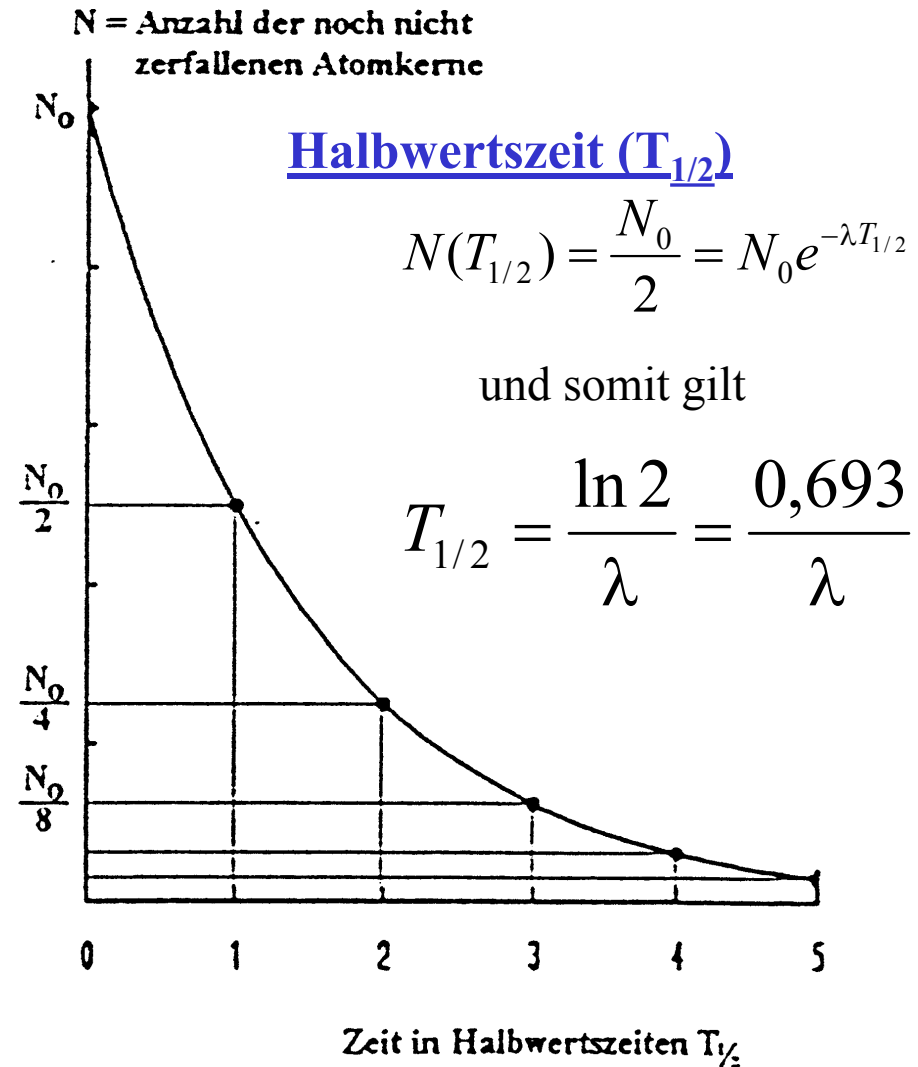
# Radioaktivität

## Zerfallsgesetz

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

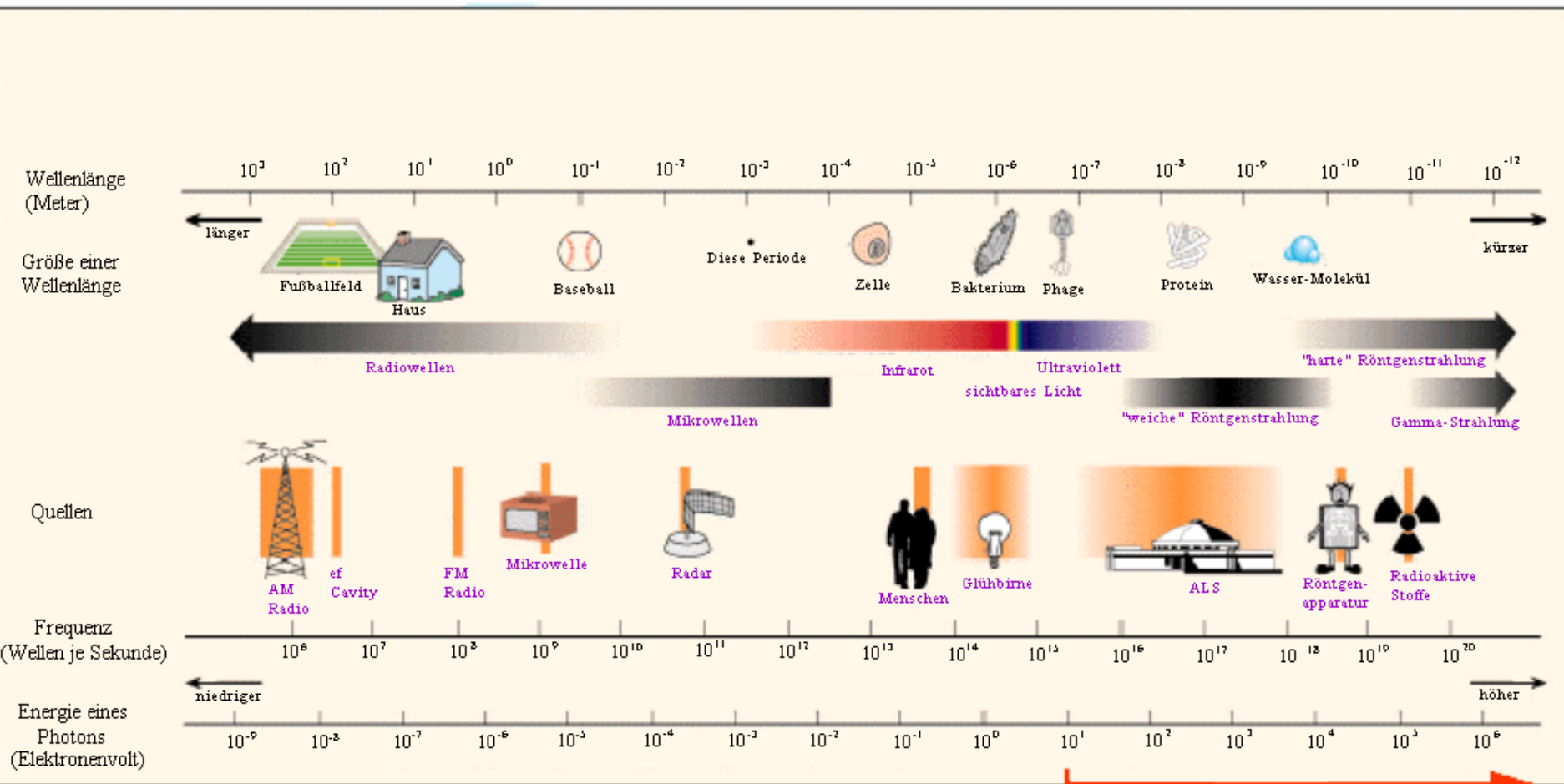
Einheit: 1 Bq = 1 s<sup>-1</sup> (1 Zerfall je Sekunde)

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$





# Das elektromagnetische Spektrum



# Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie

## Photonen

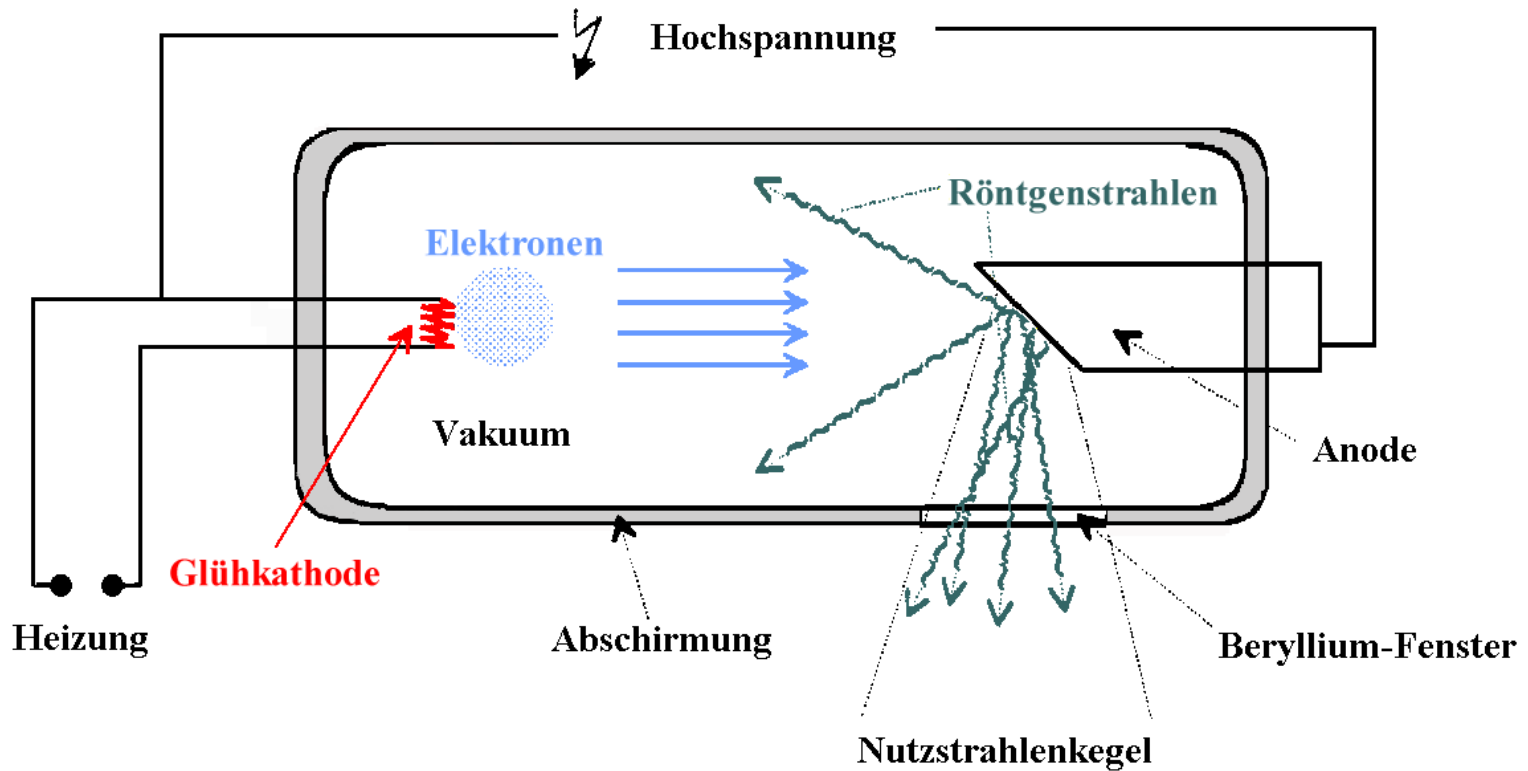
- Strahlenarten
  - Röntgenstrahlung
    - Röntgenbremsstrahlung
    - charakteristische Röntgenstrahlung
  - K-Einfang
  - $\gamma$ -Strahlung
- Schwächung von Photonenstrahlung in Materie
  - Photoeffekt
  - Comptoneffekt
  - Paarbildung
- Strahlendosis
  - Sekundärelektronengleichgewicht
  - Dosismessung und Ionendosis
- Tiefendosiskurven

## Teilchenstrahlung

- Reichweite von Teilchenstrahlung
- LET
- Direkt ionisierende Strahlung
  - Elektronen
  - Ionen
- Indirekt ionisierende Strahlung
  - Neutronen

# Röntgenstrahlung

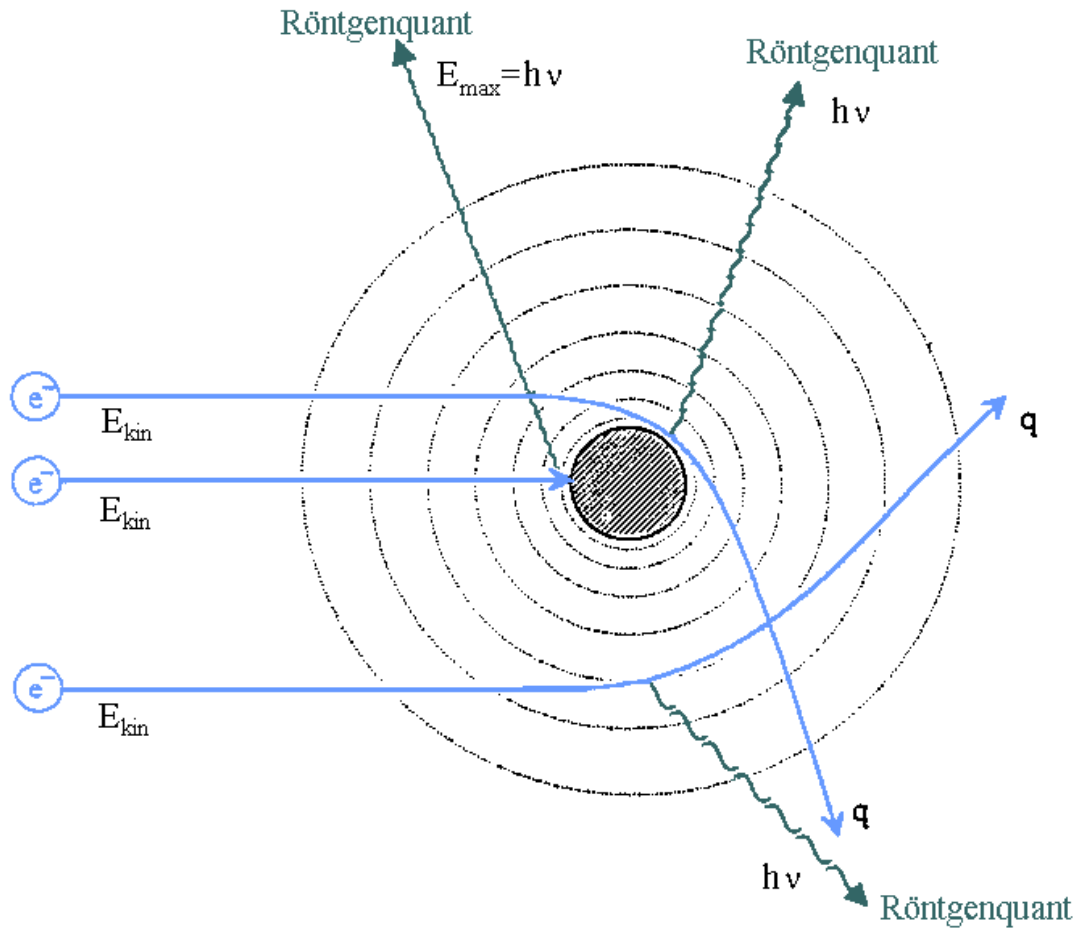
## Schema einer Röntgenröhre



- Röntgenbremsstrahlung (kontinuierliches Spektrum)
- Charakteristisches Spektrum
- Wärmeentwicklung

- Strahlungsausbeute:  $f$  (Heizstrom)
- $E_{\max} = f$  (Hochspannung)

