

# Dosimetrie

*Wirkung ionisierender Strahlung*

*Quantifizierung*

*„objektive Berichterstattung“*

Richard Bauer, JLU Gießen

# Radioaktivität und ionisierende Strahlung

- wir können Hitze, Licht, Gerüche und Schmerz wahrnehmen ...
- wir haben kein Sinnesorgan, um Radioaktivität oder ionisierende Strahlung festzustellen
  - ⇒ *wir sind auf Meßgeräte angewiesen*
- wir haben keine eigenen Erfahrungen mit Risiken durch Radioaktivität
  - ⇒ *wir müssen der Interpretation der Meßdaten durch Experten vertrauen*

# Was ist Radioaktivität?

Radioaktive Atomkerne besitzen zuviel Energie, die sie - irgendwann - als Strahlung abgeben bei der Strahlenemission „zerfällt“ der Kern und wandelt sich in einen anderen Kern um



Beim natürlichen radioaktiven Zerfall unterscheiden wir drei Strahlungsarten

$\alpha$  -Teilchen Helium-Atomkerne

$\beta$  -Teilchen Elektronen aus dem Kern

$\gamma$  -Quanten elektromagnetische Wellen

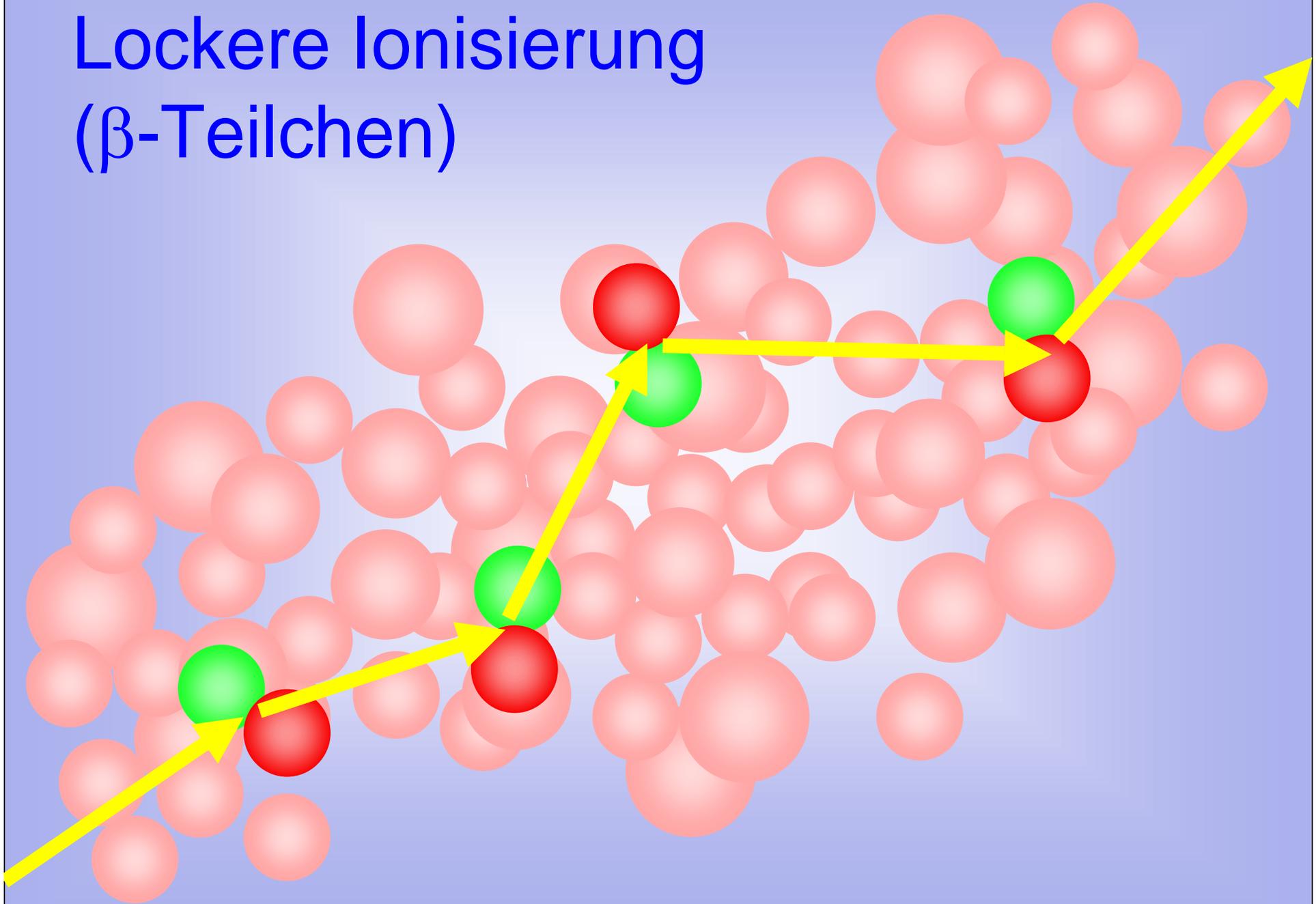
# Dosimetrie

*Wirkung ionisierender Strahlung*

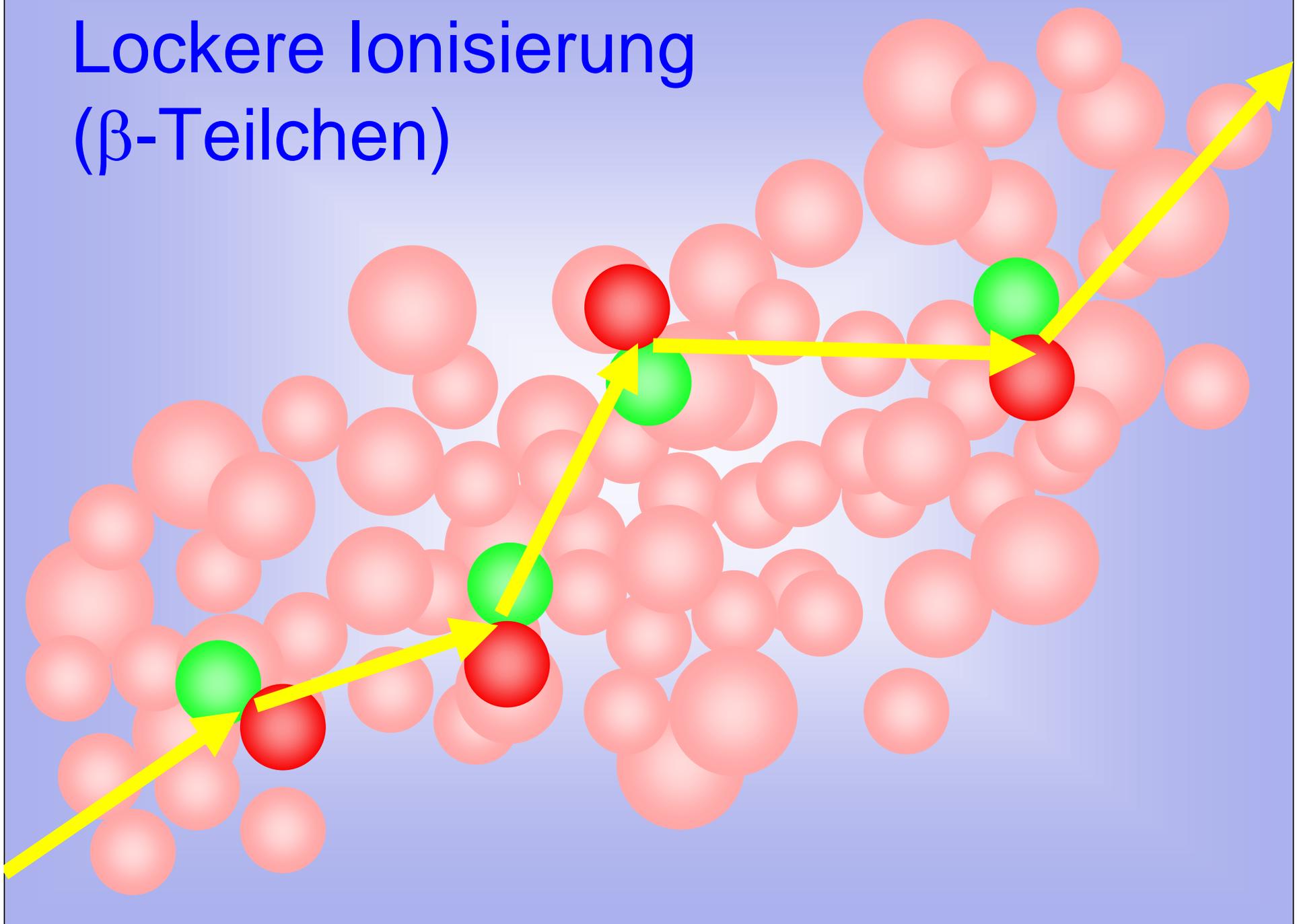
*Quantifizierung*

*„objektive Berichterstattung“*

# Lockere Ionisierung ( $\beta$ -Teilchen)



# Lockere Ionisierung ( $\beta$ -Teilchen)



# Wirkung ionisierender Strahlung

physikalische  
Primärwirkung

Ionisation von Atomen  
und Molekülen

chemische  
Sekundärwirkung

Zerbrechen von Molekülen

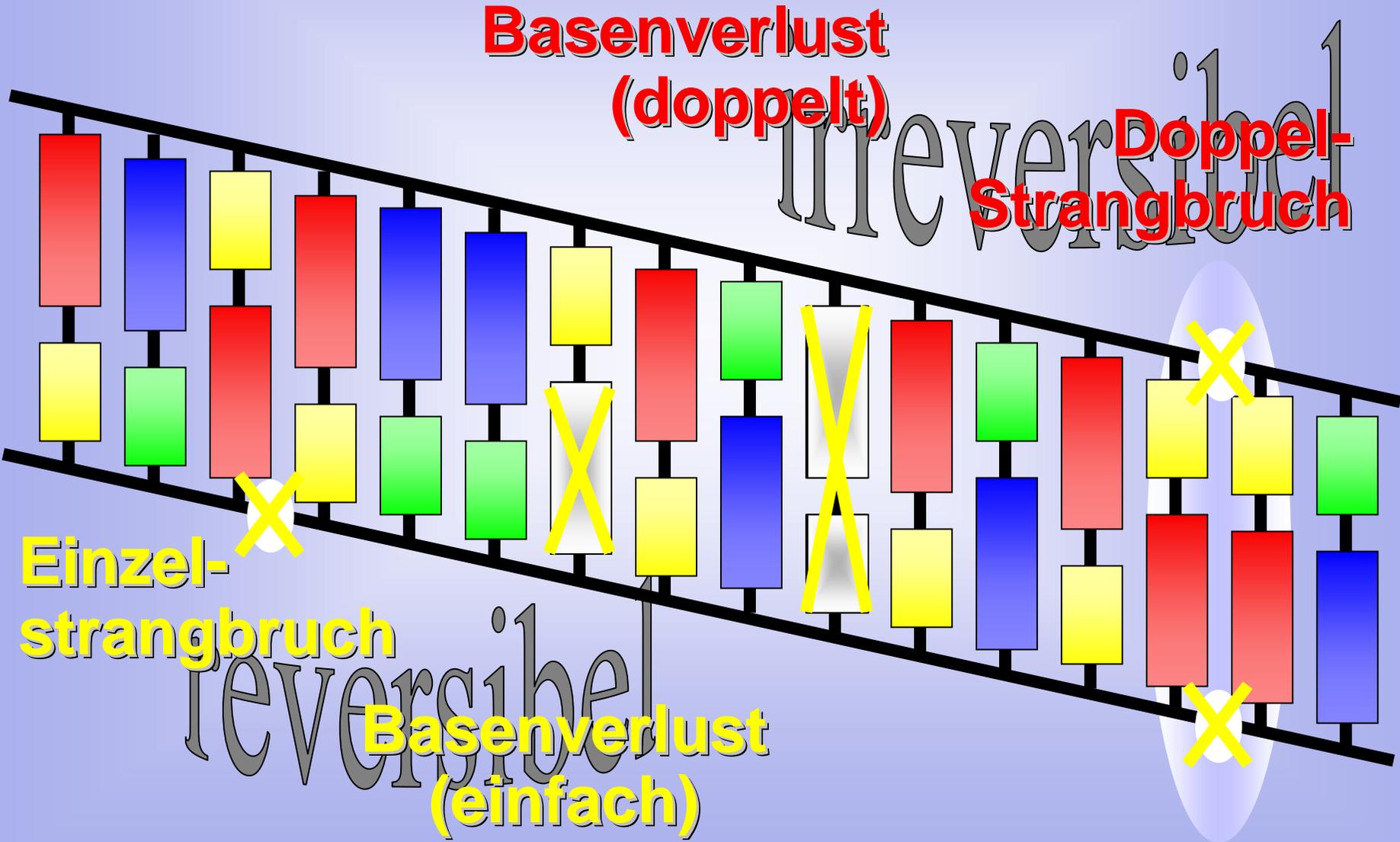
