

6) Strahlenschutz (1)

Strahlenexposition der Bevölkerung

Mittlere natürliche Strahlenexposition (in mSv pro Jahr)		
	Gesamtexposition	Genetisch wirksame Exposition
Kosmische Strahlung	0,30	0,30
Terrestrische Strahlung	0,45	0,33
Aufenthalt im Haus	1,00	0,17
Körperinnere Bestrahlung	0,25	0,30
gesamt	2,00	1,10
Mittlere zivilisatorische Strahlenexposition (in mSv pro Jahr)		
Medizin	1,50	0,50
Technik, Forschung	< 0,02	< 0,02
Beruf	< 0,01	< 0,01
Fall-Out	0,02	0,02
Kerntechnische Anlagen	< 0,01	< 0,01
gesamt	< 1,56	< 0,56

77

6) Strahlenschutz (2)

Unterschiede in der terrestrischen Strahlung (in mSv pro Jahr)

Schleswig-Holstein	0,14
Harz	1,02
Bayerischer Wald	1,46
Kaiserstuhl	1,60
Katzenbuckel (Mosbach)	6,30
Menzenschwand (Schwarzwald)	18,00
Kerala (Indien)	26,00
Brasilien (Atlantikküste)	87,00
Aufenthalt in Gebäuden	
Holzhäuser	bis zu 0,60
Betonbauten	bis zu 3,00

78

6) Strahlenschutz (3)

Beiträge medizinischer Untersuchungen (in mSv)

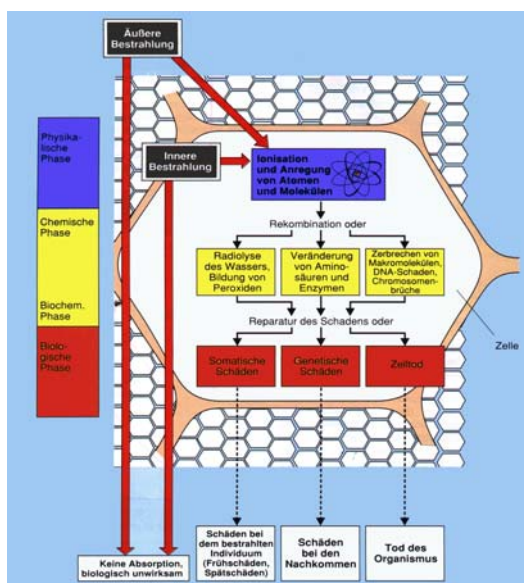
Röntgen		Nuklearmedizin mit ^{99m}Tc	
Zahnaufnahme	0,01 mSv	Nierenfunktionsuntersuchung	1,3 mSv
Thoraxaufnahme	0,03 mSv	Hirnerfusion	2,0 mSv
Mammographie	0,50 mSv	Myocardiagnostik	3,0 mSv
Galle	4,00 mSv	Schilddrüse	1,0 mSv
Harntrakt	5,00 mSv	Leberszintigraphie	4,0 mSv
		Skelettuntersuchung	4,5 mSv
CT Schädel	3 mSv		
CT Brustkorb	10 mSv		
CT Bauchraum	20 mSv		

Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz 2002 79

6) Strahlenschutz (4)

Strahlenwirkung in biologischem Material (Zellen)

3-Phasen-Modell der biologischen Wirkung radioaktiver Strahlung:



80

6) Strahlenschutz (5)

Direkte Wechselwirkungen mit entsprechenden Molekülen

Aminosäuren: Desaminierung, Ringbruch, Oxidation

Nukleinsäuren: Kettenbrüche
15 bis 29 eV für Einzelstrangbrüche
100 bis 200 eV für Doppelstrangbrüche

Indirekte Wechselwirkungen mit entsprechenden Molekülen („indirekter Effekt“)

- Wasser ist das weitaus häufigste Molekül in der Zelle ($\approx 70\%$)

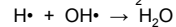
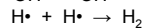
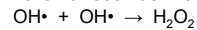
- Primärprozess am Wasser (Dauer: 10^{-18} bis 10^{-12} s)
Radiolyse: $\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + e^-$ Energieeintrag 12,56 eV

- Folgereaktionen (vereinfacht):
- Zerfall von H_2O^+ in ein OH^\bullet Radikal $\text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^\bullet$
- OH^\bullet ist Hauptradiolyseprodukt, besitzt stark oxidierende Wirkung
- freiwerdendes Elektron hat zwei Möglichkeiten



- 3 wichtige Radiolyseprodukte: $e^-_{(\text{aq})}$, H^\bullet (reduzierend) und OH^\bullet (oxidierend)

- Rekombination der Radikale untereinander



- Reaktionen der Radikale mit organischen Molekülen

81

6) Strahlenschutz (6)