# Röntgenbremsstrahlung



**Energiebilanz:**

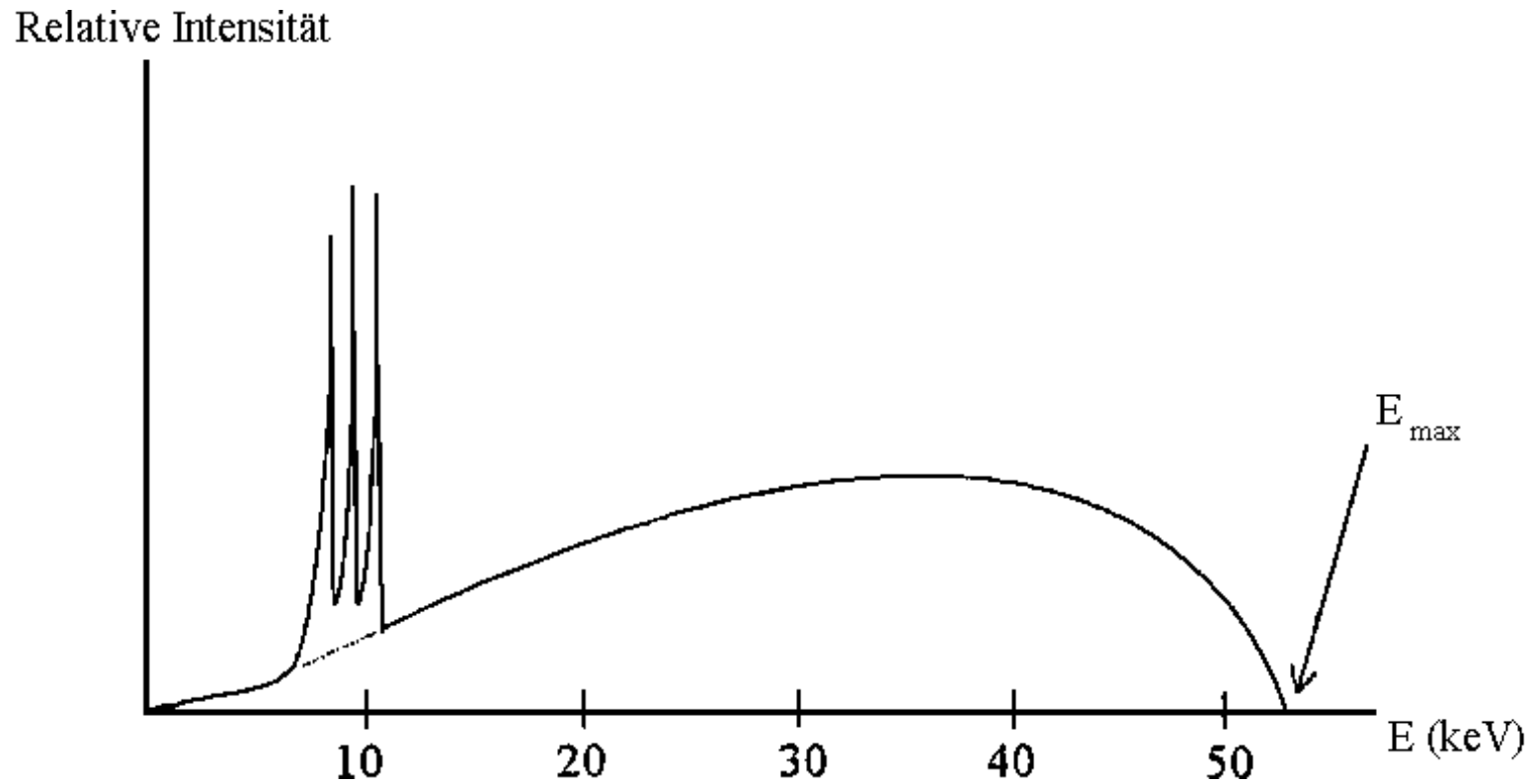
$$E_e = h\nu + q$$

**Maximale Röntgenenergie:**

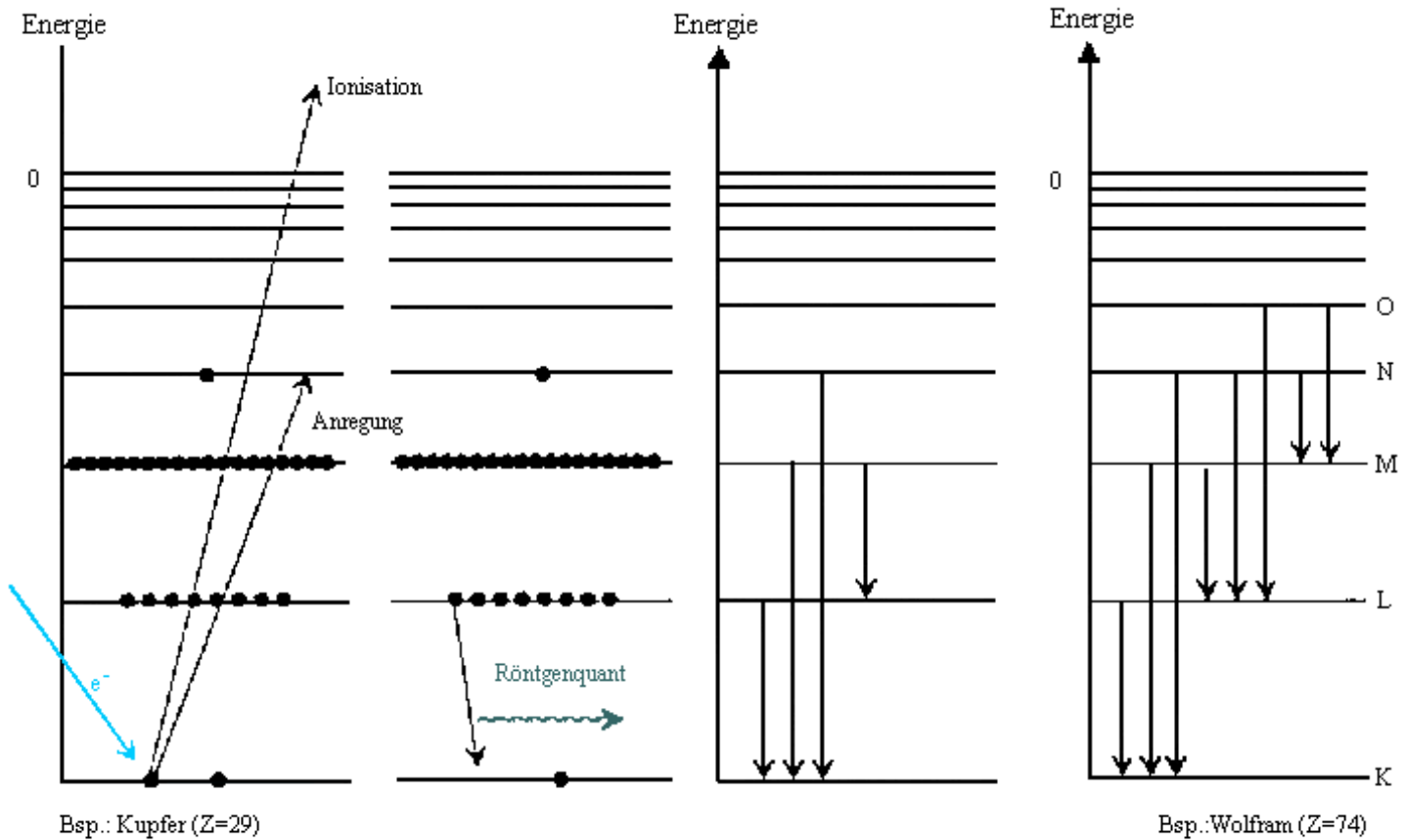
$$E_{max} = h\nu_{max} = hc / \lambda_g$$

$$\lambda_g = hc / E_{max}$$

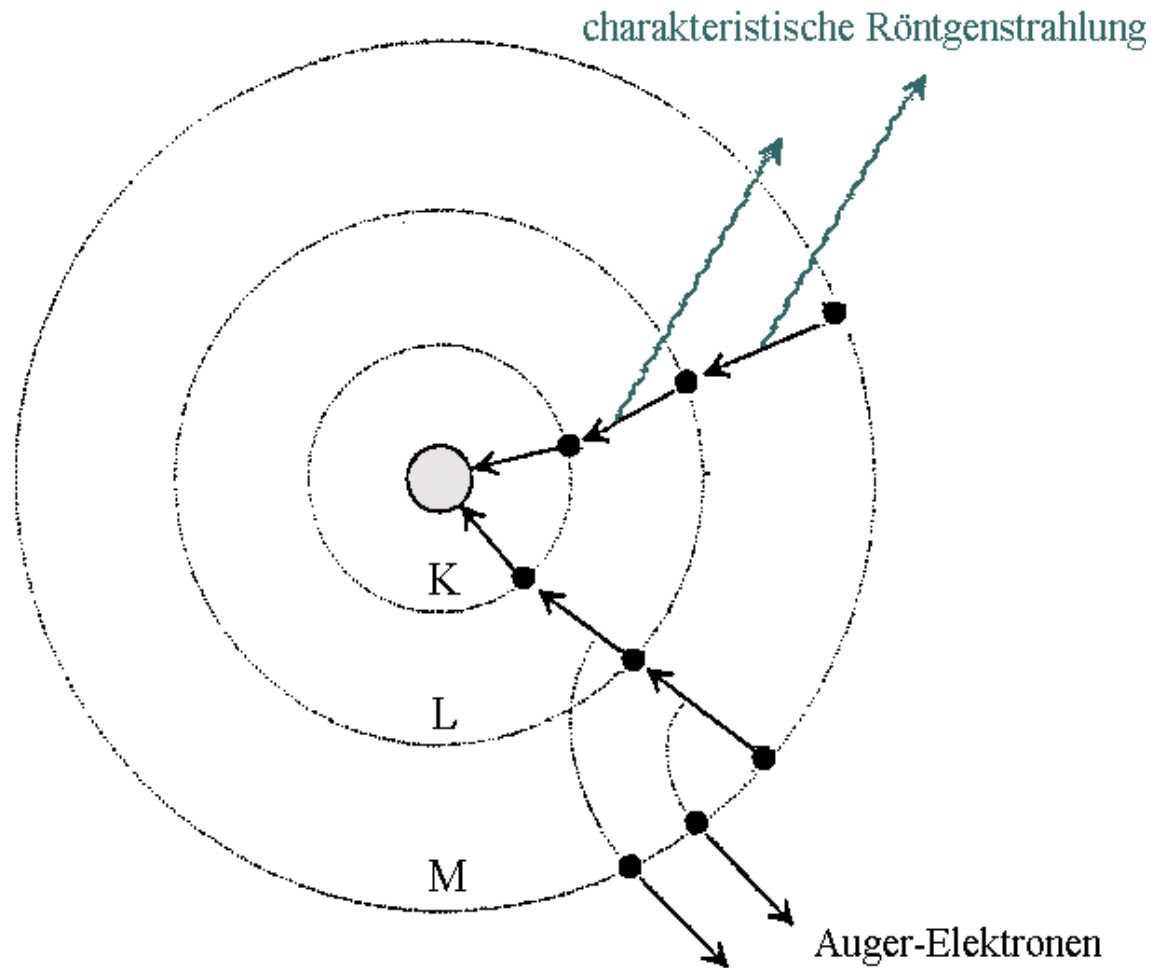
# Bremsspektrum mit charakteristischen Linien



# Charakteristische Röntgenstrahlung

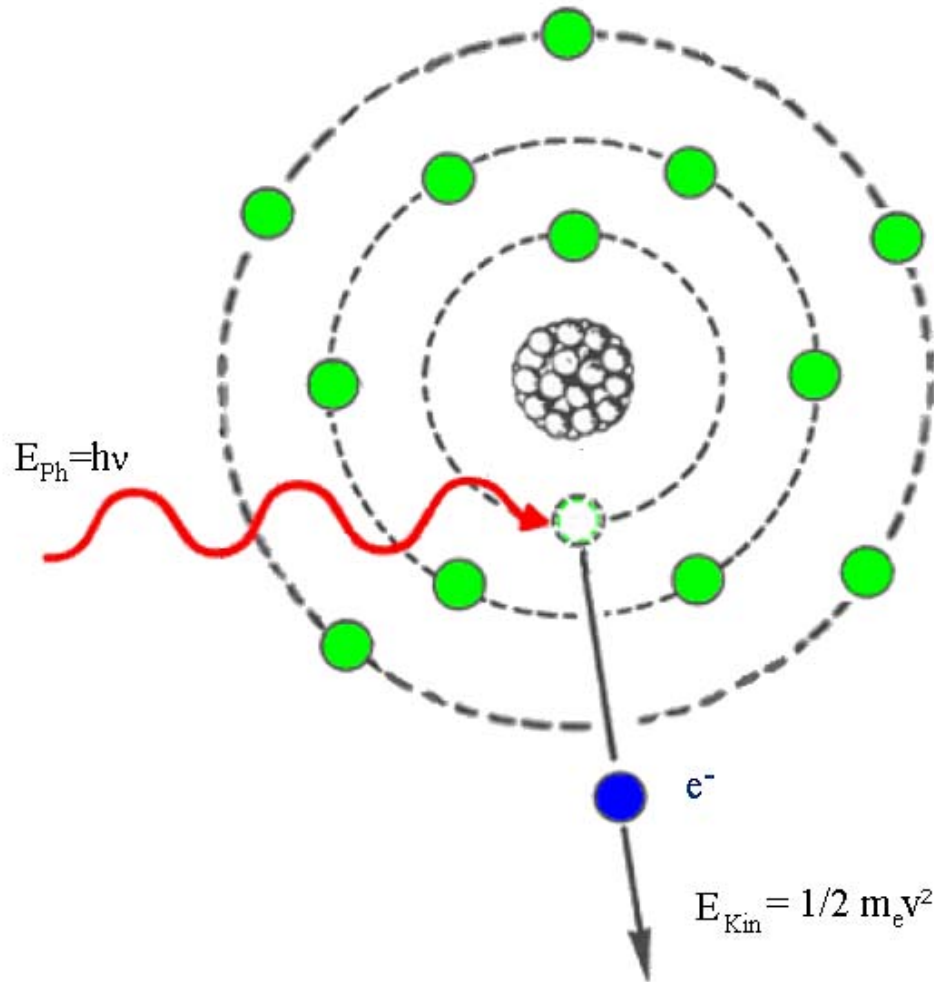


# Elektronen – K-Einfang (electron capture)



# Der Photoeffekt

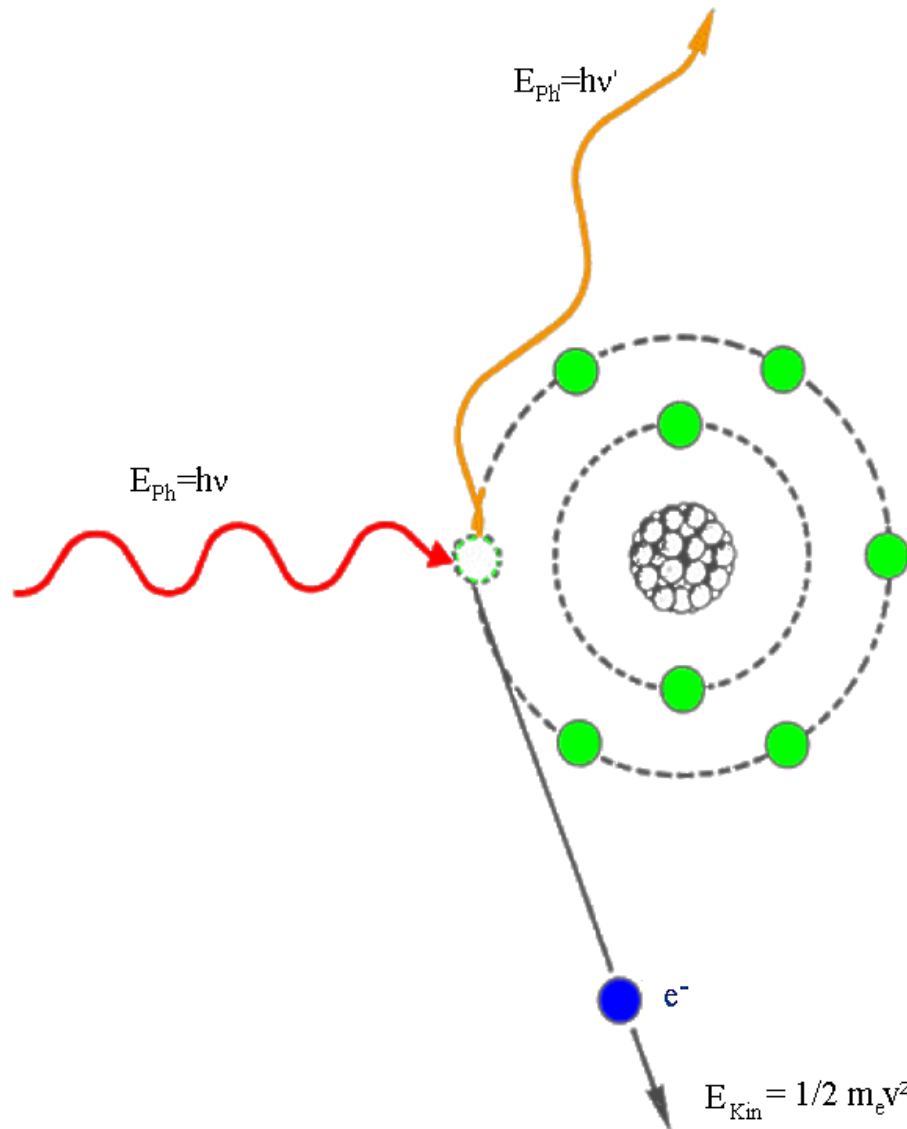
Quantencharakter von Licht  
(Nobelpreis für A. Einstein)