biochemische  
Folgereaktionen

Radiolyse von Wasser  
Peroxidbildung  
Veränderung von Enzymen  
Membran- und **DNS-Schäden**

biologische  
Folgereaktionen

frühsomatisch (Zellstoffwechsel)  
**spätsomatisch (Krebs)**  
**genetische Veränderungen**

# Strahlenschäden an der DNS



# Dosimetrie

*Wirkung ionisierender Strahlung*

*Quantifizierung*

*„objektive Berichterstattung“*

```
graph TD; A((Biologische Strahlenwirkung)) --- B((Dosis)); A --- C((räumliche Verteilung)); A --- D((Milieu-faktoren)); A --- E((Gewebe-sensibilität)); A --- F((Strahlenart)); A --- G((Dosis-leistung));
```

# Biologische Strahlenwirkung

Dosis

räumliche  
Verteilung

Milieu-  
faktoren

Gewebe-  
sensibilität

Strahlenart

Dosis-  
leistung

# Energiedosis D

D = absorbierte Energie / Masse

J/kg

Joule / Kilogramm

1 Gy = 1 J/kg

Gray

1 Gy = 100 rd (Rad)

Energiedosis D ist proportional zur Anzahl n der erzeugten Ionenpaare mal Energiebetrag  $\Delta E$  pro Ionisierung

$$D = \text{const.} \times n \times \Delta E / m$$

$\Delta E_{\text{Wasser}} \cong 37 \text{ eV}$ ,  $100 \text{ keV} \cong 300$  Ionisierungen

# Energiedosis und Wärme

Devitalisierung von Tumorgewebe ab Dosis

$$D > 40 \text{ Gy } (> 40 \text{ J/kg})$$

Diese Dosis bewirkt eine Erwärmung von

$$\Delta T = 40 \text{ K} / 4.18 \times 10^3 \cong 0.01 \text{ K}$$

Der Wirkungsgrad der Muskulatur beträgt ca.20%.