Biologische Reparaturprozesse

Bedeutung der Reparaturprozesse

- über Strahlenwirkung hinausgehendes Phänomen
- Reparatur von Schäden aus unvollkommenen biologisch/biochemischen Reaktionen
- Ursache können nichtionisierende und ionisierende Strahlung oder chemische Noxen sein
- wichtig gerade im Bereich relativ niedriger Dosen
- Bedeutung für die Konstanzhaltung des genetischen Materials und Evolution durch Mutation

Dauer

- Reparaturprozesse sind relativ langsam (0,5 bis 1 Stunde)
- wird bei Strahlentherapie ausgenutzt (Regenerationsintervalle, fraktionierte Bestrahlung)
- hohe Dosisleistung wirkt anders als niedrige bei gleicher Dosis

Reparaturmechanismen

- Ausnutzung unterschiedlicher Energieformen (Licht = Photoreparatur, ATP = Dunkelreparatur)
- Prä- und postreplikative Reparaturen
- fehlerhafte und fehlerfreie Reparaturen

82

6) Strahlenschutz (7)

DNA- Schäden

Basenschäden

- Hauptstrahlenschäden an den Basen (Basenverlust, Desaminierung, Hydroxylierung, Ringbruch, Dimerisierung (bevorzugt Thymin-Dimere))
- Basenveränderungen (falsche messenger RNA, Strahlenschutz durch Konkurrenzreaktionen, z.B. S-haltige Verbindungen, OH-Gruppen, Reparaturprozessen zugänglich)
- Hauptwirkung der UV-Strahlung

Einzelstrangbruch

- durch direkte und indirekte Treffer verursacht, nicht durch UV-Strahlung mit biologisch relevanten Dosen
- Größe des Effekts von Sauerstoff-Anwesenheit abhängig („oxygen enhancement ratio“, OER), Reparatur möglich
- Einzelstrangbrüche können zu Doppelstrangbrüchen führen, wenn sie dicht beieinander liegen (4 Basen)

Doppelstrangbruch

- durch direkte und indirekte Treffer verursacht, nicht durch UV-Strahlung mit biologisch relevanten Dosen
- Größe des Effekts von Sauerstoff-Anwesenheit abhängig („oxygen enhancement ratio“, OER)
- nicht reparierbar
- Letalität oder Mutationen

83

6) Strahlenschutz (8)

Reparaturprozesse in Zellen

Excisionsreparatur (Ausschnittreparatur)

- präreplikative Dunkelreparatur, Kontrolle am Komplementärstrang
- Entfernung einzelner Basen: Basen-Excision
- Entfernung von Basen + Zucker + Phosphatgruppen + benachbarter Nukleotide : Nukleotid-Excision

Strangbruchreparatur

- präreplikative Dunkelreparatur
- arbeitet fehlerfrei

Photoreparatur

- präreplikative Lichtreparatur
- nur in Zellen, die vom Licht erreicht werden (Haut), in allen Organismen außer Placenta-Säugetieren vorhanden
- zerlegt Pyrimidindimere in Monomere
- Enzym Photolyase absorbiert zwischen 300 und 600 nm (wenn an DNA angelagert)
- arbeitet fehlerfrei

Rekombinationsreparatur

- postreplikative Dunkelreparatur, Replikation hat schadhaften Strang hinterlassen
- Fehler wird durch Strangaustausch beseitigt
- arbeitet fehlerfrei

SOS-Reparatur

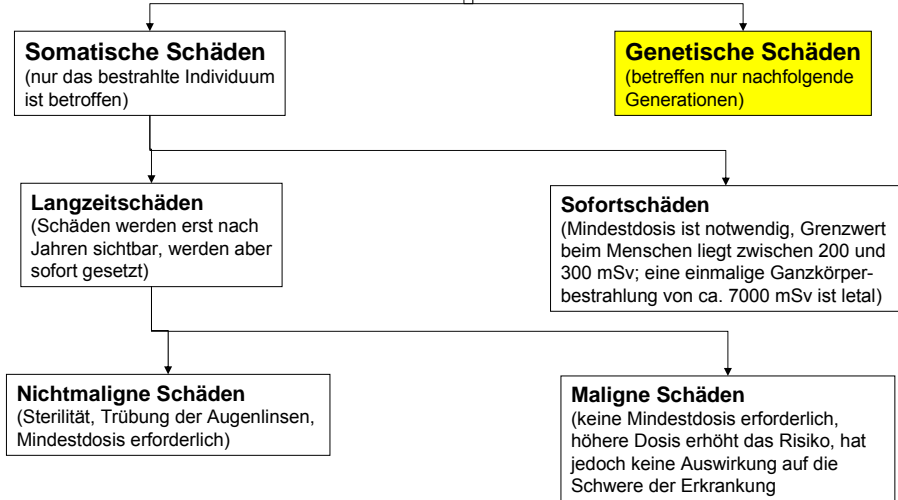
- präreplikative Dunkelreparatur mit außerordentlich komplexen Mechanismus
- nach Replikation verbliebene Stranglücke wird durch Neusynthese geschlossen
- arbeitet fehlerhaft