$$h \nu = A + 1/2 m_e v^2$$

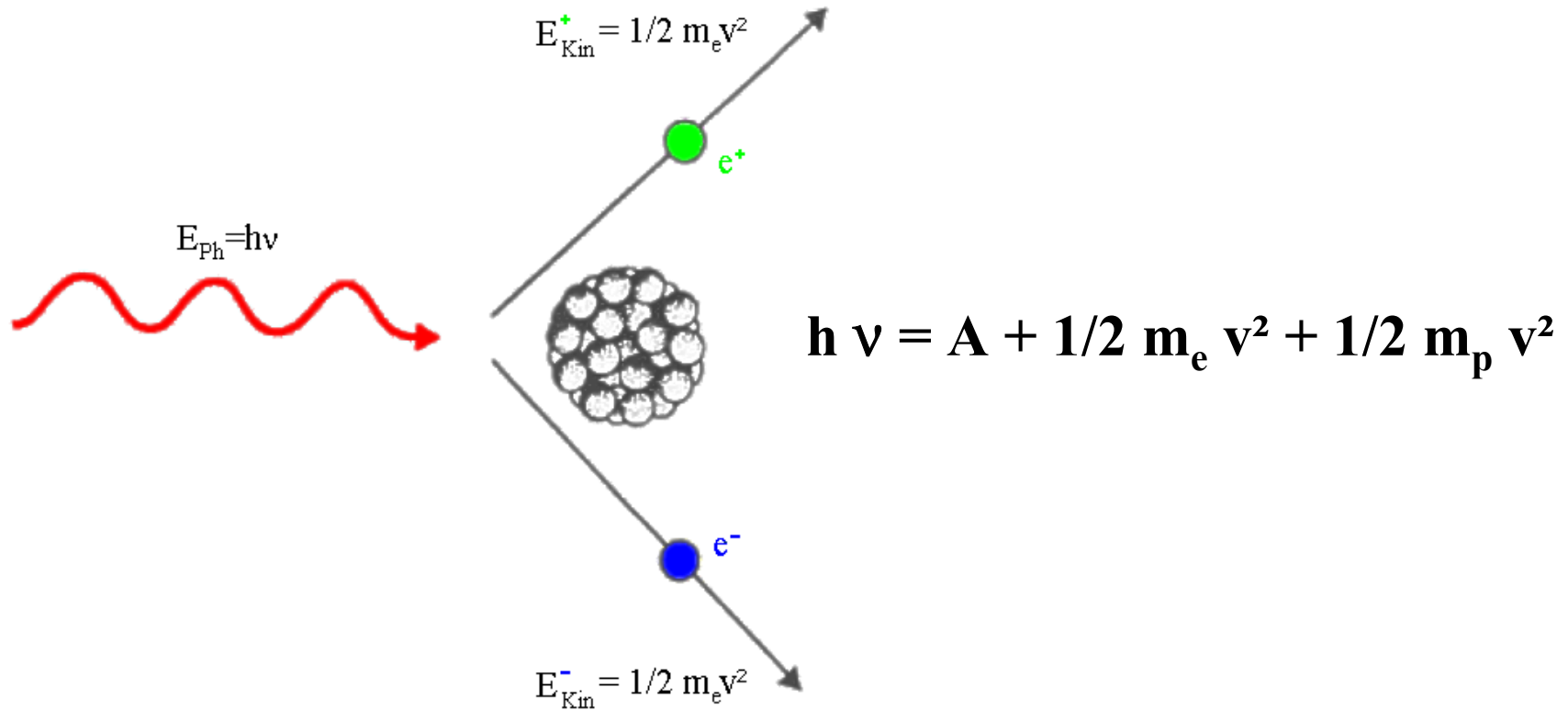


# Der Comptoneffekt

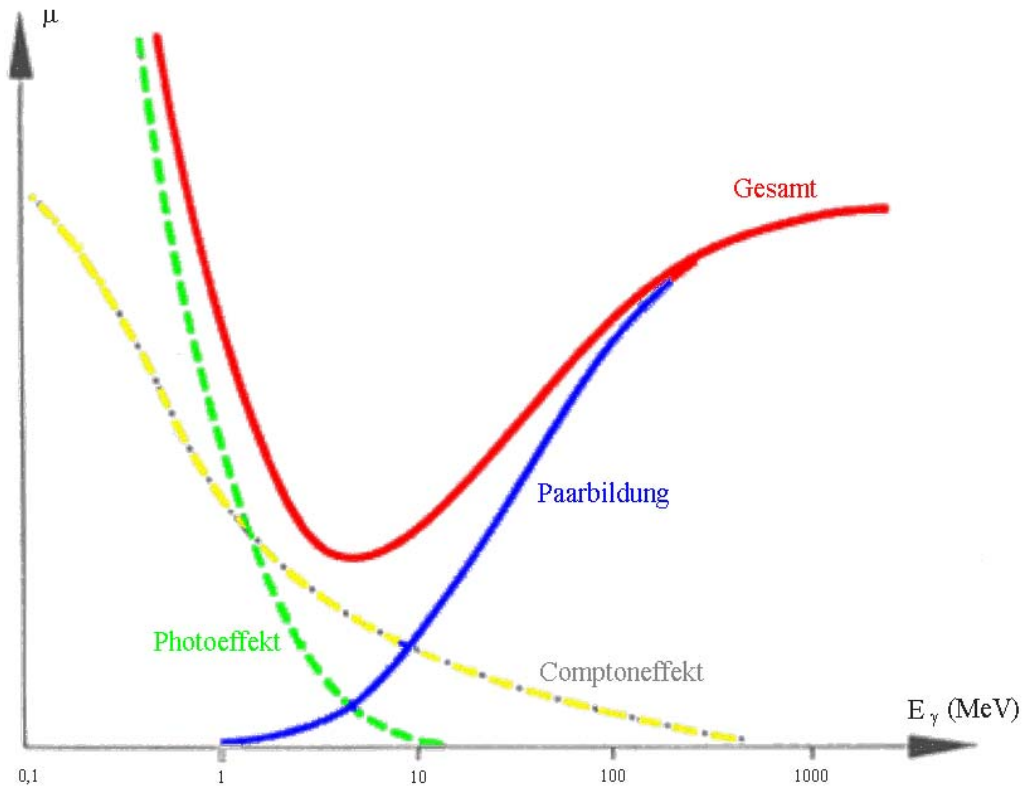


$$h \nu = A + \frac{1}{2} m_e v^2 + h \nu'$$

# Die Paarbildung



# Massenschwächungskoeffizient = $f$ (Energie)



Verlauf des Schwächungskoeffizienten  $\mu$  als Summe seiner Anteile aus dem Photoeffekt, dem Comptoneffekt und der Paarbildung

# Schwächung von Photonenstrahlung in Materie

Der Intensitätsverlust von Strahlung beim Durchgang durch Materie ist abhängig von:

## ✿ Dicke

- Lambert-Beer'sches Gesetz

$$-\frac{dI}{dx} = \mu \cdot I_0$$

$\mu$ : Schwächungskoeffizient [ $\text{cm}^{-1}$ ]

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

## ✿ Dichte

## ✿ Ordnungszahl

- Photoeffekt
- Comptoneffekt
- Paarbildung

## ✿ Quantenenergie

# Aktivität und Energiedosis

## Strahlendosimetrie und Meßgeräte

### Einheiten

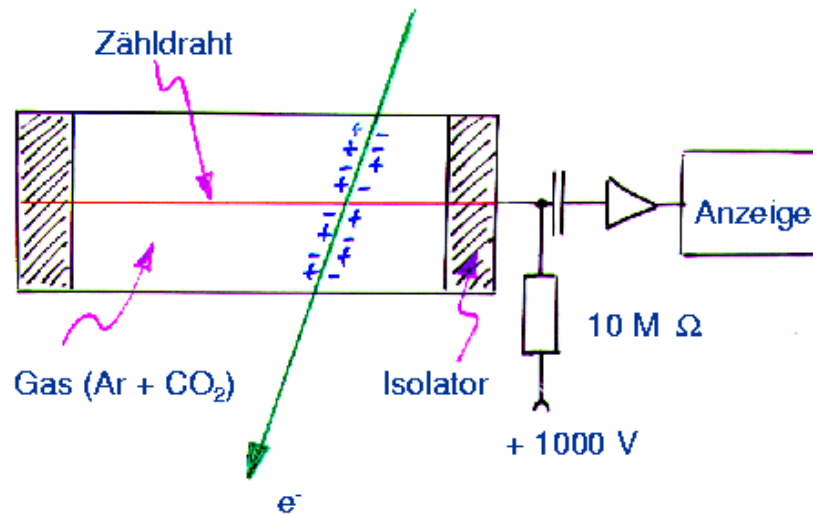
1 Becquerel: 1 radioaktiver Zerfall pro Sekunde = 1 Bq

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

Mittlere Energiedosis:

$$D = \frac{\bar{E}}{\Delta m} \quad \text{Einheit: 1 Gray (Gy) = 1 J/kg}$$

# Meßgeräte



Die erzeugte Ladung wird im Zählgas verstärkt. Verstärkungsfaktor

$10^5 \Rightarrow$  Proportionalzähler

$10^{10} \Rightarrow$  Geiger-Müller Zählrohr

Ansprechvermögen

1% für  $\gamma$ -Strahlen

100% für  $\alpha$ ,  $e^-$

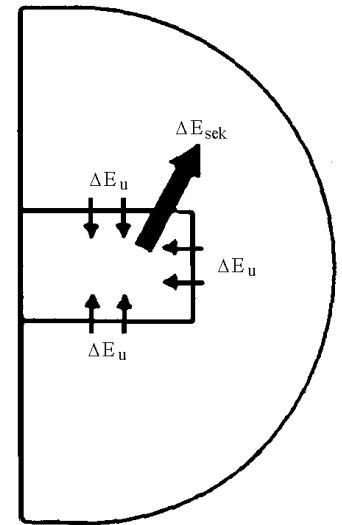
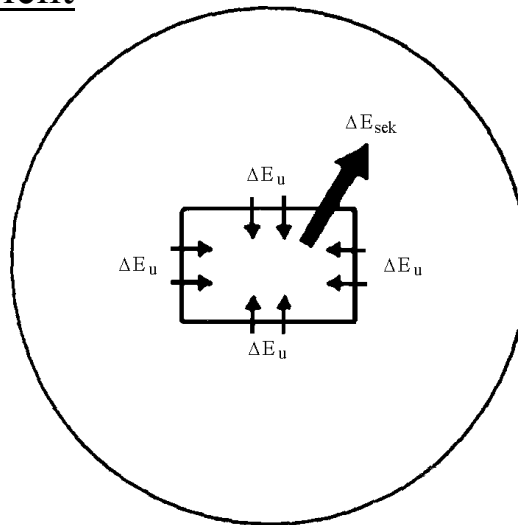
# Das Sekundärelektronengleichgewicht

Man muss zwischen der von der Strahlung **abgegebenen** Energie  $E_a$  und der in einem Volumenelement **deponierten** Energie  $E_d$  unterscheiden.

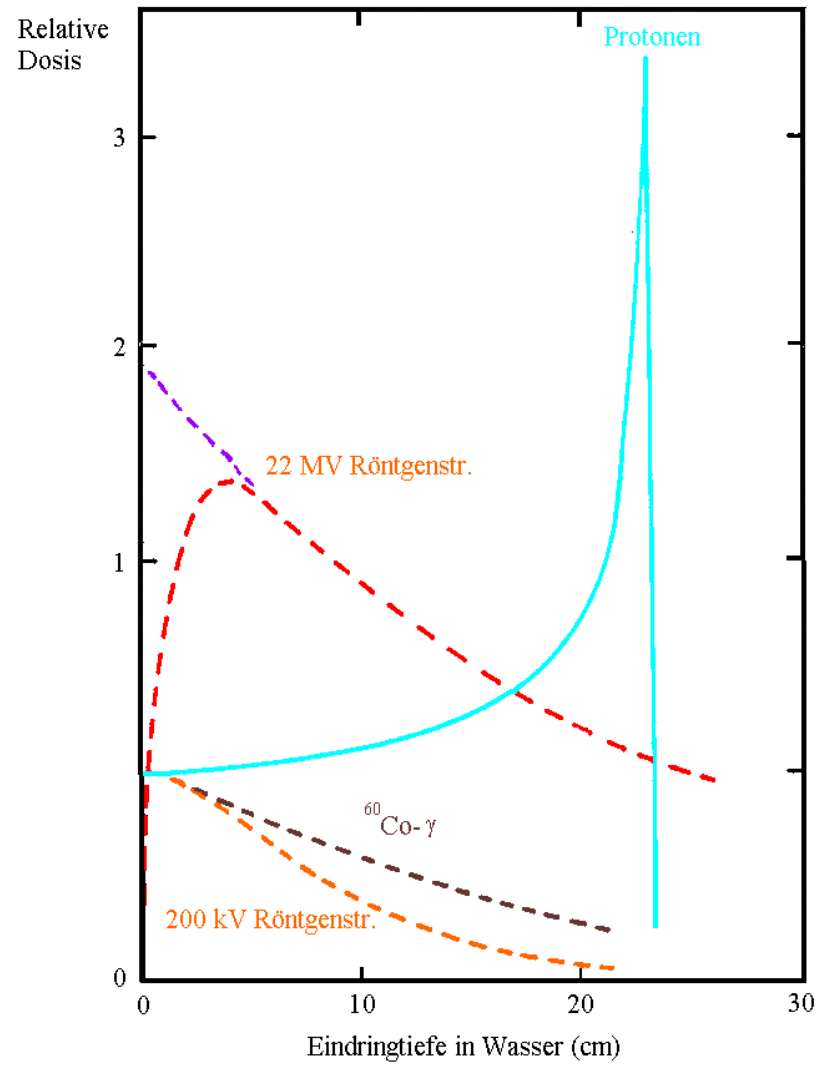
Dabei ist in der Regel  $E_a \geq E_d$  und es gilt  $E_d = E_a - \Delta E_{sek}$ .

Falls Sekundärelektronengleichgewicht herrscht (linkes Bild), gilt:

$$E_d = E_a$$



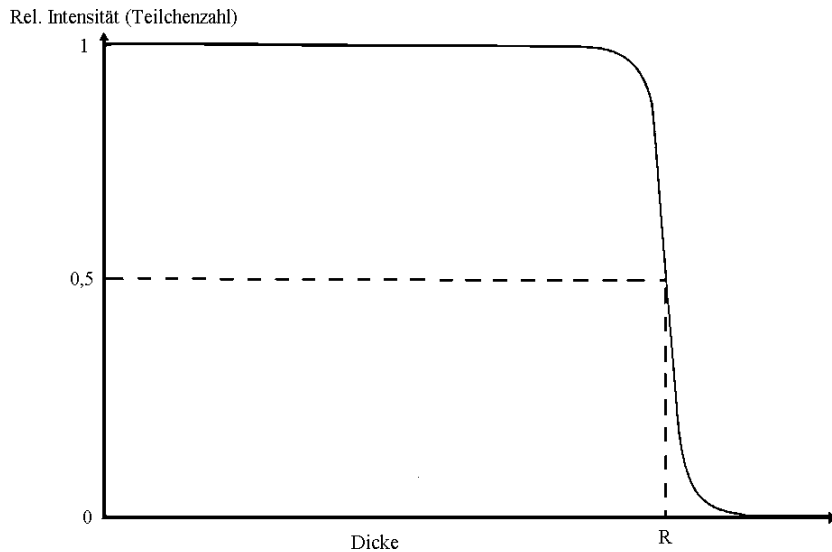
# Tiefendosiskurven





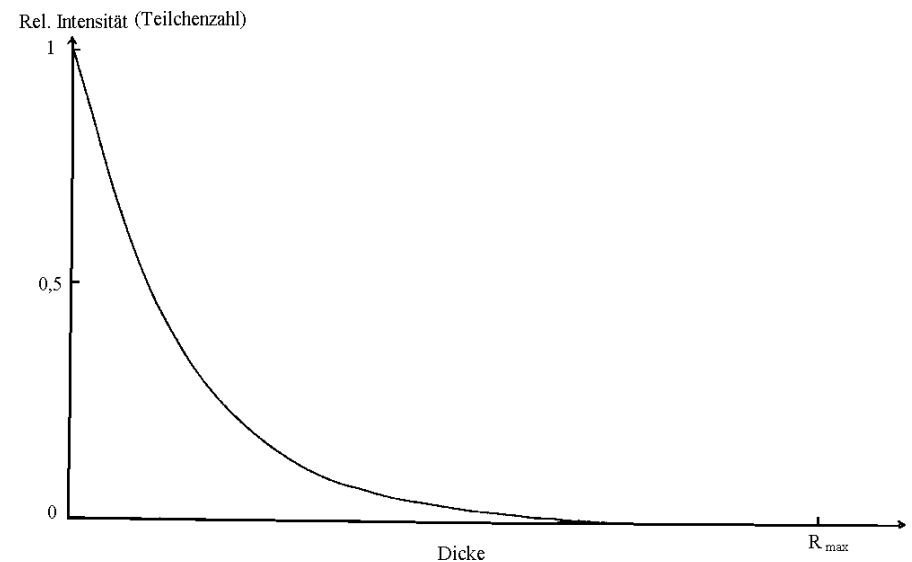
# Reichweite von $\alpha$ - und $\beta$ -Teilchen in Materie

## $\alpha$ -Teilchen



annähernd gleiche Reichweite für  $\alpha$ -Teilchen gleicher Energie (R = mittlere Reichweite)

## $\beta$ -Teilchen

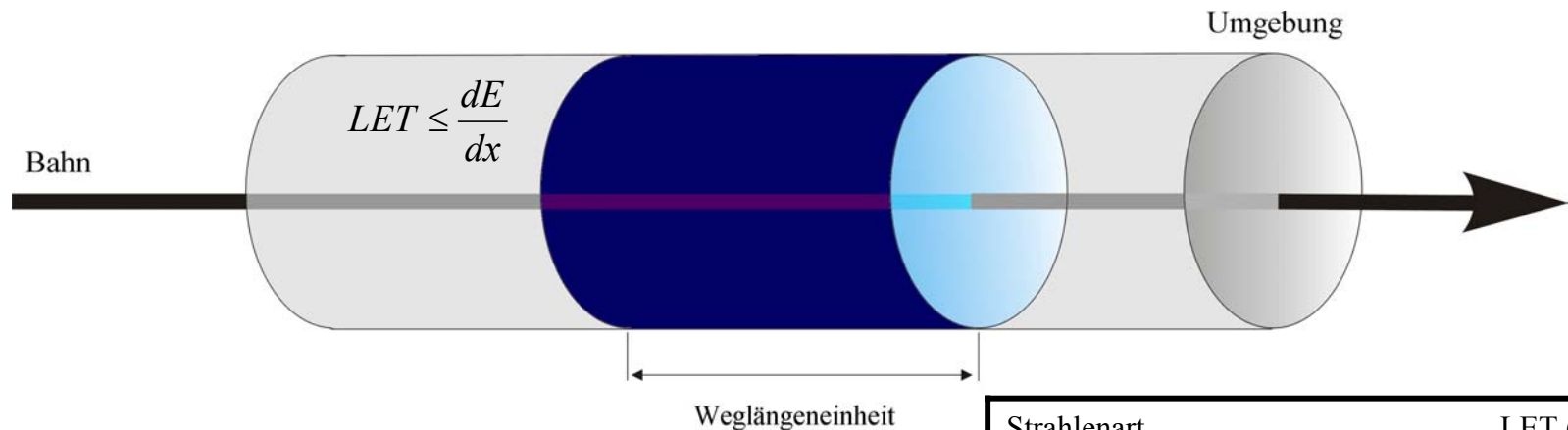


Exponentielle Abnahme der rel. Intensität mit der Eindringtiefe ( $R_{max}$  = größte Reichweite)

# Das LET-Konzept

**Die räumliche Verteilung der Energiedeposition spielt eine wichtige Rolle für die Ausprägung der Strahlenwirkung.**

Unter dem **Linearen-Energie-Transfer** versteht man die pro Weglängeneinheit in der Teilchenbahn und in der unmittelbaren Umgebung deponierte Energie.