Um 1 m Treppe zu steigen, sind

10 J/kg mechanische Arbeit erforderlich, wofür  
40 J/kg Wärme produziert werden, ergibt

$$\Delta T = 0.01 \text{ K}$$

# Ionendosis I

I = erzeugte Ionenpaare / Masse

C / kg

Coulomb / Kilogramm

$2.58 \times 10^{-4}$  C/kg

= 1 R (Röntgen)

Umrechnung der Ionendosis in Energiedosis

$$D = f \times I \text{ [Gy]}$$

Für Ionisation in wässrigen Lösungen und biologischem Weichgewebe gilt

$$f = 37 \text{ [Gy / (C/kg)]} \quad (\text{Luft: } f = 34)$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \times 37 = 0.0096 \text{ Gy} \cong 0.01 \text{ Gy}$$

$$105 \text{ R} = 1 \text{ Gy}$$

```
graph TD; A((Biologische Strahlenwirkung)) --- B((Dosisleistung)); A --- C((Dosis)); A --- D((räumliche Verteilung)); A --- E((Milieu-faktoren)); A --- F((Gewebe-sensibilität)); A --- G((Strahlenart));
```

# Biologische Strahlenwirkung

Dosisleistung

Dosis

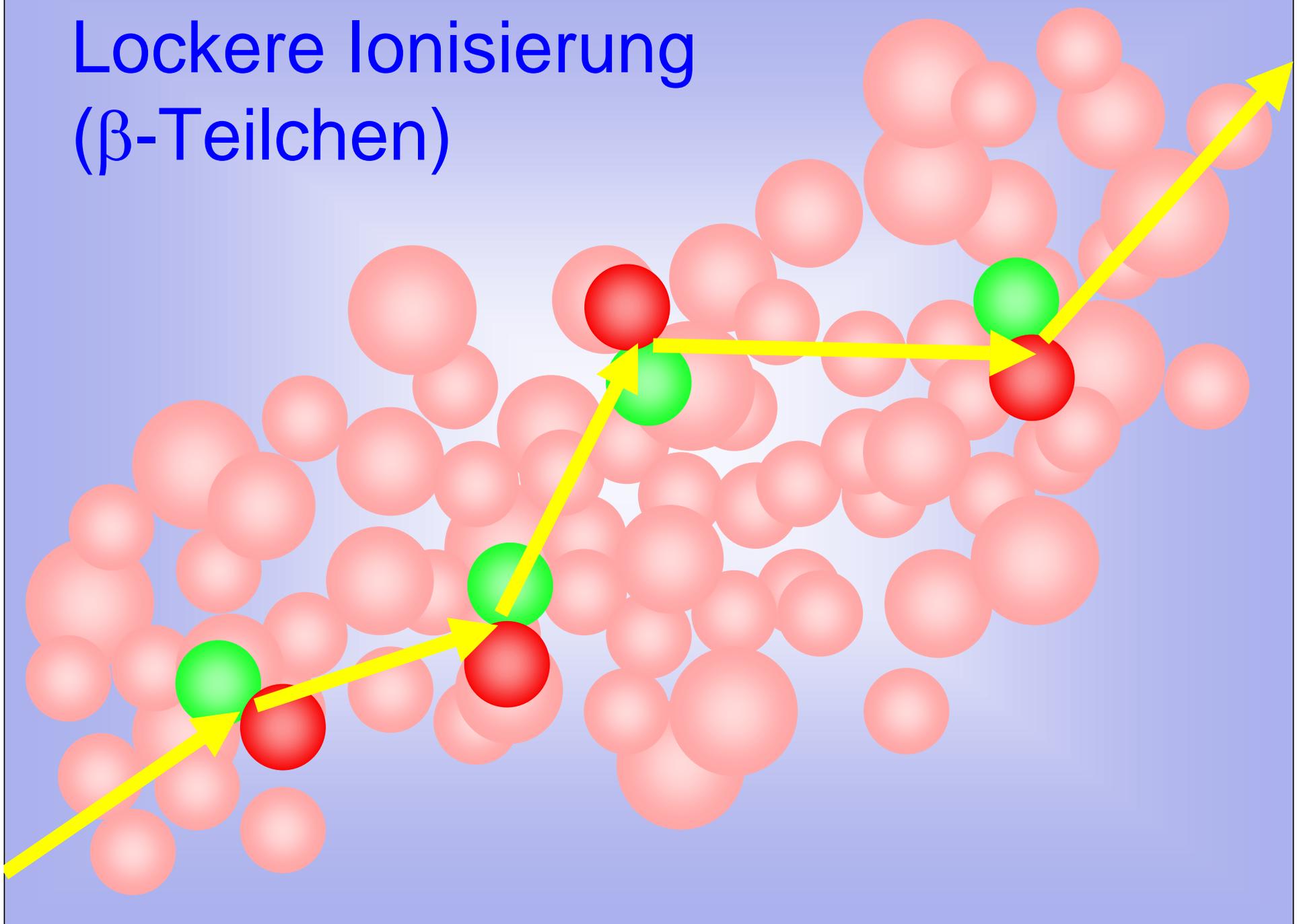
räumliche  
Verteilung

Strahlenart

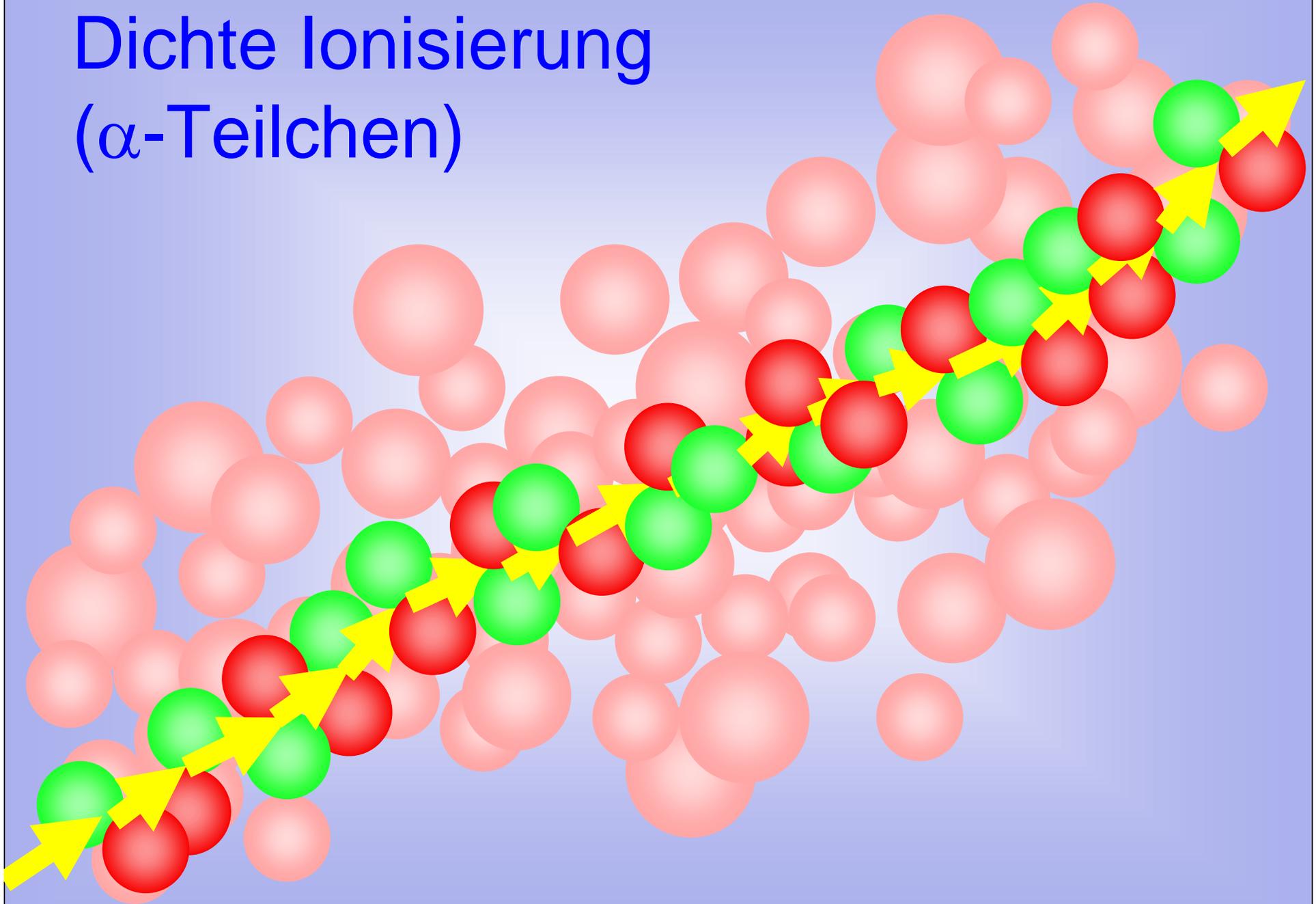
Gewebe-  
sensibilität

Milieu-  
faktoren

# Lockere Ionisierung ( $\beta$ -Teilchen)



# Dichte Ionisierung ( $\alpha$ -Teilchen)



# Äquivalentdosis H

H = Energiedosis x Qualitätsfaktor

J / kg × q

