

### Mittlere Strahlenexposition (in mSv pro Jahr)

<b>Natürliche Strahlenexposition</b>		
	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
<b>gesamt</b>	<b>2,00</b>	<b>1,10</b>
<b>Zivilisatorische Strahlenexposition</b>		
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
<b>gesamt</b>	<b>&lt; 1,56</b>	<b>&lt; 0,56</b>

### 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
<b>Aufenthalt in Gebäuden</b>	
Holzhäuser	bis zu 0,60
Betonbauten	bis zu 3,00

## Beiträge medizinischer Untersuchungen (in mSv)

Röntgen		Nuklearmedizin mit <sup>99m</sup> Tc	
Zahnaufnahme	0,01 mSv	Nierenfunktionsuntersuchung	1,3 mSv
Thoraxaufnahme	0,03 mSv	Hirnperfusion	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

## Direkte und indirekte Wechselwirkungen von Strahlung mit lebender Materie

### Direkte Wechselwirkungen mit entsprechenden Molekülen

Aminosäuren: Desaminierung, Ringbruch, Oxidation

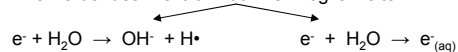
Nukleinsäuren: Kettenbrüche  
 15 bis 29 eV für Einzelstrangbrüche  
 100 bis 200 eV für Doppelstrangbrüche

### Indirekte Wechselwirkungen mit entsprechenden Molekülen („indirekter Effekt“)

- Wasser ist das weitaus häufigste Molekül in der Zelle (≈ 70%)

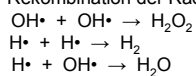
- Primärprozess am Wasser (Dauer: 10<sup>-18</sup> bis 10<sup>-12</sup> s)  
 Radiolyse:  $\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + e^-$       Energieeintrag 12,56 eV

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



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

- Rekombination der Radikale untereinander



- Reaktionen der Radikale mit organischen Molekülen

### Nichtstochastische Effekte bei hoher Kurzzeitdosis und Ganzkörperbestrahlung

0 – 0,25 Sv	Keine klinisch erkennbaren Wirkungen, Spätfolgen (somatisch, genetisch aber möglich)
0,25 – 1 Sv	Leichte, vorübergehende Änderungen des Blutbildes, Haarausfall (erneuter Haarwuchs möglich), Spätfolgen können auftreten
1 – 2 Sv	Veränderung des Blutbildes, Schädigung des Immunsystems, Übelkeit, Müdigkeit Erbrechen, Spätwirkungen können Lebenserwartung verkürzen
2 – 3 Sv	Starke Veränderungen des Blutbildes, höheres Infektionsrisiko, Übelkeit und Erbrechen am ersten Tag Nach Latenzzeit von einigen Wochen folgende Symptome in leichter Form: Übelkeit, Appetitlosigkeit, Halsschmerzen, Durchfall Todesrate bei Erwachsenen unter 20%, Erholung nach 2 – 3 Monaten möglich
ab 3 Sv	Zunehmend schwere Störungen des Blutbildes und des Immunsystems, Übelkeit, Erbrechen, Durchfall nach wenigen Stunden; Nach Latenzzeit von weniger als 7 Tagen: Haarausfall, Appetitlosigkeit, allg. Unwohlsein; Während der zweiten Woche: Fieber, innere Blutungen, Entzündungen der Mundhöhle; Todesfälle nach 2 bis 6 Wochen
4,5 Sv	Die Todesrate beträgt nach 30 Tagen 50%
7,5 – 10 Sv	Nahezu 100 % Sterblichkeit
ab 50 Sv	Fast augenblicklich einsetzende schwerste Krankheit, 100% Sterblichkeit innerhalb einer Woche
ab 100 Sv	Lähmung und schneller Tod durch Ausfall des Zentralnervensystems

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

Organdosis:  

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

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

Quelle: StrISchV, Anlage VI

## 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

## Strahlenbedingte Schädigungen des DNA- Moleküls

### 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

## 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 schadhafte 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

**Fazit: Reparaturprozesse können Strahlenrisiko verringern, aber nicht ausschalten**