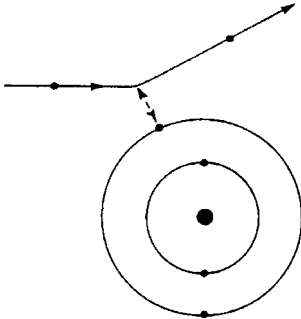
Der LET ist längs einer Teilchenbahn nicht konstant!

Strahlenart	LET (keV/ $\mu$ m)
Co-60- $\gamma$ -Strahlen	0,22
2 MeV-Elektronen	0,20
200 kV-Röntgenstrahlen	1,70
H-3- $\beta$ -Strahlen	4,70
50 kV-Röntgenstrahlen	6,30
5,3 MeV- $\alpha$ -Strahlen	43,00

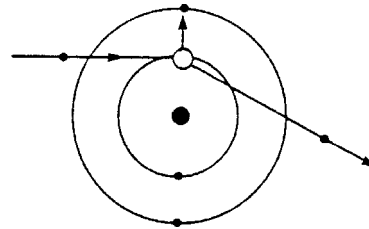
# Direkt ionisierende Teilchenstrahlung: Elektronen

## ● Wechselwirkung mit der Atomhülle (niedrige Energien)

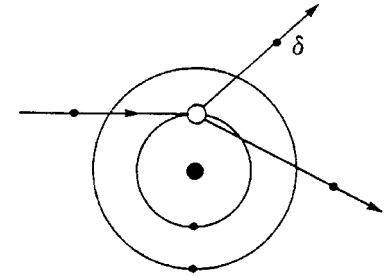
Elastische Atomstöße



Weiche Stöße (Anregung)

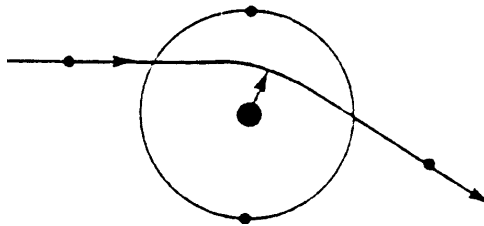


Inelastische Stöße (Ionisation)

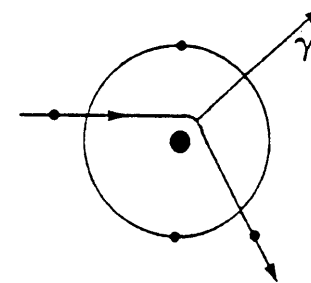


## ● Wechselwirkung mit dem Atomkern (mittlere bis hohe Energien)

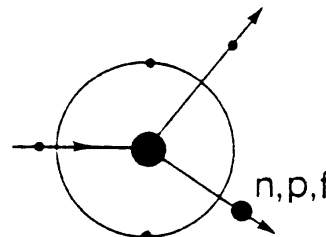
Elastische Streuung am Atomkern



Inelastische Streuung am Atomkern



## ● Kernprozesse (sehr hohe Energien)



# Direkt ionisierende Teilchenstrahlung: **Ionen**

- Elektroneneinfang (niedrige Energien)
- Wechselwirkung mit der Atomhülle (mittlere Energien)

Elastische Atomstöße

Weiche Stöße mit Atomhülle

Inelastische Stöße mit Hüllenelektronen

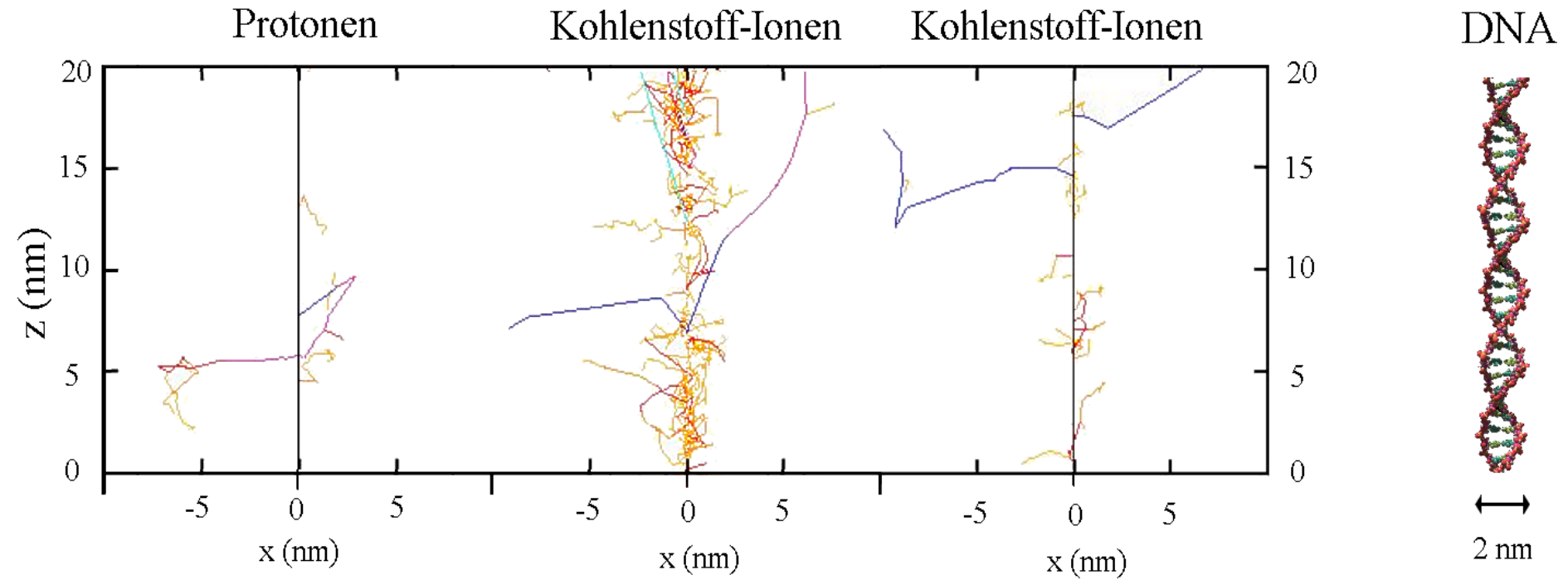
- Wechselwirkung mit dem Atomkern (hohe Energien)

Elastische Streuung am Atomkern

keine Bremsstrahlenerzeugung !!!

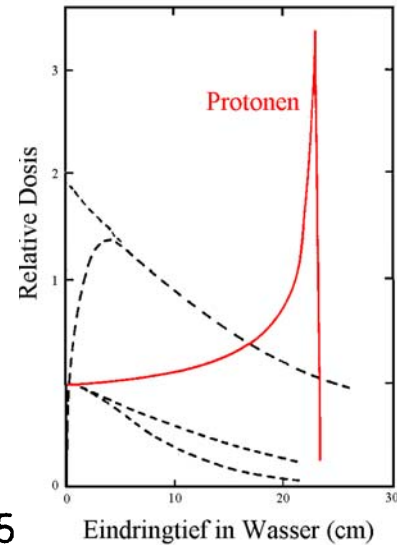
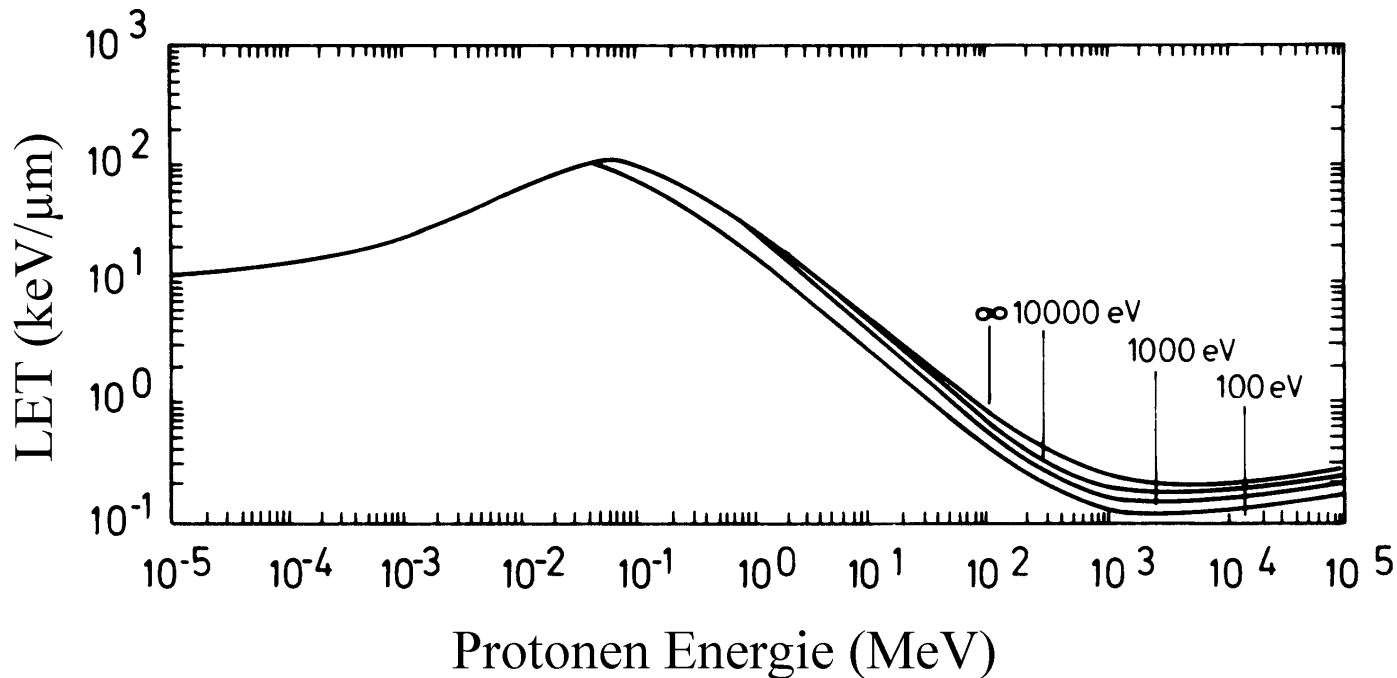
Kernreaktionen

# Ionisationsdichte entlang einer Bahnspur



Ion	$^1\text{H}$	$^{12}\text{C}$	$^{12}\text{C}$
Energie	1 MeV/u	1 MeV/u	10 MeV/u
LET (in Wasser)	25 keV/ $\mu\text{m}$	625 keV/ $\mu\text{m}$	105 keV/ $\mu\text{m}$

# Abhängigkeit des LET eines Ions von dessen Energie



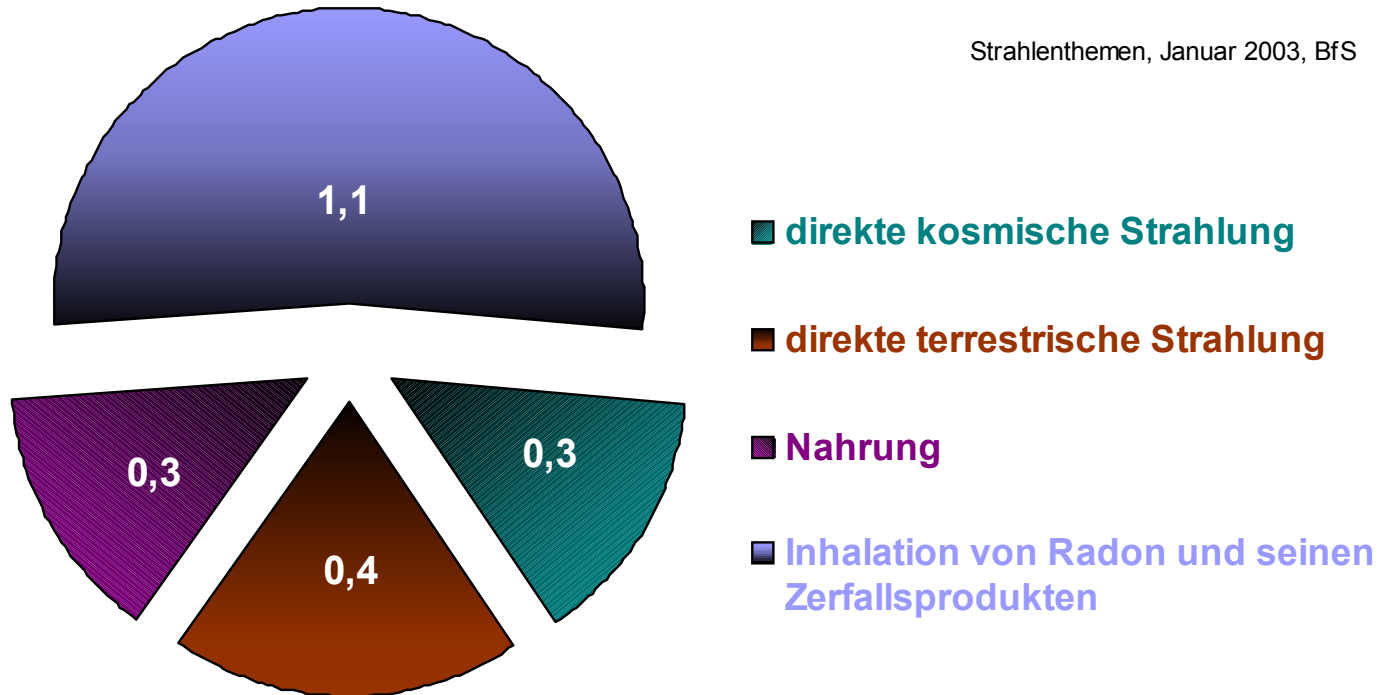
$$\bullet \text{ LET} \sim z^* 2$$

$$\bullet \text{ LET} \sim 1/v_I^2$$

# Natürliche Strahlenquellen

Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition

Strahlenthemen, Januar 2003, BfS

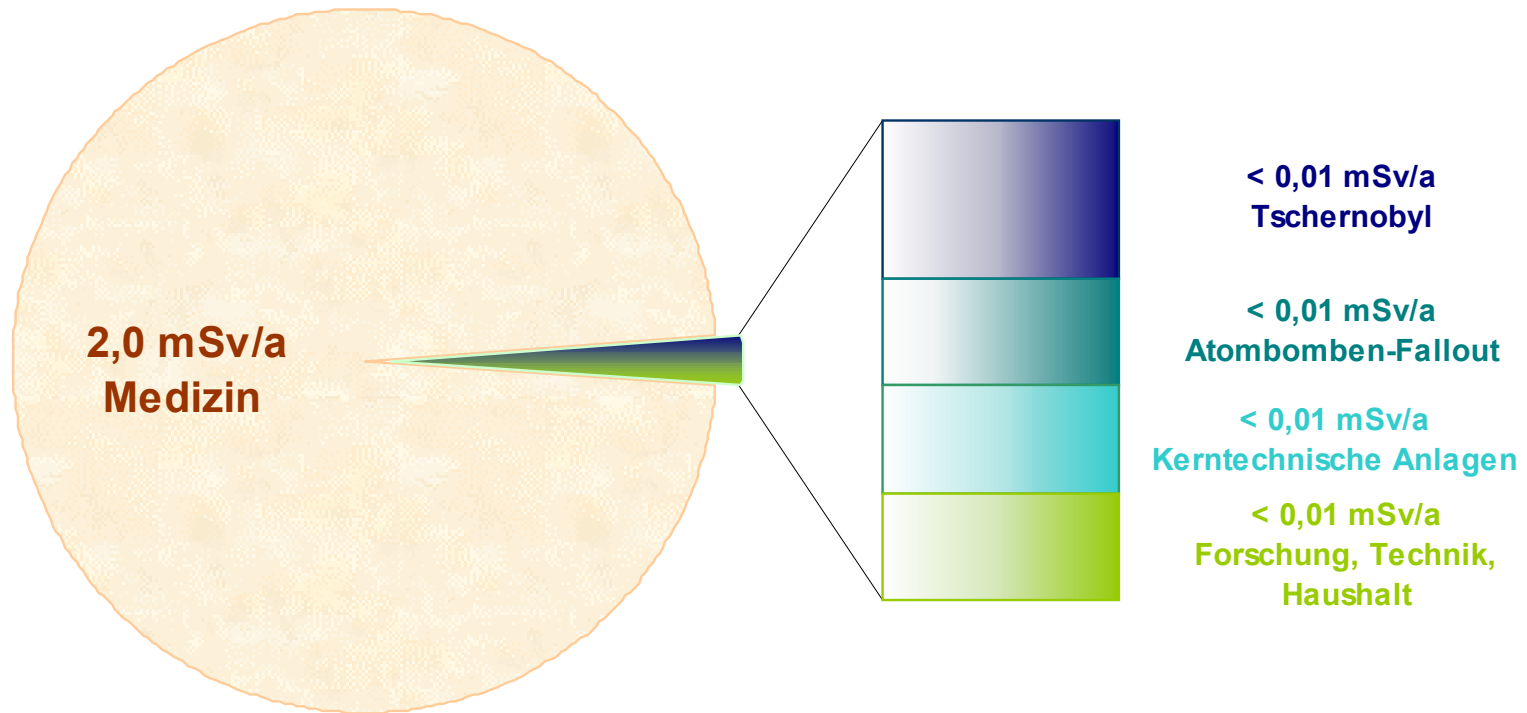


Angaben in mSv/Jahr

# Künstliche Strahlenquellen

## Zivilisatorische Strahlenexposition

Strahlenthemen, Januar 2003, BfS





# Äquivalenzdosis

## Qualitätsfaktoren (vereinfacht)

Strahlenart	q-Faktor
$\beta, \gamma, X$	1
thermische n	3
schnelle n	10
n unbekannter Energie	10
$\alpha$	20
Spaltfragmente	20
p	10