Joule / Kilogramm

1 Sv = 1 J/kg × q (Sievert)

1 Sv = 100 rem

Je nach Strahlungsart ist bei gleicher Energiedosis D die Ionisierungsdichte unterschiedlich. Die biologische Wirkung nimmt mit der Ionisierungsdichte zu.

q bewertet die Strahlungsart

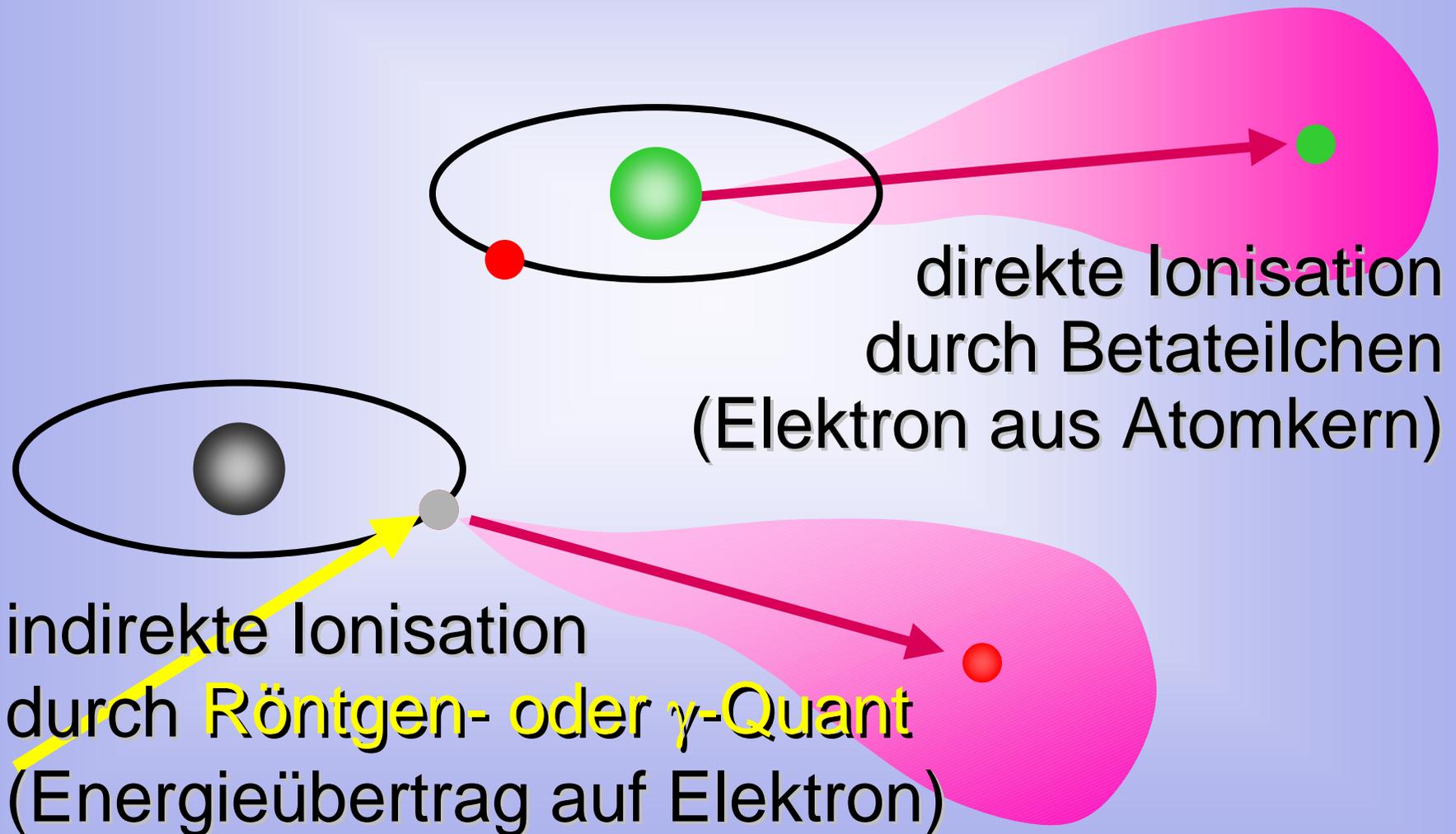
# Qualitätsfaktor Q

(„*radiation weighting factor*“)

Elektronen, Betastrahlen	1
Röntgen-, Gammastrahlen	1
Protonen	2 – 3
schnelle Neutronen	5 – 10
Alphastrahlen, schwere Ionen	20

Die biologische Wirkung von Beta-, Röntgen- und Gammastrahlen wird = 1 definiert.  
Schwere Ionen ionisieren am dichtesten.

# Ionisation durch Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlen



# Direkte und indirekte Ionisierung

**Geladene Teilchen** (Elektronen,  $\alpha$ -Teilchen) ionisieren im Vorbeiflug Atome oder Moleküle **direkt**,

- erzeugen dabei Paare negativ und positiv geladener Ionen und
- übertragen im Mittel 37 eV auf ein Ionenpaar

**Ungeladene Teilchen** ( $\gamma$ - und Röntgenquanten) ionisieren **indirekt**. Sie übertragen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit

- ihre gesamte Energie (Fotoeffekt)
  - oder einen Teil der Energie (Comptoneffekt)
- auf ein Elektron der Atomhülle.