84

Fazit: Reparaturprozesse können Strahlenrisiko verringern, aber nicht ausschalten

6) Strahlenschutz (9)

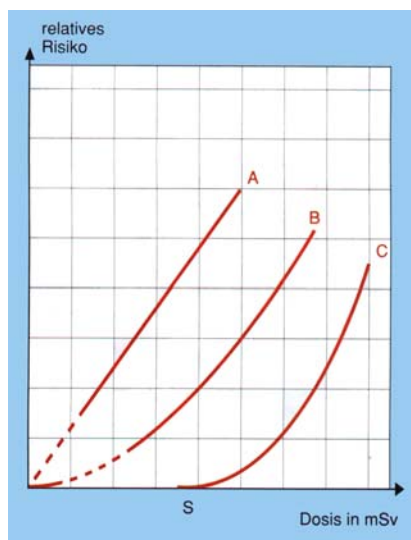
Strahlenwirkung in biologischem Material (Zellen)



85

6) Strahlenschutz (10)

Strahlenwirkung in biologischem Material (Zellen)



Dosis-Risiko-Beziehung bei Bestrahlung mit ionisierender Strahlung

(Experimentelle Daten für hohe Dosen, Extrapolation für niedrige Dosen):

Extrapolationsmodelle:

- A linear
- B linear-quadratisch
- C Risikokurve mit unterem Limit

86

6) Strahlenschutz (11)

Strahlenwirkung in biologischem Material (Zellen)



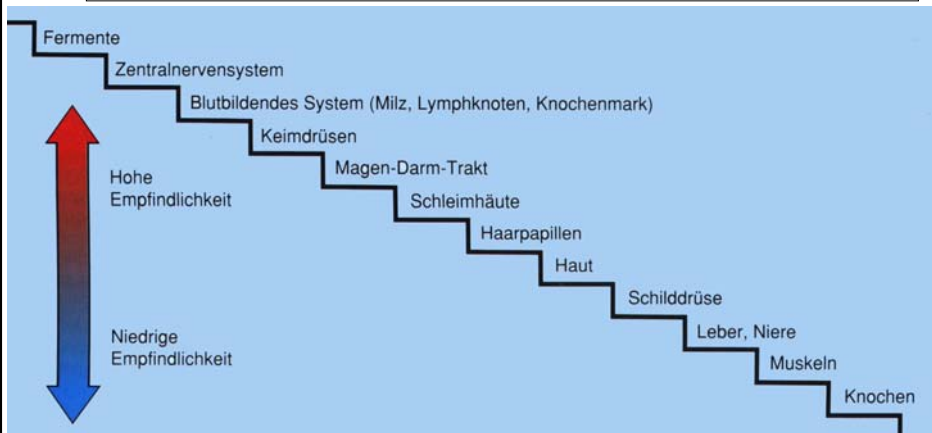
Einfluss anderer Faktoren

- Strahlungstypen ($\alpha > \beta > \gamma$)
- Dosiswert: hohe Dosis = mehr Schäden
- Dosisverteilung (mehrere kleine Dosen sind weniger schädigend als eine einzige Strahlendosis des gleichen Gesamtwertes (Reparaturmechanismus))
- Bestrahlte Organe und Organsysteme (unterschiedliche Empfindlichkeit der Gewebe)
- Andere Faktoren (z.B.. Sensibilisierung durch Arzneimittel, Hormone, O_2 -Level des Organismus etc.)

6) Strahlenschutz (12)

Strahlenwirkung in biologischem Material (Zellen)

Empfindlichkeit verschiedener Gewebe gegenüber Strahlung



6) Strahlenschutz (13)

Strahlenwirkung in biologischem Material (Zellen)

Empfindlichkeit verschiedener Organismen gegenüber Strahlung
(D_{50/30} Wert = 50% letale Dosis innerhalb von 30 Tagen)

Organismus	D _{50/30}
Amöbe	1000 Gy
Drosophila	600 Gy
Muschel	200 Gy
Goldfisch	20 Gy
Kaninchen	8 Gy
Affe	6 Gy
Hund	4 Gy
Mensch	4 Gy

89

6) Strahlenschutz (14)

Strahleneffekte einer einmaligen Bestrahlung beim Menschen (ungefähre Werte)

Ganzkörperbestrahlung

0.25 Sv	Keine klinisch erfassbaren Schädigungen
0.25 Sv	Verringerung der weißen Blutzellen
0.5 Sv	Fortschreitende Zerstörung der leukozythenbildenden Organe (Abnahme der Widerstandsfähigkeit gegen Infektionen)
1 Sv	Deutliche Veränderungen im Blutbild
5 Sv	Zerstörung des Gastrointestinal-Traktes (50% letal)
10 Sv	Zerstörung des neurologischen Systems (100% letal)