⇒ Äquivalentdosis

$$H = q \cdot D$$

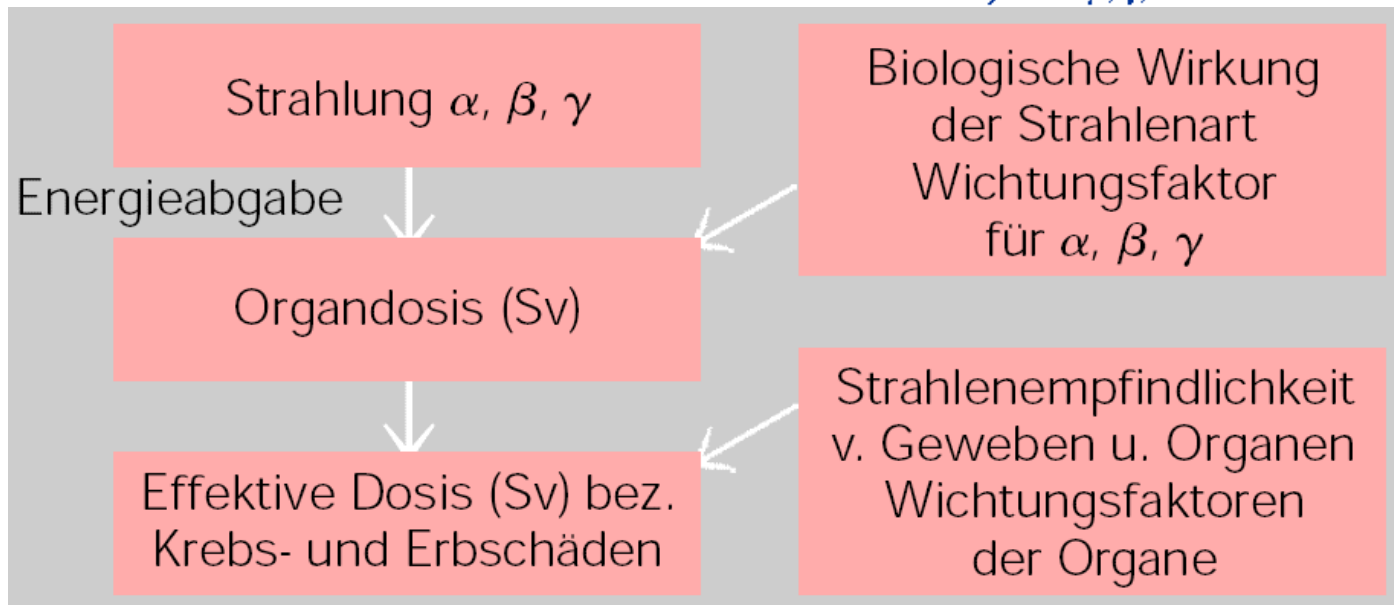
[H] = Sievert (Sv)

alte Einheit: rem (Röntgen equivalent man)

1 rem =  $q \cdot 1$  rad

1 Sv = 100 rem

1 Sv = 1 Gy bei  $\beta, \gamma, X$



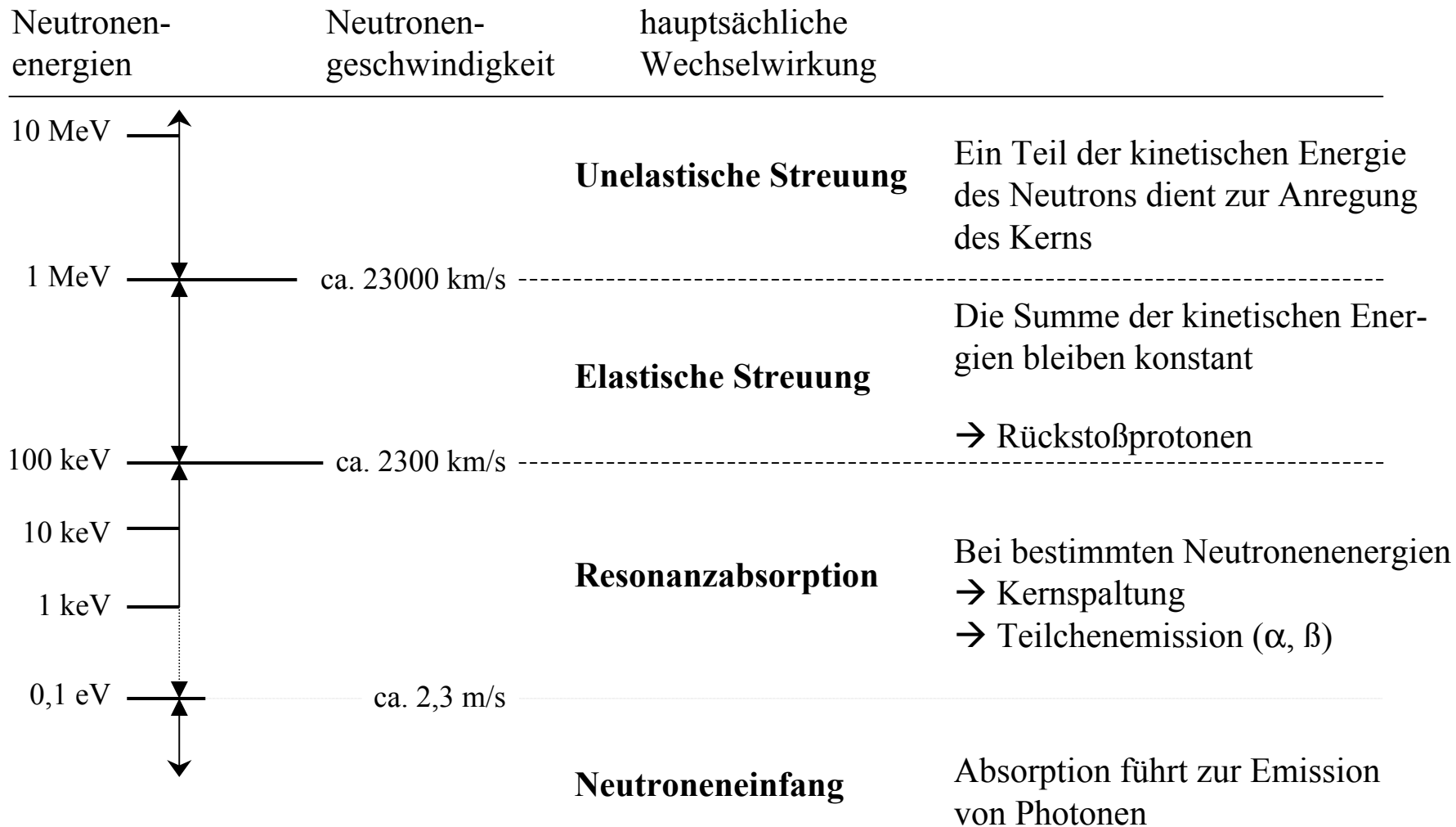
# Effektive Dosen bei verschiedenen Untersuchungsarten

(Angaben in Millisievert)

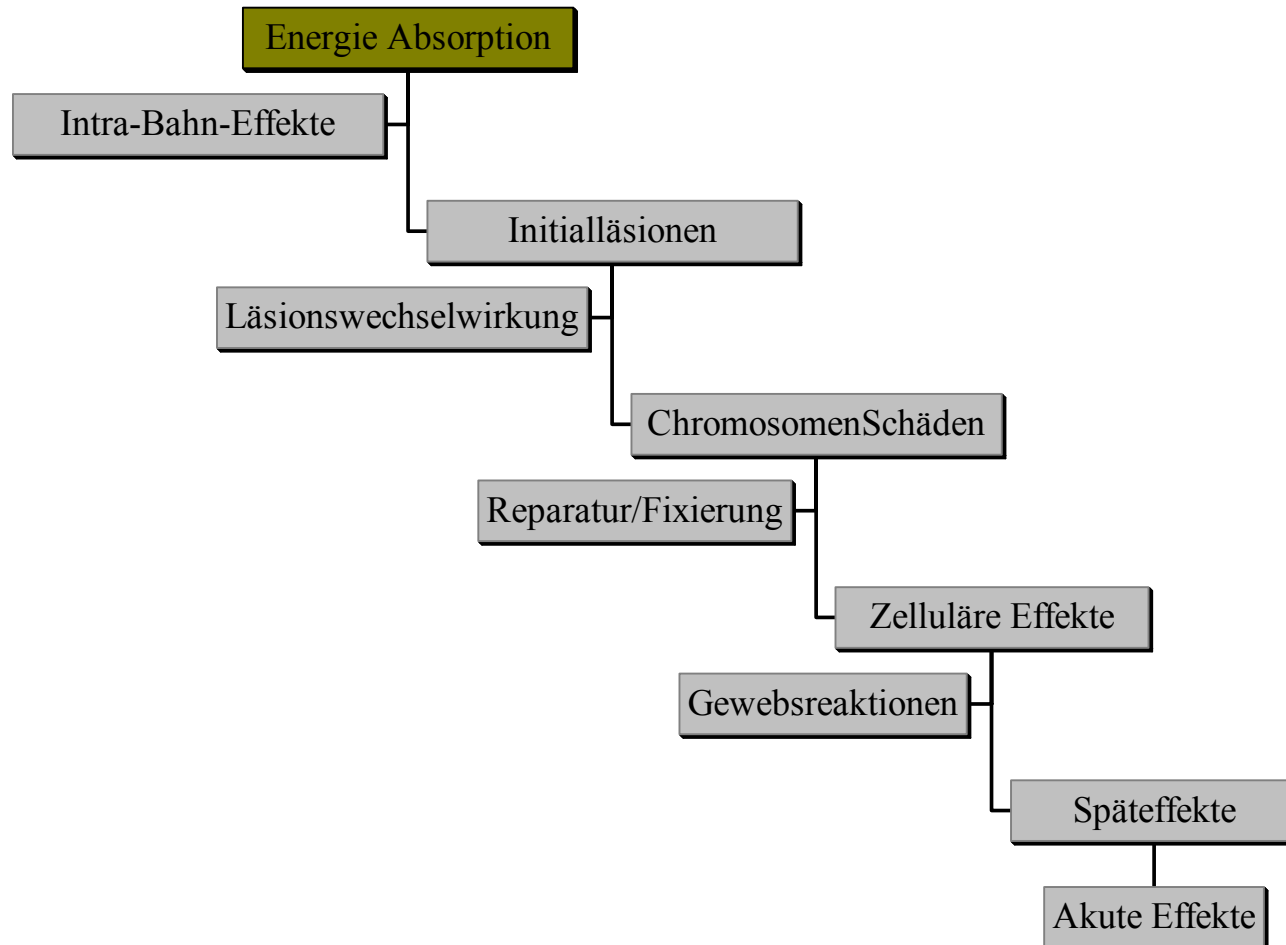
aus Strahlenthemen, März 2003, BfS

	Dosis [mSv]		Dosis [mSv]
Zahnaufnahme	0,01	Galle	4
Knochendichtemessungen	0,01	Harntrakt	5
Brustkorbaufnahme (Thorax)	0,03	Magen	10
Gliedmaßen	0,05	Darm	15
Kopf	0,1	Röntgenuntersuchung der Schlagadern	18
Hüfte	0,3		
Mammografie (Brustuntersuchung)	0,5	<b>Computertomografie (CT)</b>	
Becken	0,6	CT Schädel	3
Wirbelsäule	1	CT Wirbelsäule	7
Bauchraum	1	CT Brustkorb	10
Röntgenuntersuchung der Venen	1	CT Bauchraum	20