**Dieses Elektron ionisiert die Umgebung** (direkt)

# Direkte und indirekte Ionisierung

In Materie ist die Reichweite

- geladener Teilchen begrenzt
- ungeladener Quanten unbegrenzt

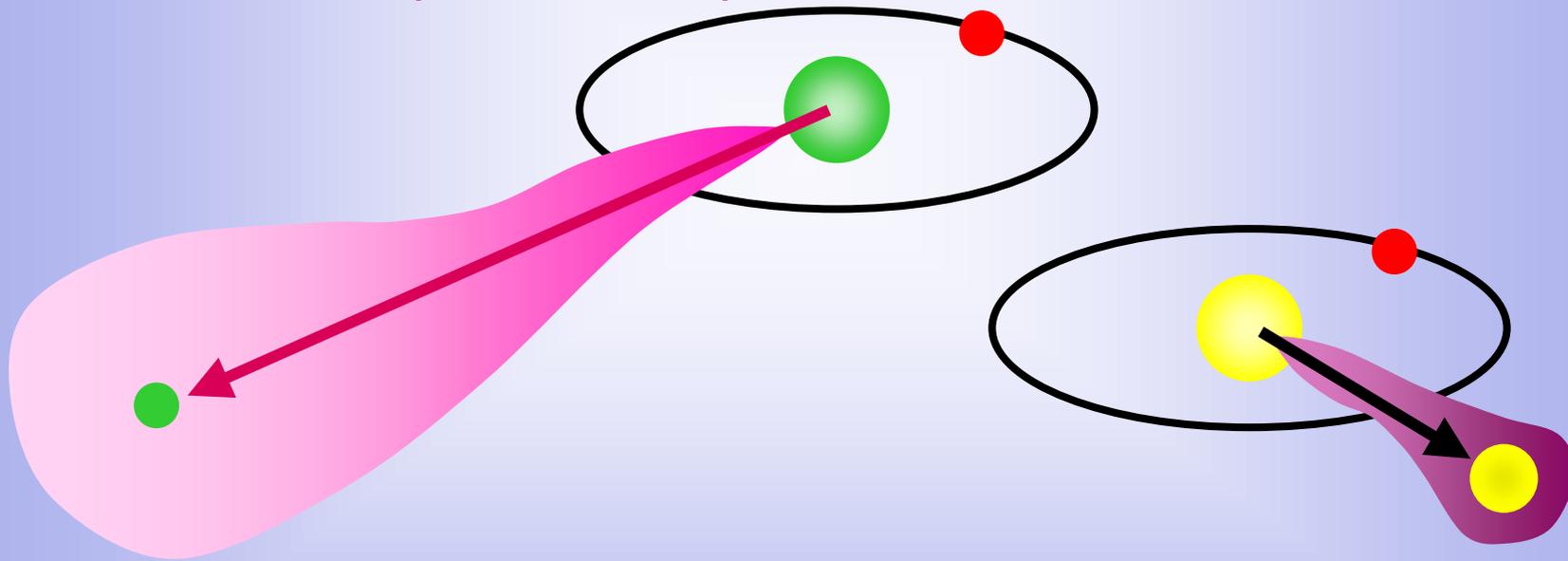
Geladene Teilchen werden pro Ionisierung um 37 eV abgebremst und abgelenkt,

⇒ maximale Reichweite > mittlere Reichweite

Ungeladene Quanten werden mit der gewebespezifischen Halbwertsdicke  $d_{1/2}$  um 50% abgeschwächt: nach der Strecke  $d_{1/2}$  sind 50%, nach 2  $d_{1/2}$  25% und nach 10  $d_{1/2}$  nur noch 0.1% der ursprünglichen Quanten vorhanden

# „Lockere“ und „dichte“ Ionisierung

„lockere“ Ionisierung durch  
Elektronen (150 keV)