Bestrahlung der Hand

2 Gy	Keine gesicherten Effekte
4 Gy	Hautschädigung
6 Gy	Hautrötung, Pigmentierung
8.5 Gy	Irreversible Hautschäden
50 Gy	Herausbildung nichtheilenden Hautkrebses

Beachte ! Der Grenzwert im deutschen Strahlenschutzrecht für beruflich strahlenexponierte Personen beträgt 0.020 Sv/Jahr

6) Strahlenschutz (15)

Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T zur Berechnung der Organdosen H_T oder der effektiven Dosis E

Organdosis:

$$H_T = \sum w_R D_{T,R}$$

Effektive Dosis:

$$E = \sum w_T H_T = \sum w_T \sum w_R D_{T,R}$$

Gewebe oder Organe	Gewebe-Gewichtungsfaktoren w_T
Keimdrüsen	0,20
Knochenmark (rot)	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Speiseröhre	0,05
Schilddrüse	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
Andere Organe oder Gewebe	0,05

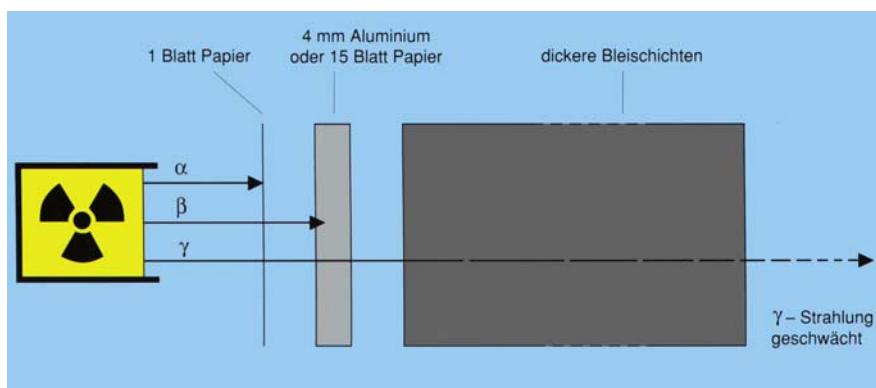
91

Quelle: StrlSchV, Anlage VI

6) Strahlenschutz (16)

Schutz vor externer Strahlung

Abschirmmaterialien für unterschiedliche Strahlungsarten
(ungefähre Angaben)



92

6) Strahlenschutz (17)

Schutz vor externer Strahlung

Beschränkung auf die unbedingt notwendige Menge an radioaktivem Material



Lineare Abnahme der Exposition

Minimierung der Arbeitszeit in der Nähe einer Strahlungsquelle



Lineare Abnahme der Exposition

Maximierung des Abstands zur Strahlungsquelle



quadratische Abnahme der Exposition

Abschirmung



geeignete Materialien
 α, β : Plexiglas
 γ : Blei, Uranium
 n : spezielle Abschirmung

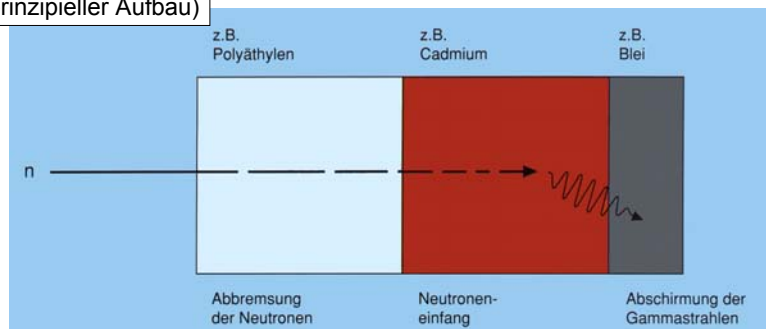
ALARA
As Low As Reasonably Achievable

93

6) Strahlenschutz (18)

Schutz vor externer Strahlung

Neutronenschild
(prinzipieller Aufbau)



- Abbremsung der Neutronen durch elastische und inelastische Stöße in leichten Materialien
- Einfang der thermischen Neutronen durch Absorber wie Cadmium oder Bor
- Abschirmung sekundärer Photonenstrahlung durch Bleiwände

6) Strahlenschutz (19)

Schutz vor interner Strahlung

-Besondere Vorsicht beim Umgang mit offenen α - und β -Strahlern (direkte Wechselwirkung mit Zellmaterial)

- Reduzierung des Risikos der Inkorporation durch:

- ◆ radiochemische Arbeitstechniken
- ◆ häufige Kontaminationskontrolle (Hände!!)
- ◆ besondere Vorsicht mit flüchtigen und gasförmigen Materialien