# Indirekt ionisierende Teilchenstrahlung

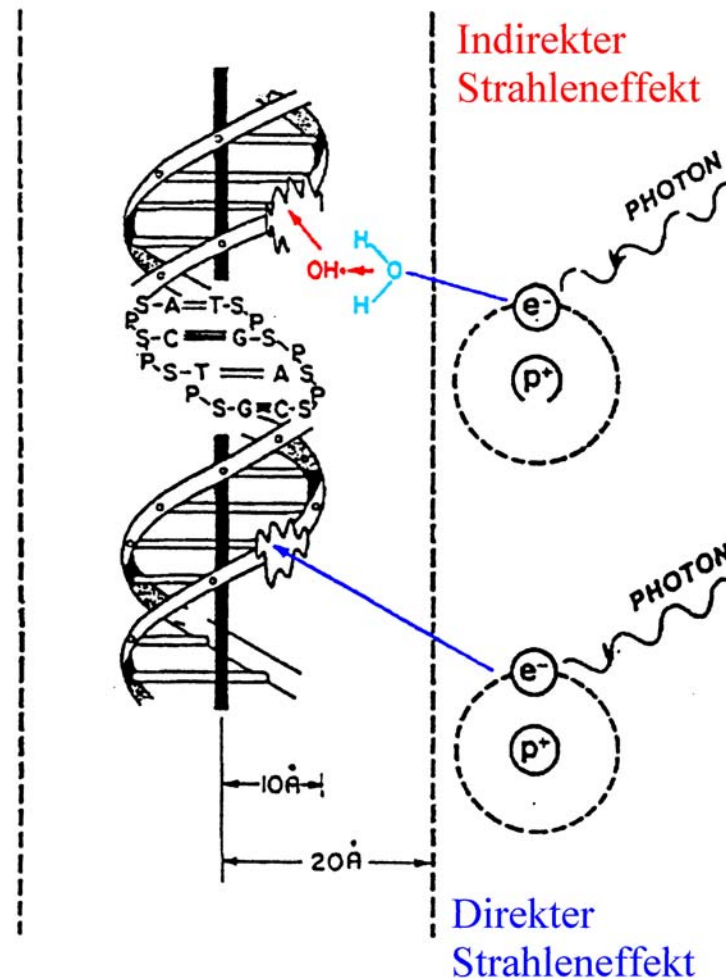


# Stationen der biologische Strahlenwirkung

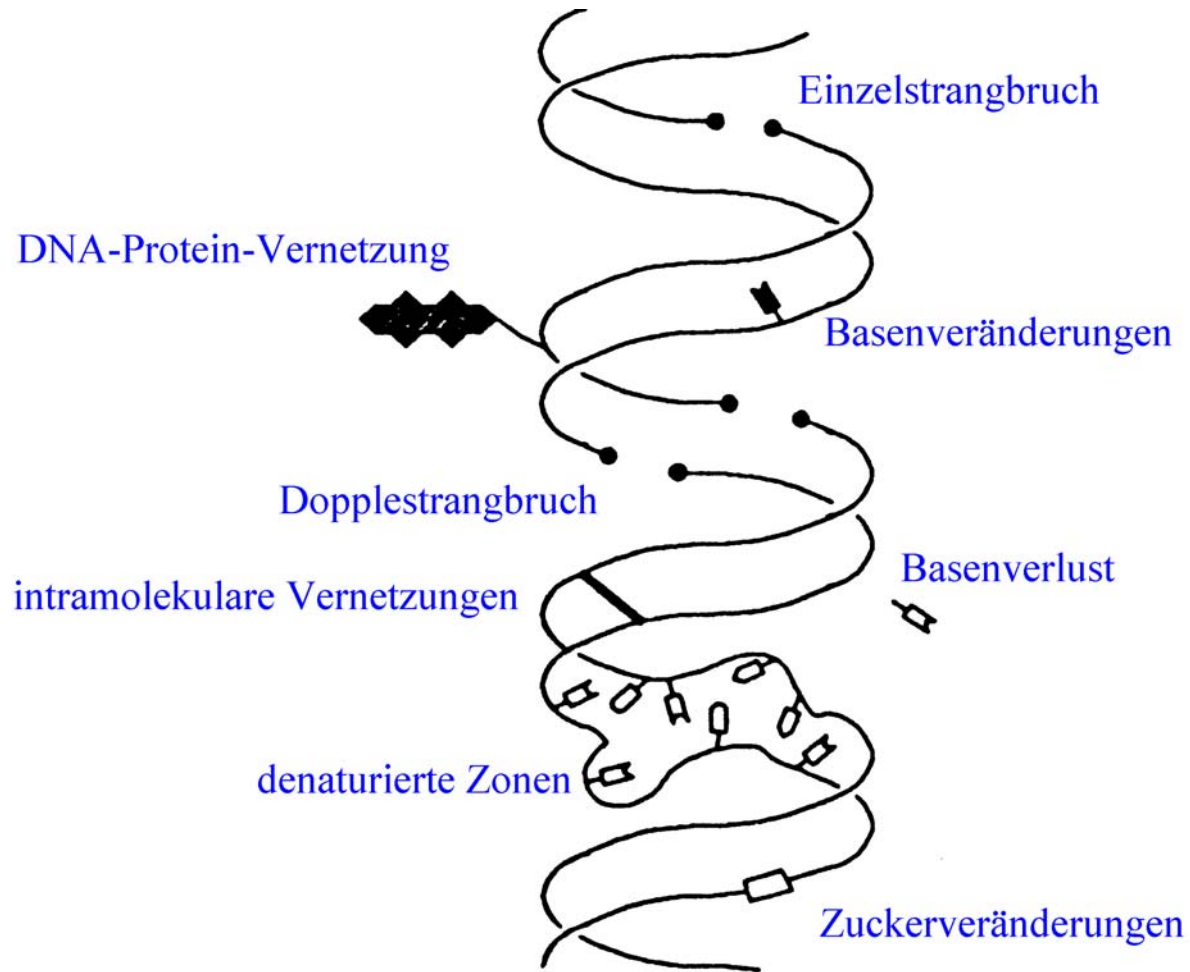


# Direkter und Indirekter Strahleneffekt

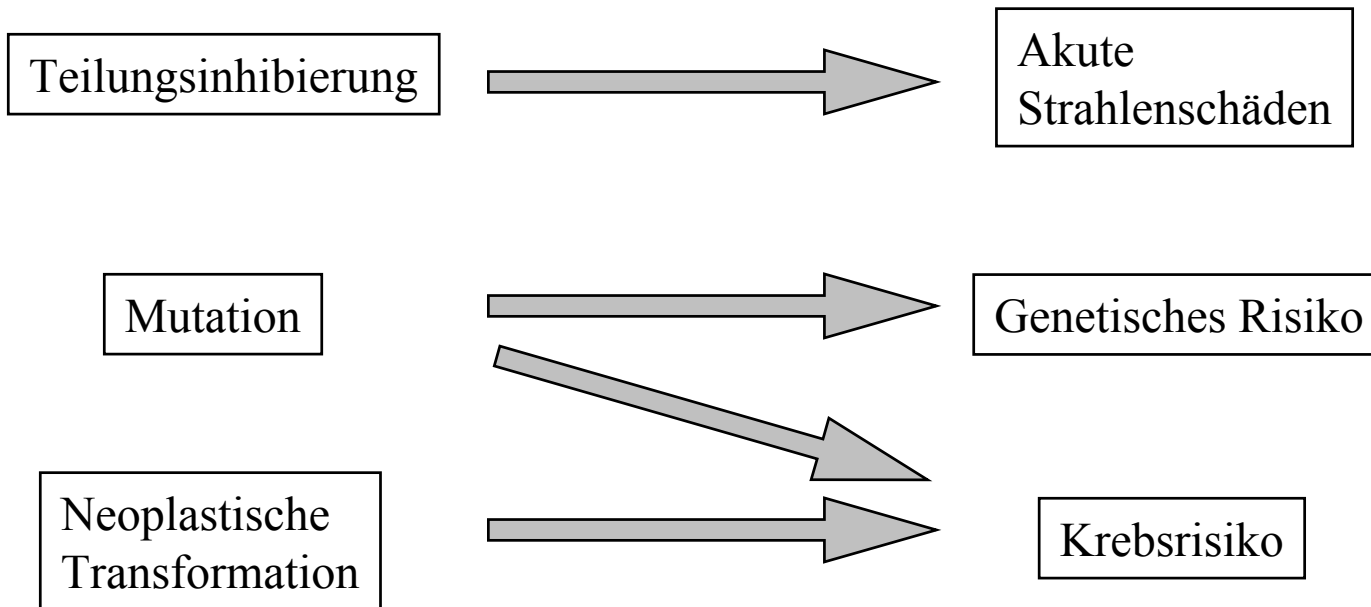
Elektromagnetische Strahlung (z.B. Röntgenstrahlung) schädigt die DNA **indirekt** durch die Erzeugung von Radikalen, aber auch **direkt**



# DNA-Schäden



# Zelluläre Strahleneffekte und Strahlenrisiko



# Strahlenwirkung auf den Menschen

## Akute Wirkungen

*Akutes Strahlensyndrom, Organdysfunktion, Augenkatarakte, Teratogene Wirkungen*

- Schadensgrad steigt mit der Dosis
- Wirkung ist deterministisch
- Schwellendosen

## Spätwirkungen

*Genetisches Risiko, Krebsrisiko*

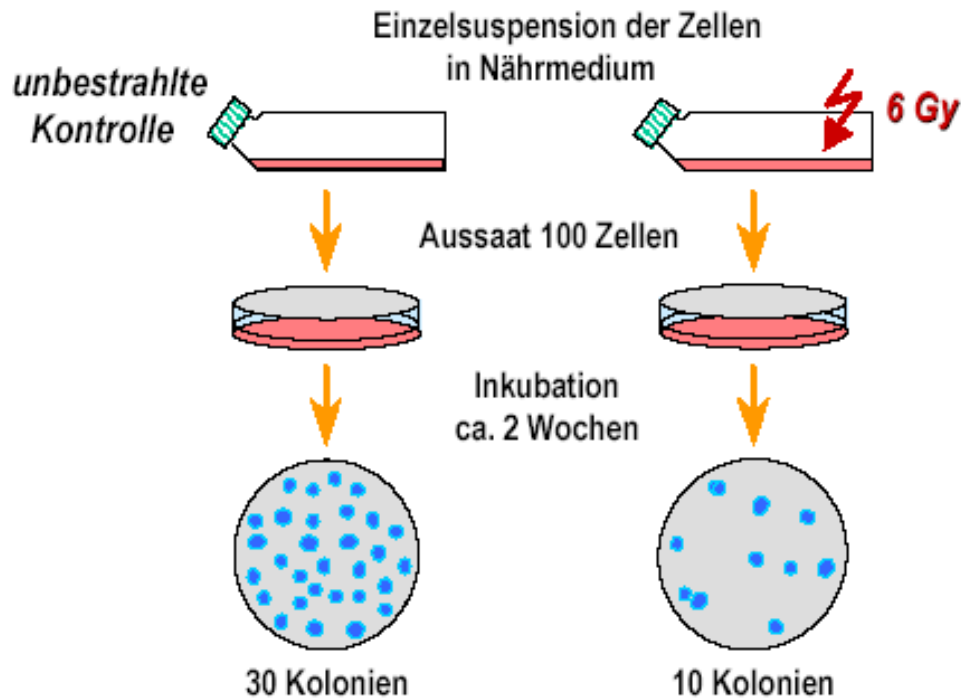
- Wahrscheinlichkeit steigt mit der Dosis
- Wirkung ist stochastisch
- Keine Schwellendosen



# Zelluläre Strahlenwirkung

- Endpunkte
  - Überleben
  - Mutation
  - Transformation
  
- Subzelluläre und molekulare Effekte
  - Chromosomenaberrationen
  - DNA-Schäden
  
- Strahlenchemie
  
- Strahlenmodifikatoren
  - Strahlensubstanzen
  - Strahlensensibilisatoren
  - Strahlenqualität, RBW
  - Zeitliches Bestrahlungsmuster
  - Reparaturprozesse
  
- Biodosimetrie

# Überleben

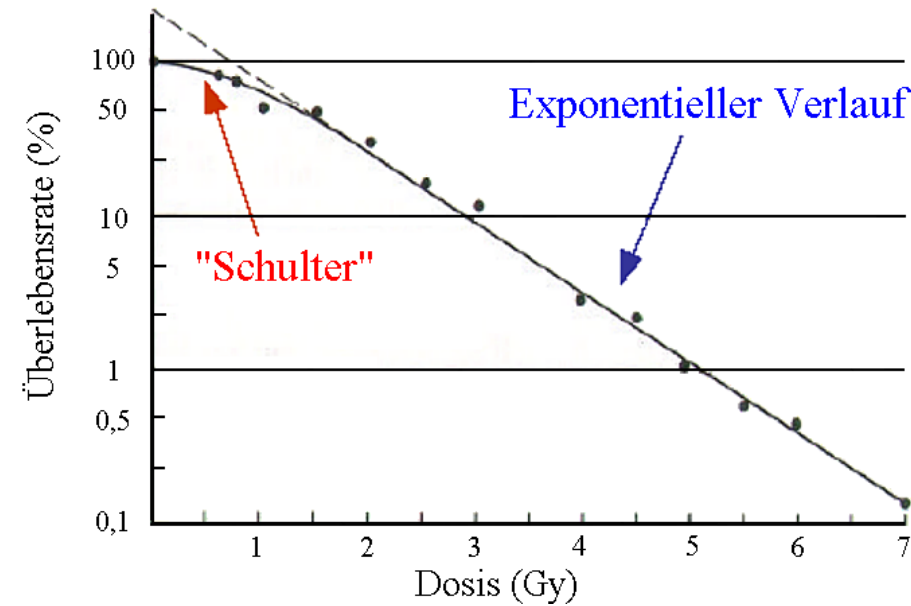


Plating Efficiency (PE)

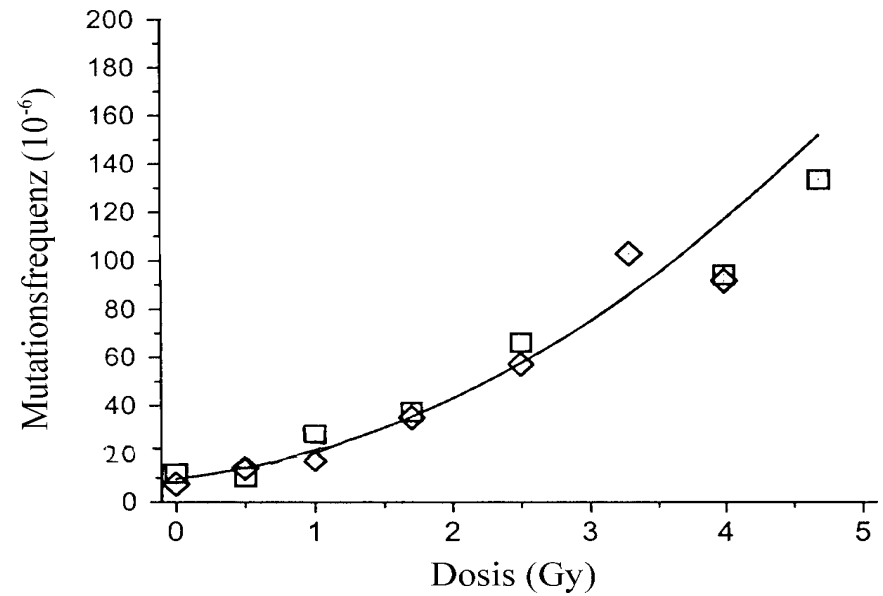
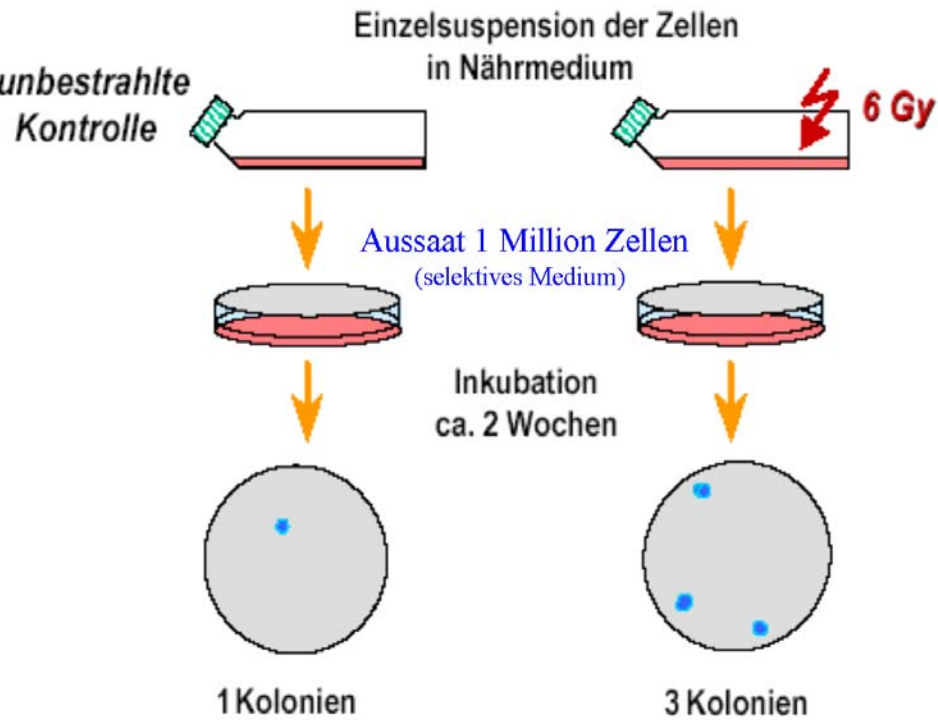
$$PE = \frac{\text{Kolonien}_{k0}}{\text{Einsaat}}$$

Überlebensrate (SF)

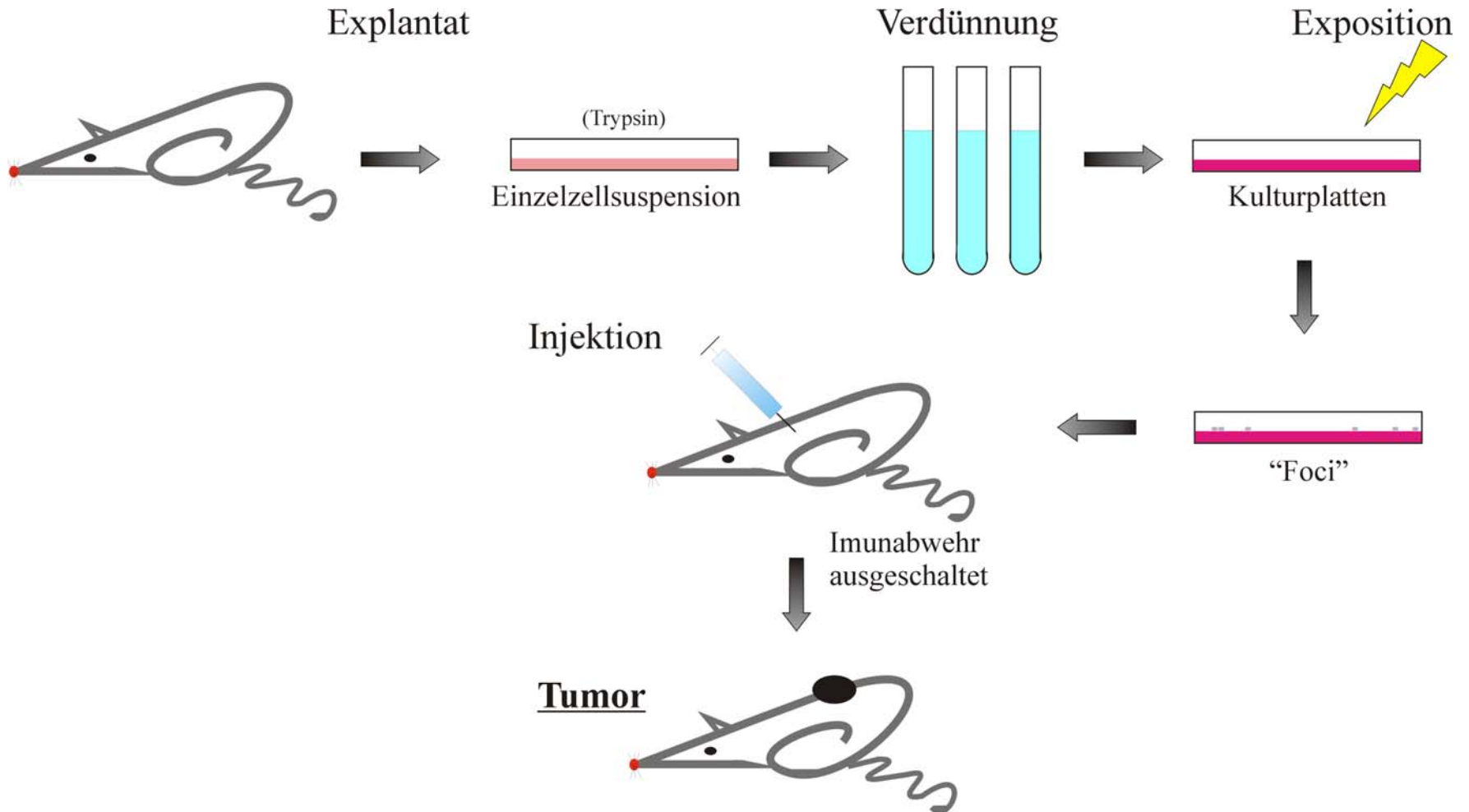
$$SF = \frac{\text{Kolonien}_{\text{bestr.}}}{\text{Kolonien}_{k0}}$$