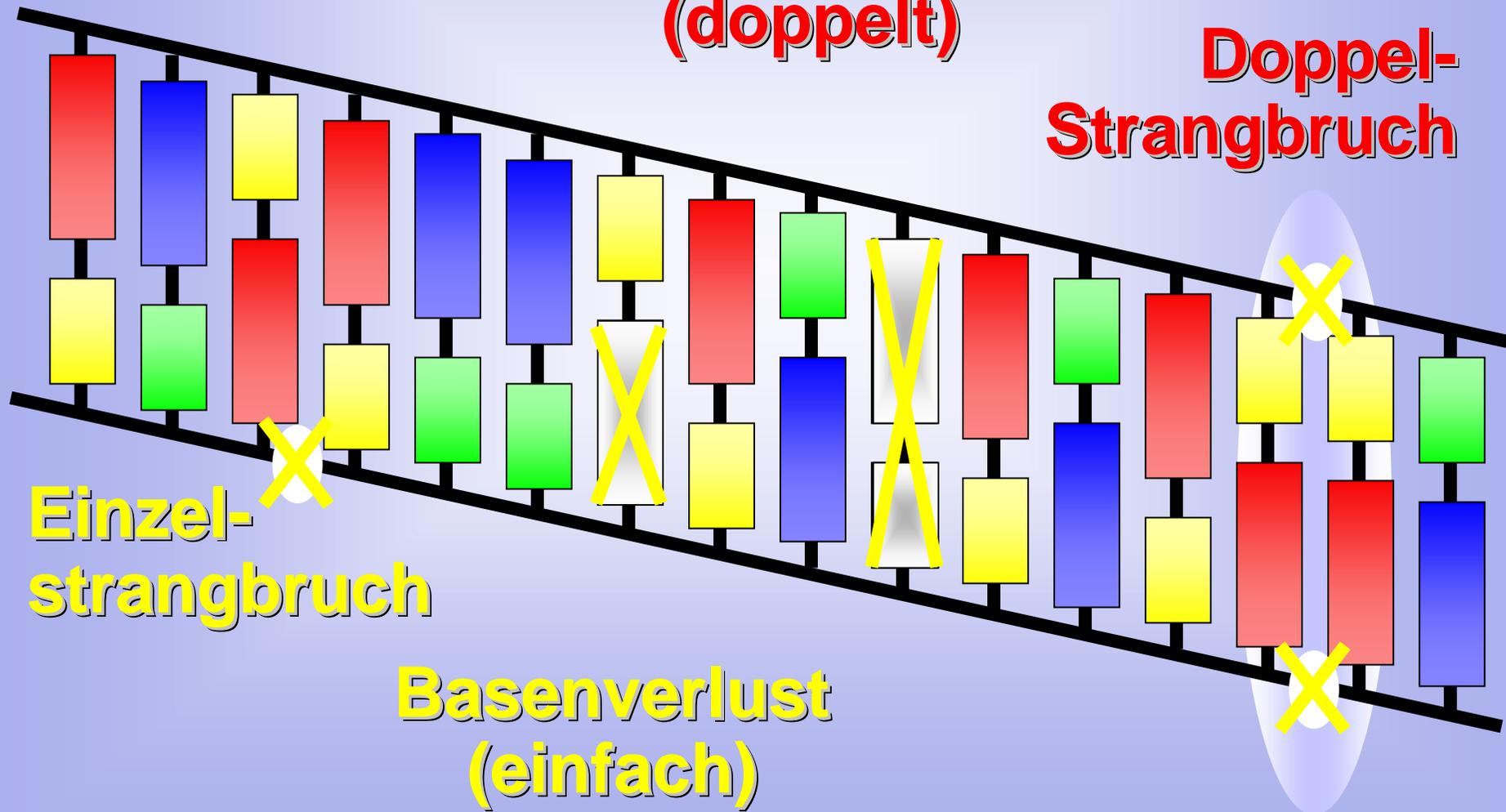


„dichte“ Ionisierung  
durch Alphateilchen

# Strahlenschäden an der DNS

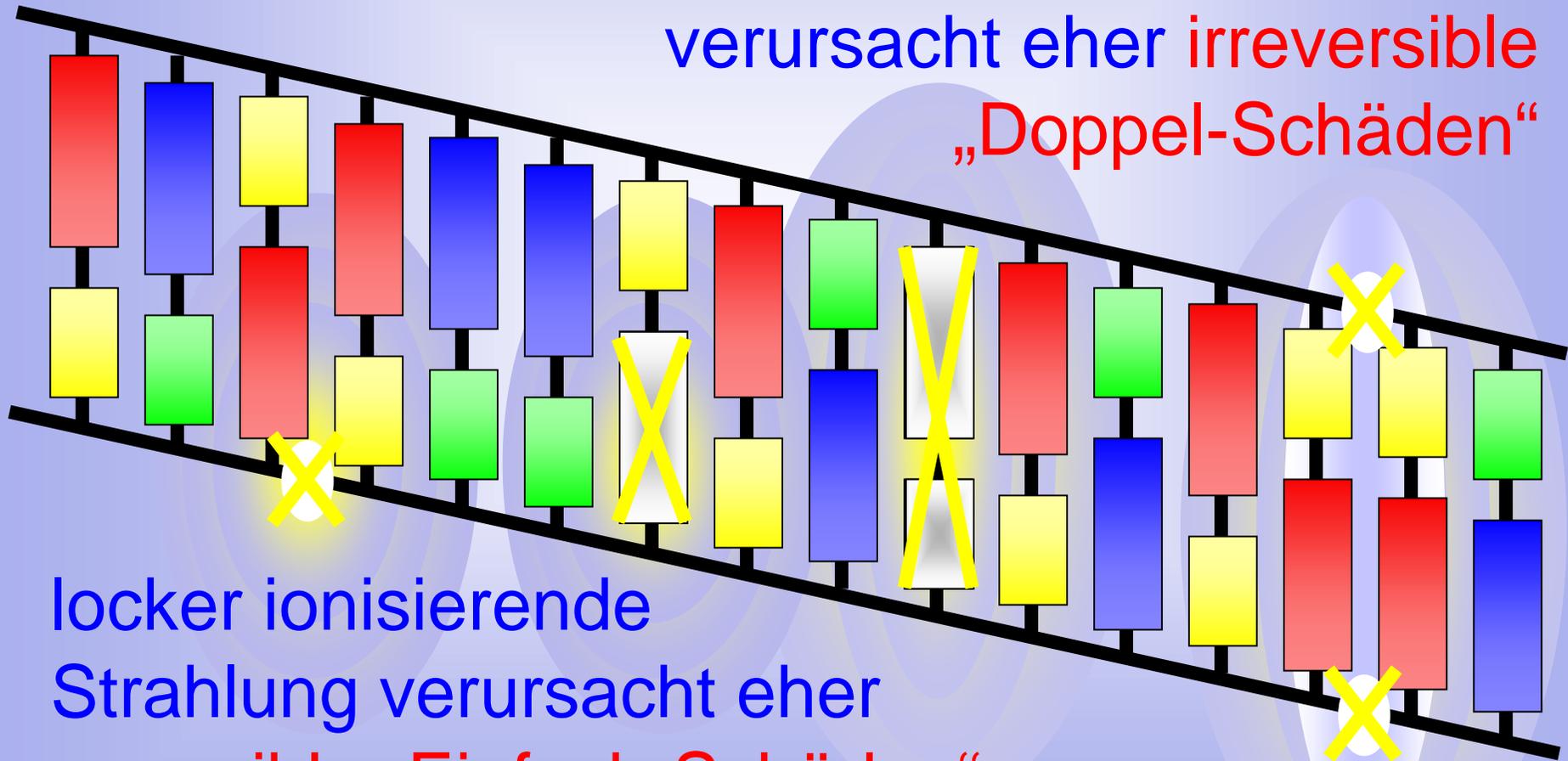
**Basenverlust  
(doppelt)**

**Doppel-  
Strangbruch**



# Strahlenschäden an der DNS

dicht ionisierende Strahlung  
verursacht eher irreversible  
„Doppel-Schäden“



locker ionisierende  
Strahlung verursacht eher  
reversible „Einfach-Schäden“

**Biologische  
Strahlenwirkung**

Dosis-  
leistung

Dosis

räumliche  
Verteilung

Strahlenart

Gewebe-  
sensibilität

Milieu-  
faktoren

# Effektive (Äquivalent-) Dosis $H_{\text{eff}}$

Bei Teilkörperbestrahlungen oder bei Exposition mit Radionukliden werden verschiedene Organe unterschiedlich belastet. Um solche Strahlenexpositionen vergleichen und bewerten zu können, wird eine

„effektive (Äquivalent-) Dosis“  $H_{\text{eff}}$

berechnet als Summe der Äquivalentdosen  $H_i$  der Organe  $i$ , multipliziert mit dem Wichtungsfaktor  $w_i$

$$H_{\text{eff}} = \sum w_i H_i$$

$H_{\text{eff}}$  trägt den unterschiedlichen Risiken einer Karzinominduktion oder genetischen Risiken Rechnung

# Wichtungsfaktoren $w_i$ („*tissue weighting factors*“)

	ICRP	1977	1991
Keimdrüsen		0.25	0.20
Mamma		0.15	0.05
rotes Knochenmark		0.12	0.12
Lunge		0.12	0.12
Dickdarm		-	0.12
Schilddrüse		0.03	0.05
Ösophagus		-	0.05
Magen		-	0.05
Leber		-	0.05
Knochen (Endost)		0.03	0.01
Haut		-	0.01
Restkörper		5 x 0.06	0.05
<b><i>gesamt</i></b>		<b>1.0</b>	<b>1.0</b>

# Das Konzept der effektiven Dosis

Das Konzept der effektiven Dosis  $H_{\text{eff}}$  hat sich im Strahlenschutz bewährt, um mögliche Risiken durch unterschiedliche Bestrahlung miteinander vergleichen zu können.

Wird eine Mammographie vorgenommen, entspricht  $H_{\text{eff}}$  5% der Dosis der Mamma.

Wird die Schilddrüse mit Jod untersucht, das nach kurzer Zeit nahezu quantitativ in der Schilddrüse gespeichert ist, entspricht  $H_{\text{eff}}$  etwa 5% der Schilddrüsendosis.