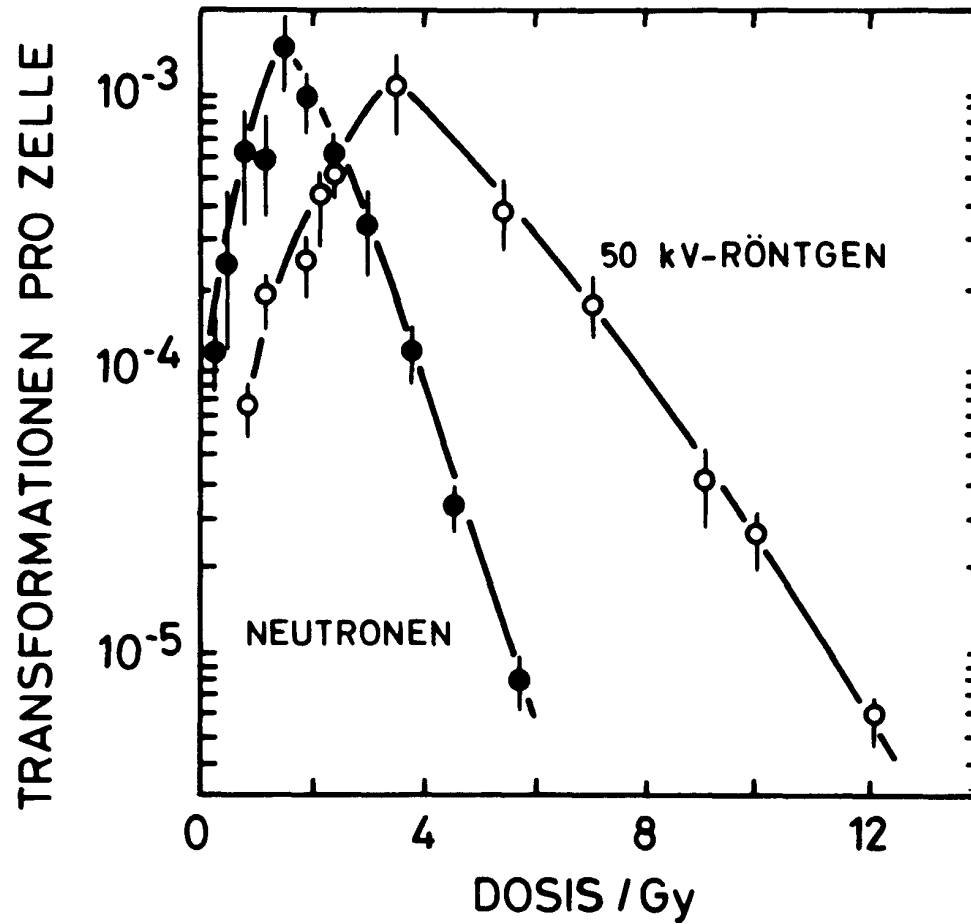
# Mutation



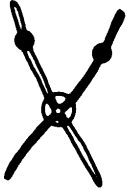



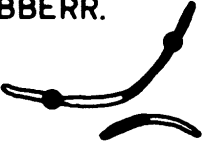



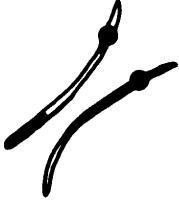

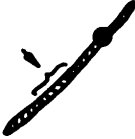
# Neoplastische Transformation



# Neoplastische Transformation in vitro



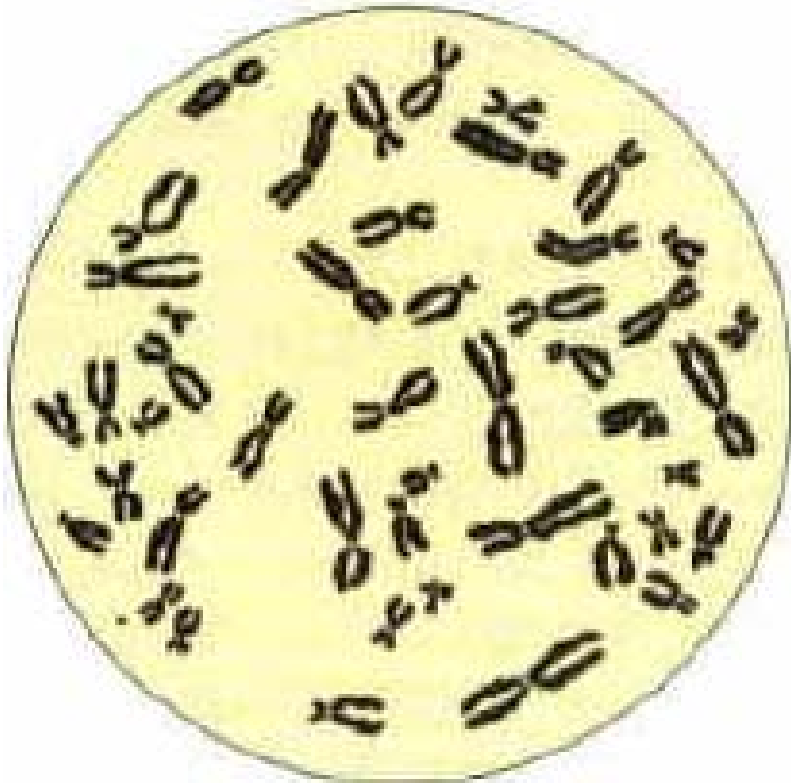
# Chromosomenaberrationen

	<p>INTER-AUSTAUSCH</p> 	<p>INTER - ARM - INTRA -AUSTAUSCH</p> 	<p>INTRA - ARM - INTRA-AUSTAUSCH</p> 	<p>" BRUCH "</p> 
<p>ASYMMETRISCH</p>	<p>DIZENTRISCHE ABBERR.</p> 	<p>ZENTRISCHER RING</p> 	<p>DELETION</p> 	<p>DELETION</p> 
<p>SYMMETRISCH</p>	<p>TRANSLOKATION</p> 	<p>INVERSION</p> 	<p>INVERSION</p> 	

# Chromosomenbilder (1)

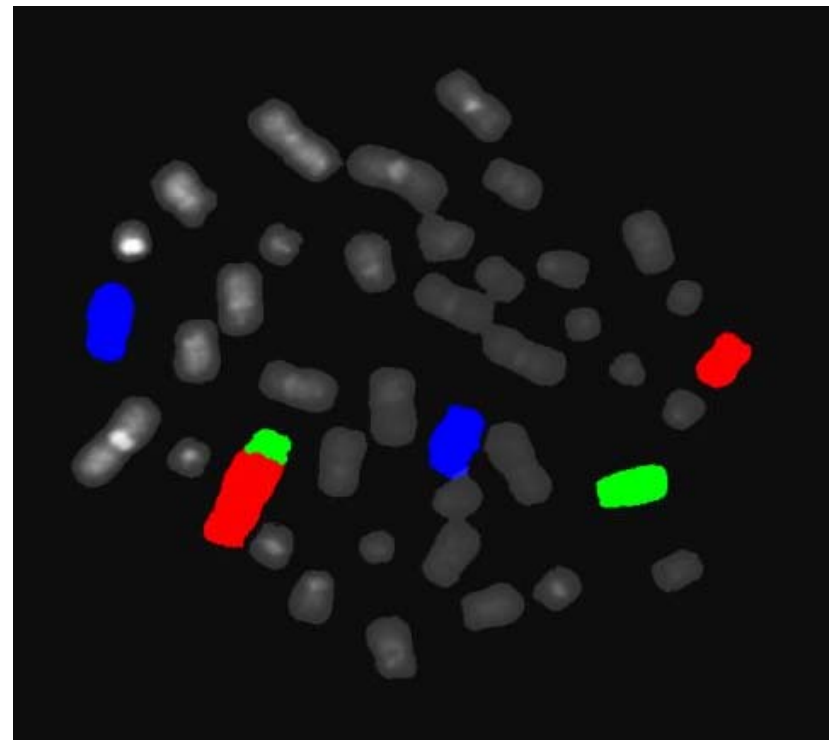
## Durchlichtmikroskopie

Giemsa-Färbung



## Fluoreszenzmikroskopie

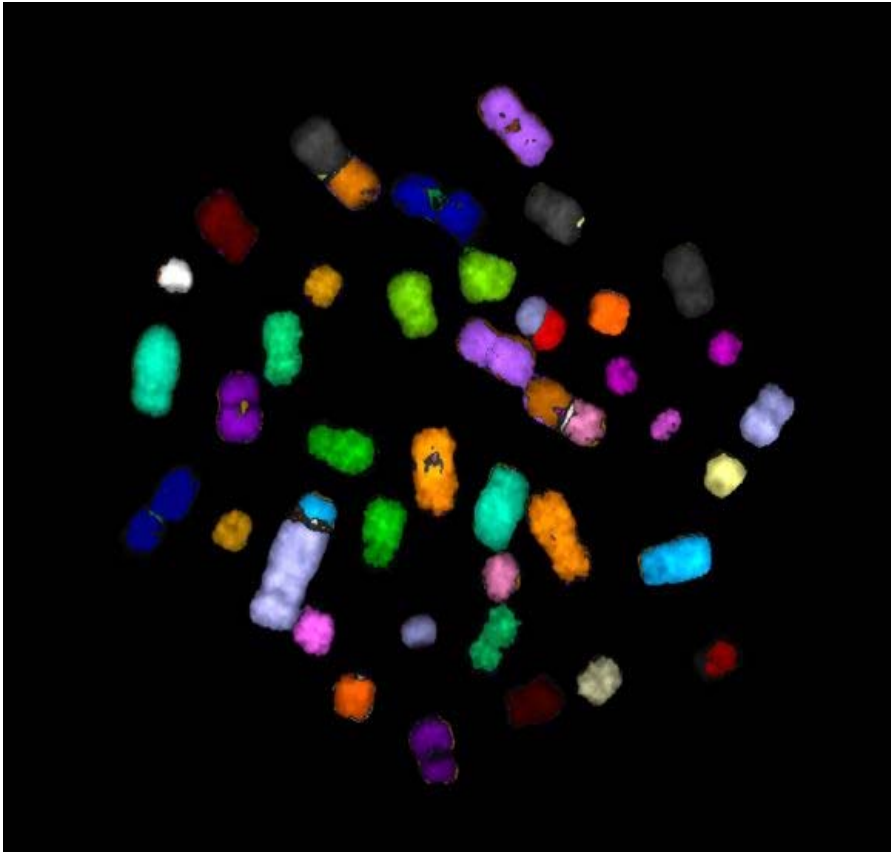
3-Farben-FISH



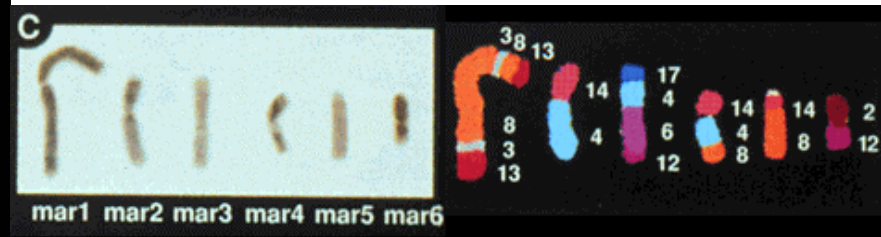
# Chromosomenbilder (2)

## Fluoreszenzmikroskopie

Vielfarben-FISH (m-FISH)



Tumormarker





# Chromosomenbilder (3)

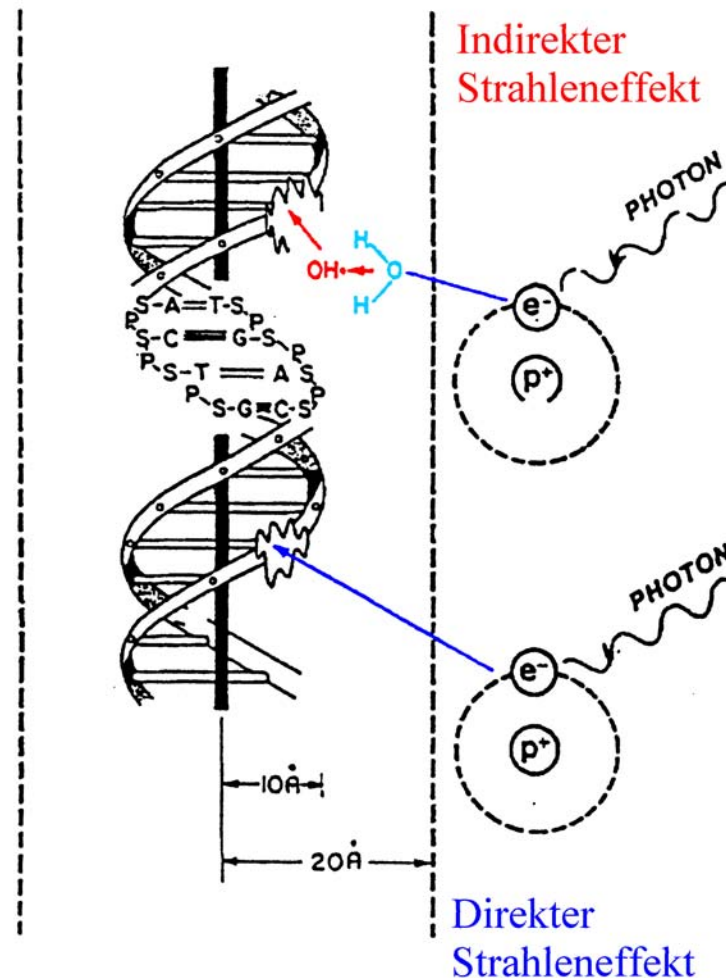
## Fluoreszenzmikroskopie

Vielfarben-FISH (m-BAND)  
zum Nachweis intra-chromosomaler Aberrationen

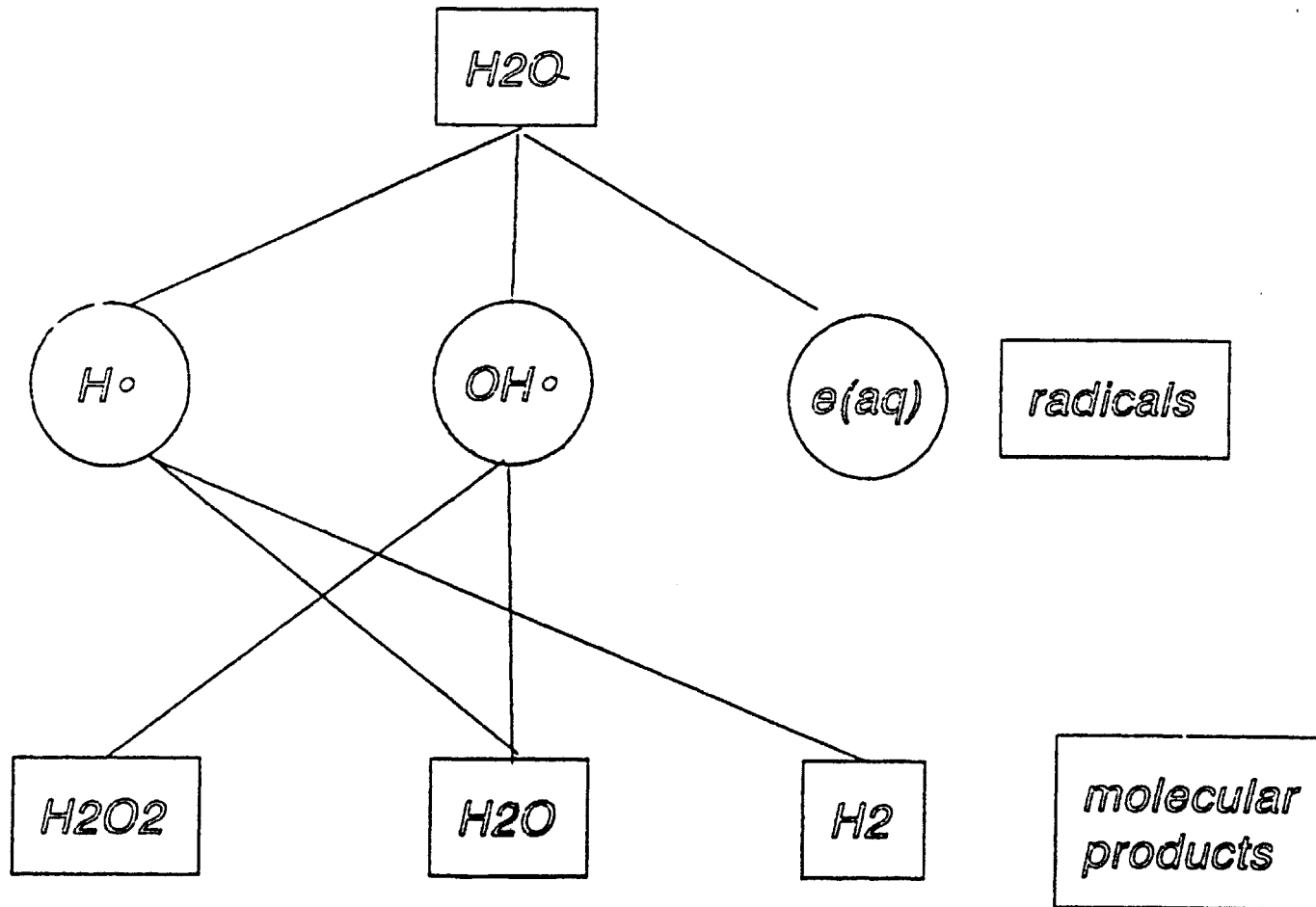


# Direkter und Indirekter Strahleneffekt

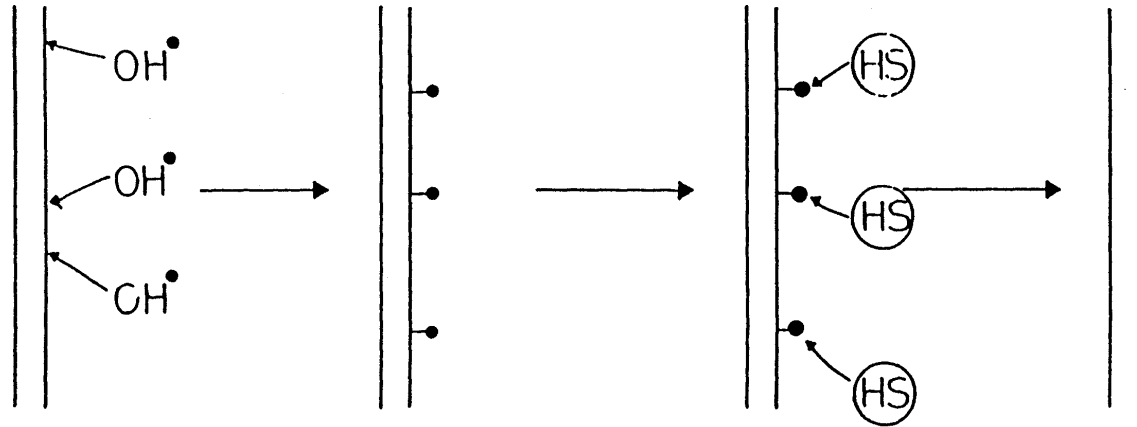
Elektromagnetische Strahlung (z.B. Röntgenstrahlung) schädigt die DNA **indirekt** durch die Erzeugung von Radikalen, aber auch **direkt**