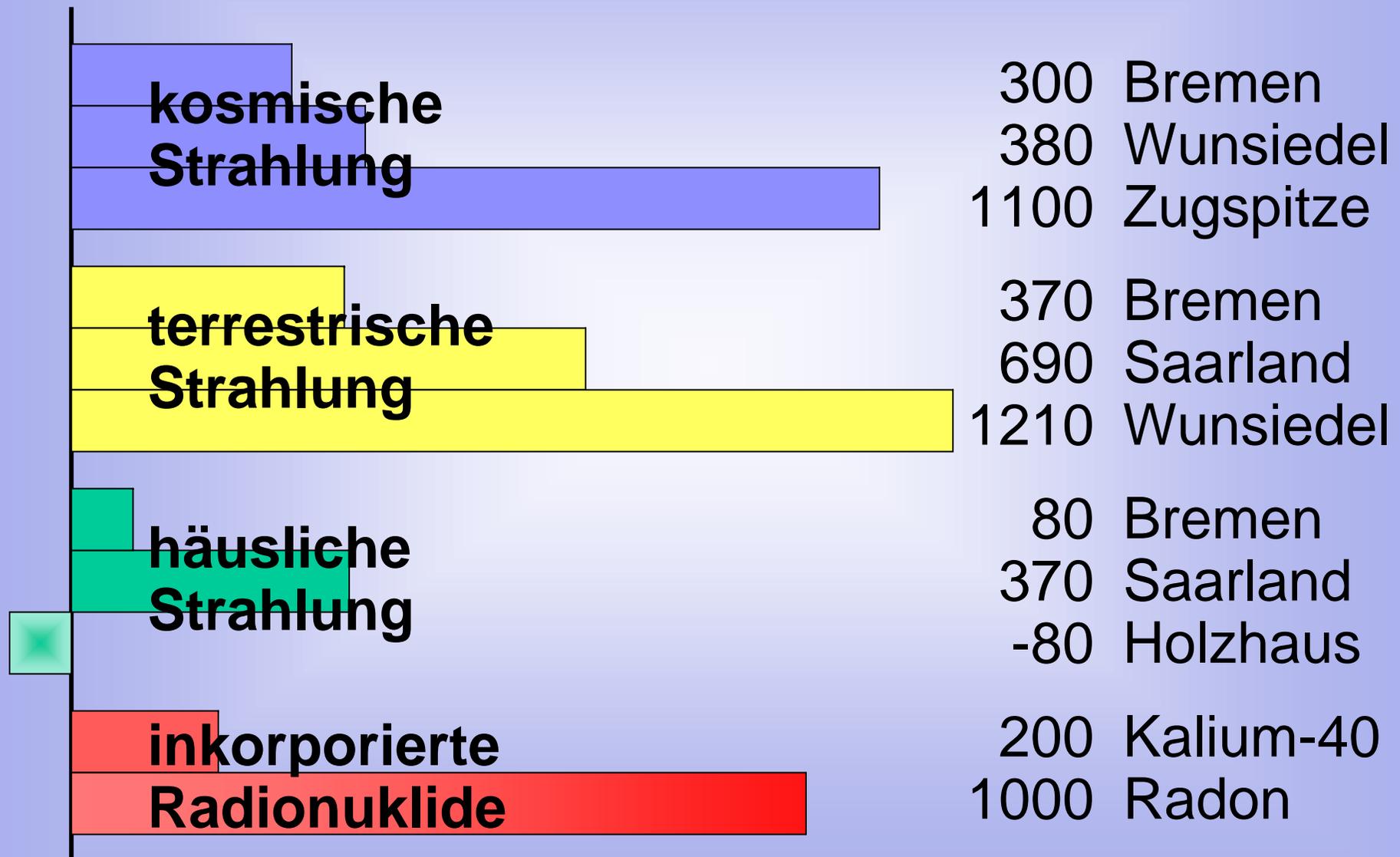
# Vergleich der Dosisbegriffe

<i>Effekt</i>	<i>adäquate Dosis</i>	<i>Dimension</i>
physikalische Primärwirkung	Energiedosis D Ionendosis I	Gy, J/kg R, C/kg
biologische Folgereaktionen	Äquivalentdosis H effektive Dosis $H_{\text{eff}}$	Sv, J/kg Sv, J/kg

Energiedosis, Äquivalentdosis und effektive Dosis haben dieselbe Dimension Energie / Masse, also J/kg.

Die Äquivalentdosis und die effektive Dosis sind relevant für den Strahlenschutz

# Natürliche Strahlenexposition ( $\mu\text{Sv/a}$ )



# Natürliche Strahlenexposition ( $\mu\text{Sv/a}$ )



# Natürliche Exposition durch externe Gamma- und inkorporierte Betastrahler

Dosisleistung von 1 mGy/a durch Gammastrahlen (kosmisch und terrestrisch) mit ca 500 keV bewirkt 400 „Treffer“ /s/kg

⇒ Anregung von 400 Elektronen /s /kg Gewebe

Aktivitätskonzentration natürlicher radioaktiver Isotope beträgt

K-40            63 Bq/kg

C-14            60 Bq/kg

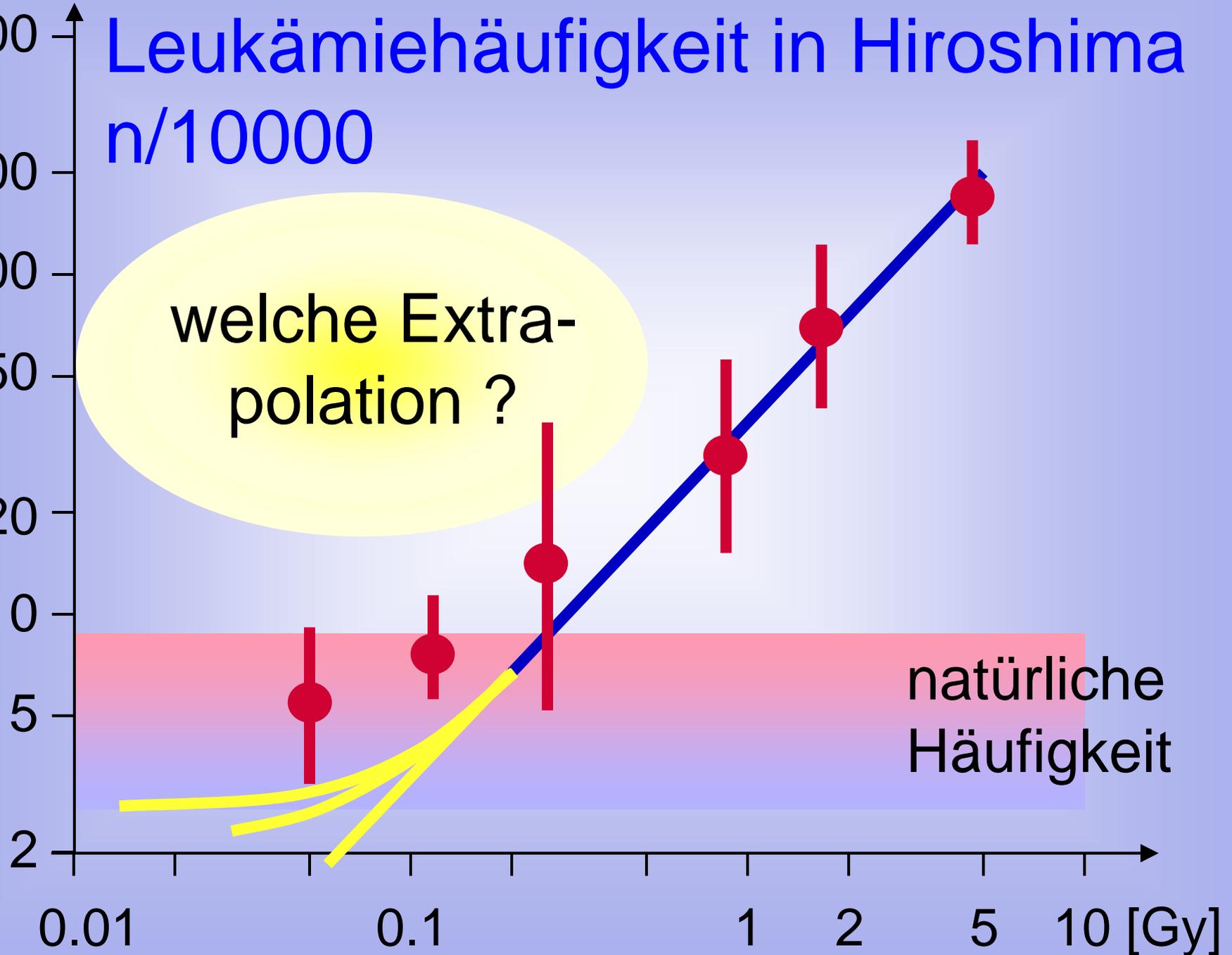
⇒ Zerfall von 120 Atomkernen /s /kg Gewebe

⇒ Ionisierung des umgebenden Gewebes

# Leukämiehäufigkeit in Hiroshima n/10000

welche Extrapolation ?