# Radiochemie des Wasser

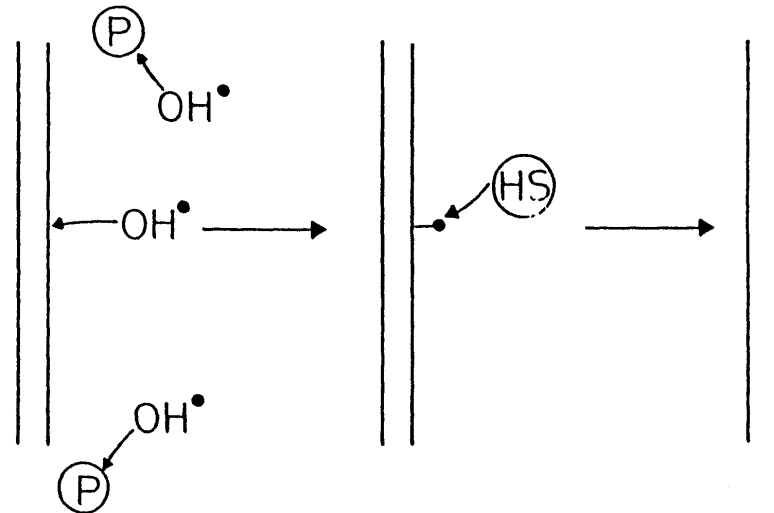


# Strahlenschutz-Substanzen



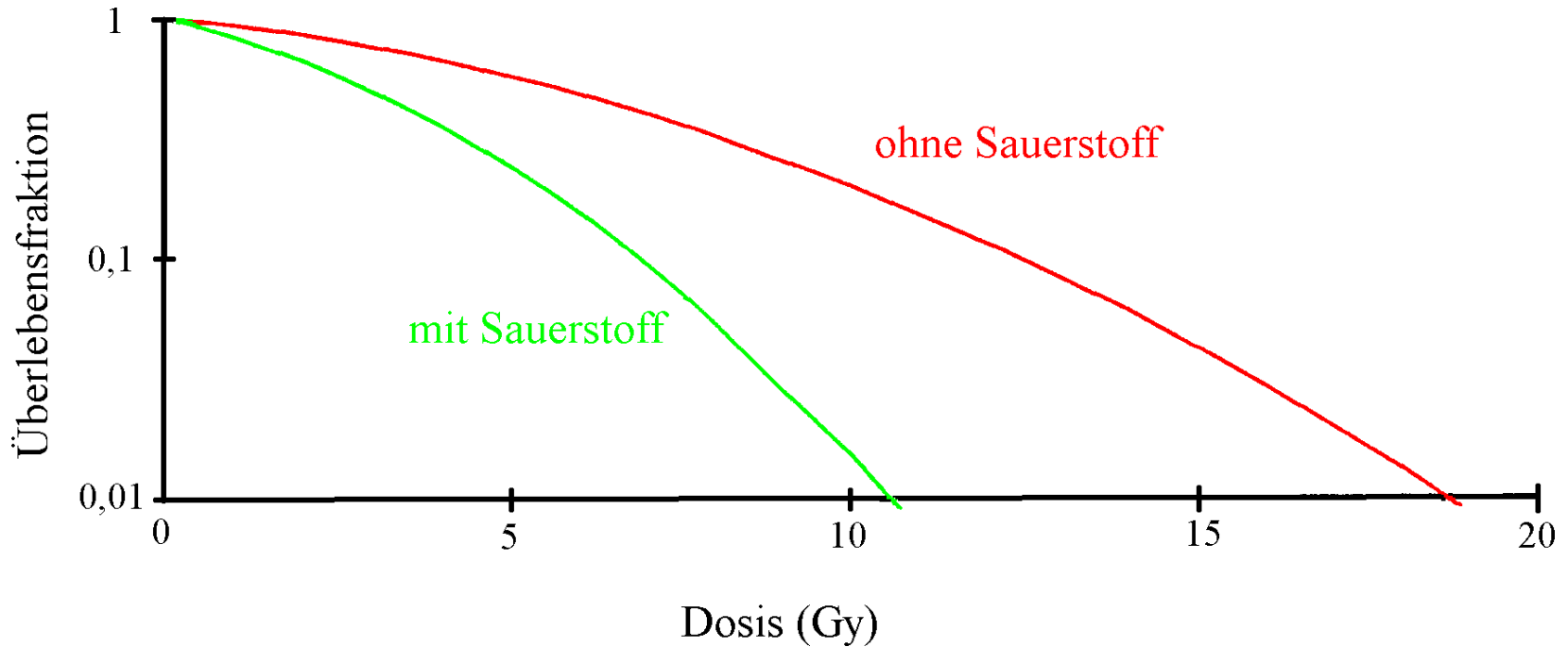
ohne  
Radikalfänger

Ⓟ : SCAVENGER  
Ⓢ : H-DONATOR

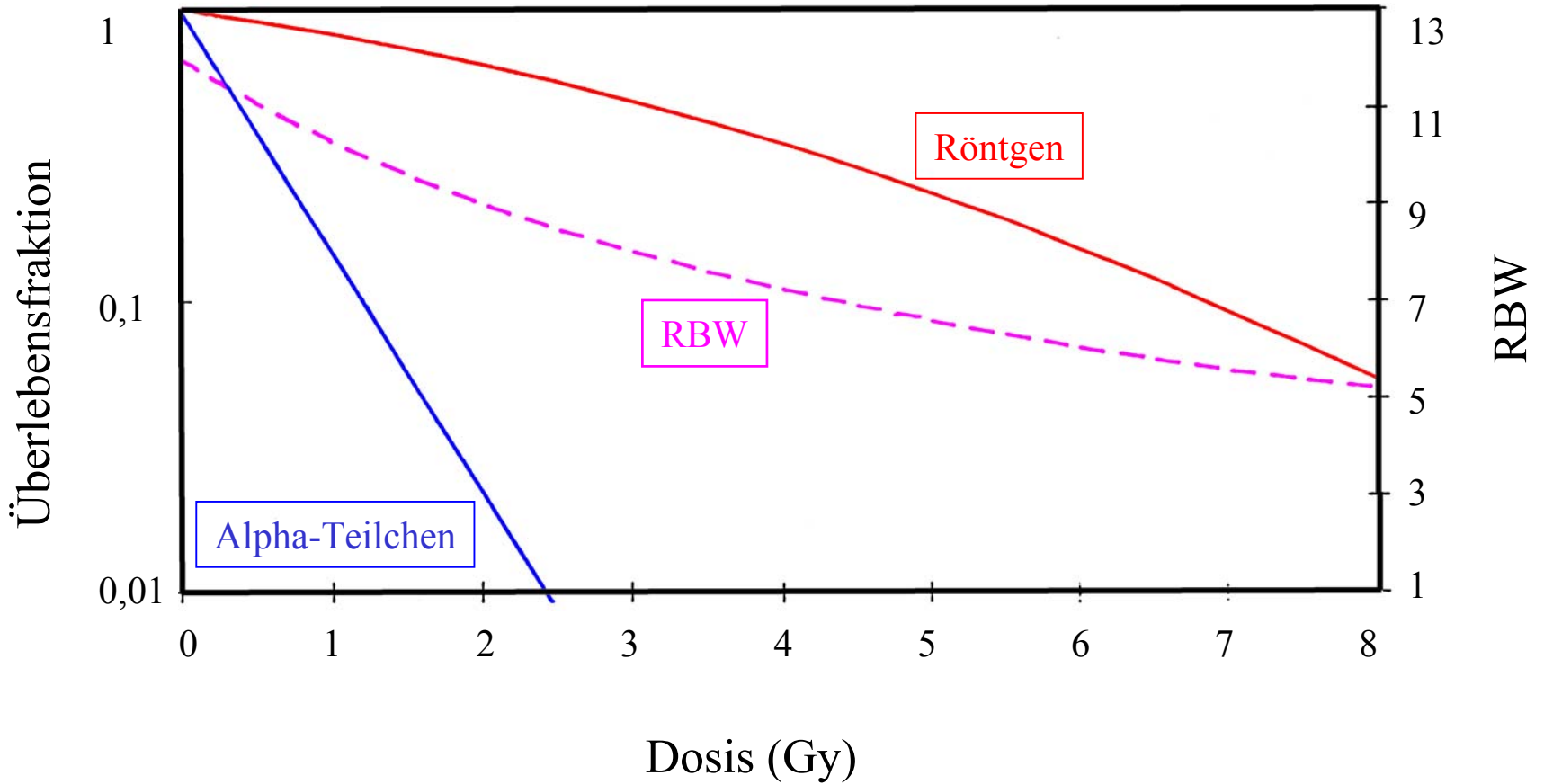


mit  
Radikalfänger

# Strahlensensibilisatoren

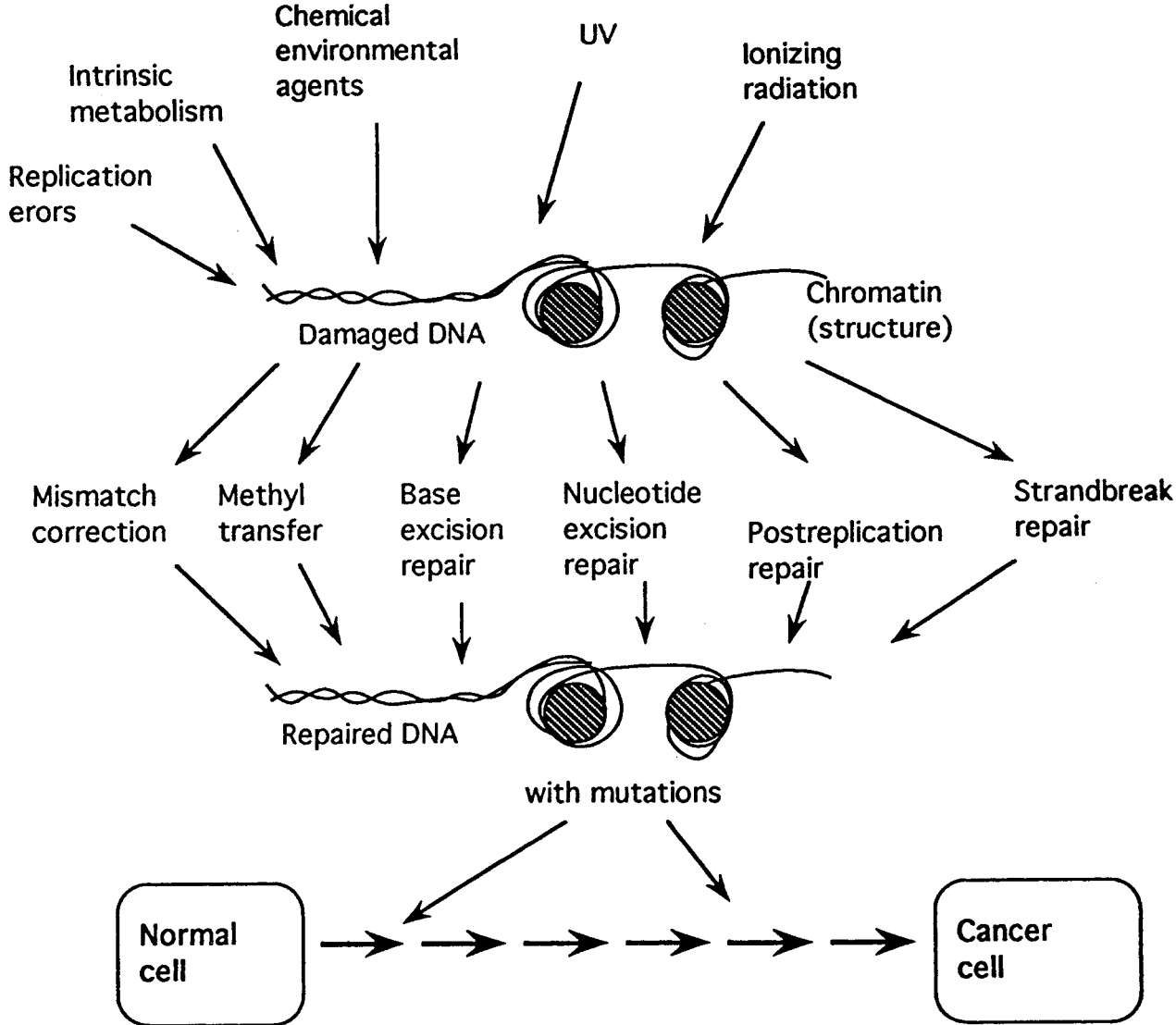


# Relative Biologische Wirksamkeit



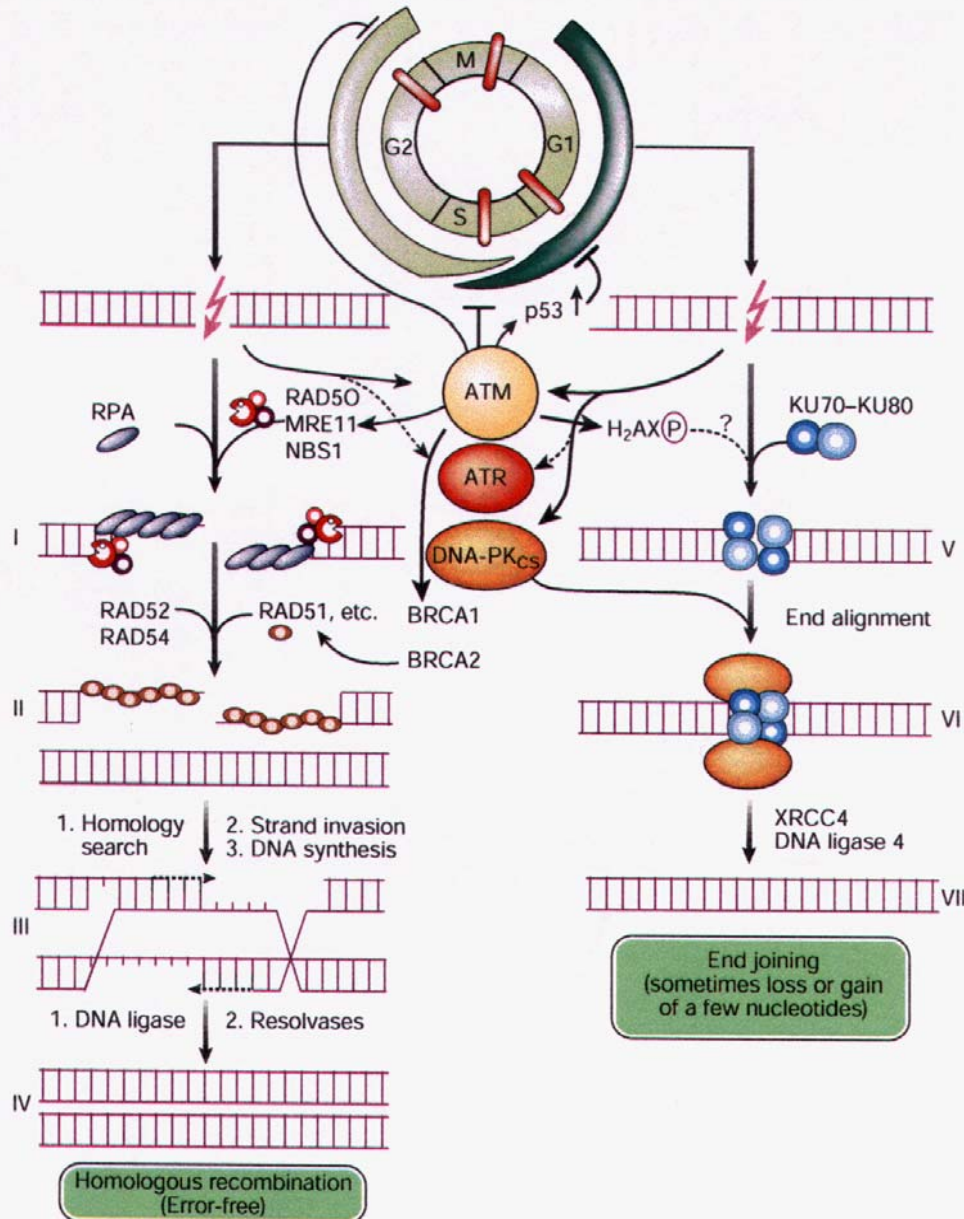


# Reparaturmechanismen





# DNA-Doppelstrangbruch-Reparatur



# Menschliche Erbkrankheiten mit Reparaturdefizienzen

Name	Klinik	Krebsanfälligkeit	Zelluläre Charakteristika
Xeroderma pigmentosum	Lichtüberempfindlichkeit, oft neurologische Defekte	+++	Übersensibel gegen UV, defekt in Exzisionsreparatur, 9 Komplementation Gruppen
X. p. Varianten	ähnlich wie X. p.	++	UV-überempfindlich, Defekte in der DNS-Replikation
Ataxia telangiectasia	cerebrale Ataxie, Telangiectasie, Überempfindlichkeit gegen ionisierende Strahlen	+++	Überempfindlich gegen ionisierende Strahlen, normale Strangbruchreparatur, Wechselwirkung mit p53
Fanconi Anämie	Wachstumsretardation, erhöhte Leukämieinzidenz	+	hohe Rate spontaner Chromosomenbrüche
Blooms Syndrom	Lichtüberempfindlichkeit, Wachstumsretardation, hohe Krebsanfälligkeit	+++	Defekte in Bruchligation, spontane Chromosomenaberrationen
Cockayne Syndrom	Zwergwuchs, mentale Retardation, vorzeitiges Altern	(+)	UV-Sensibilität
Retinoblastom	Augenkrebs	+++	partielle Sensibilität gegen ionisierende Strahlen