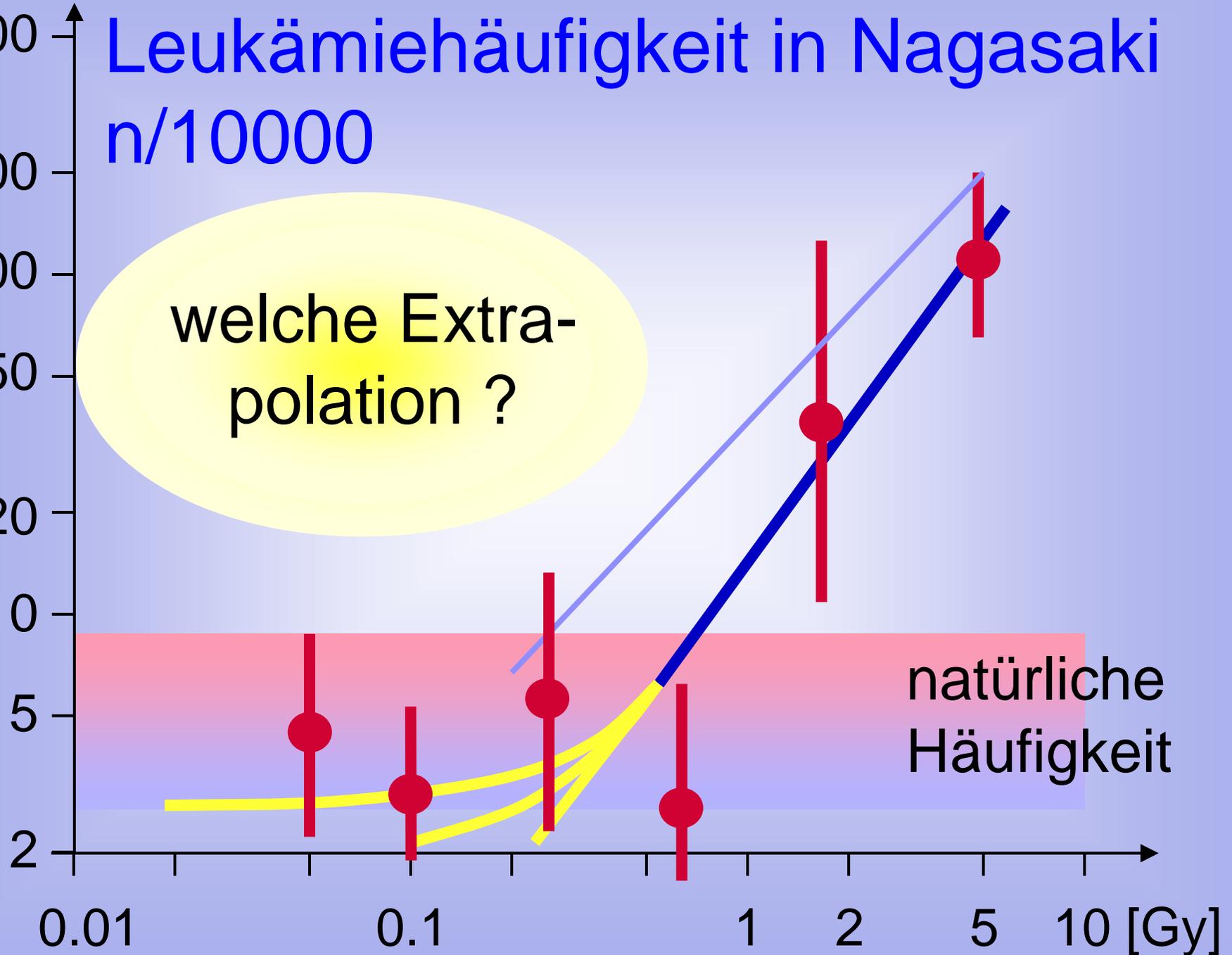
natürliche Häufigkeit



# Leukämiehäufigkeit in Nagasaki n/10000

welche Extrapolation ?

natürliche Häufigkeit

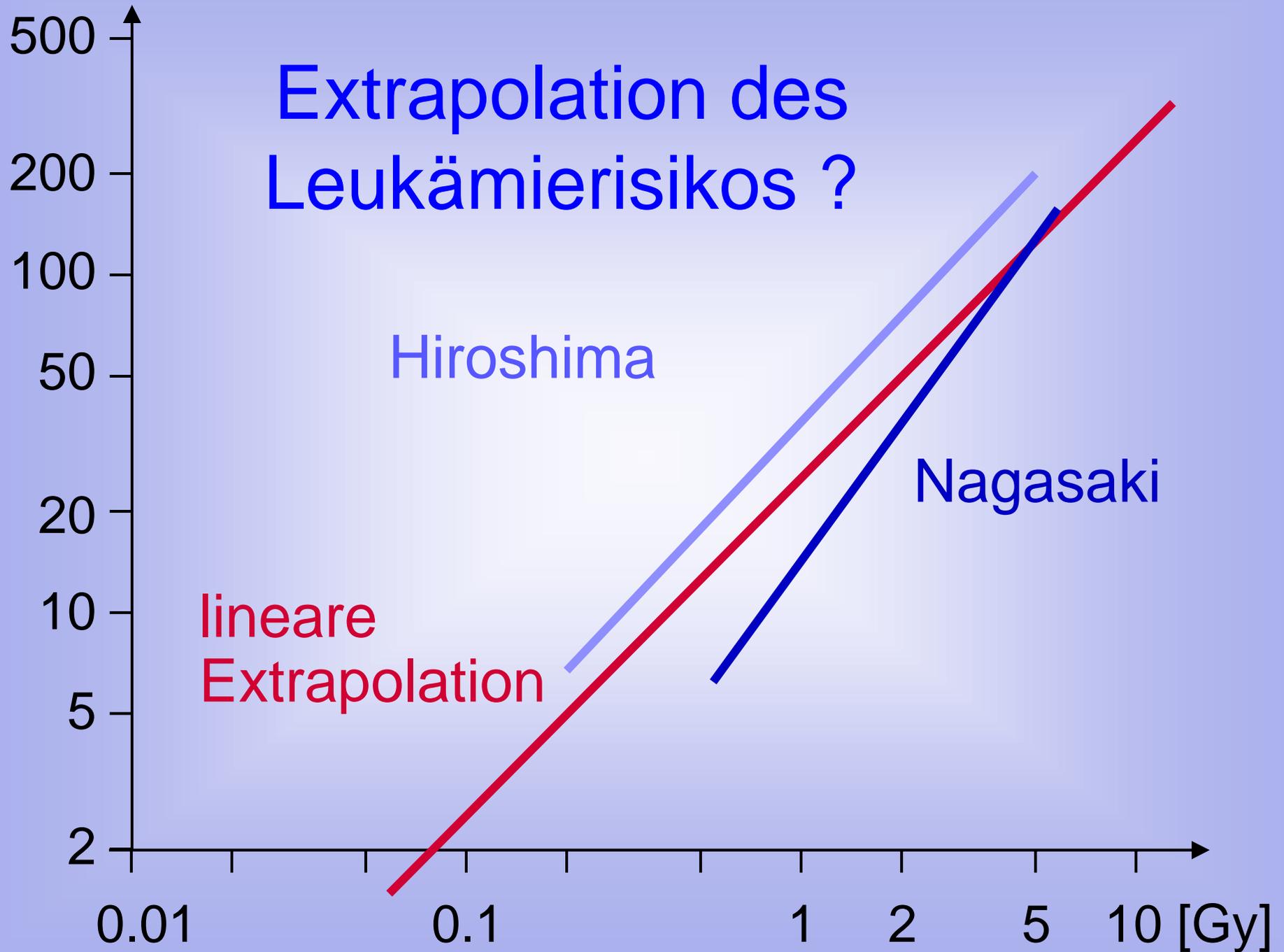


# Extrapolation des Leukämierisikos ?

Hiroshima

Nagasaki

lineare  
Extrapolation



# Karzinomrisiko, Dosis und Dosisleistung

Die Bestrahlung von  $n$  Tieren mit jeweils der Dosis  $D$  induziert  $m$  Tumore, **aber**

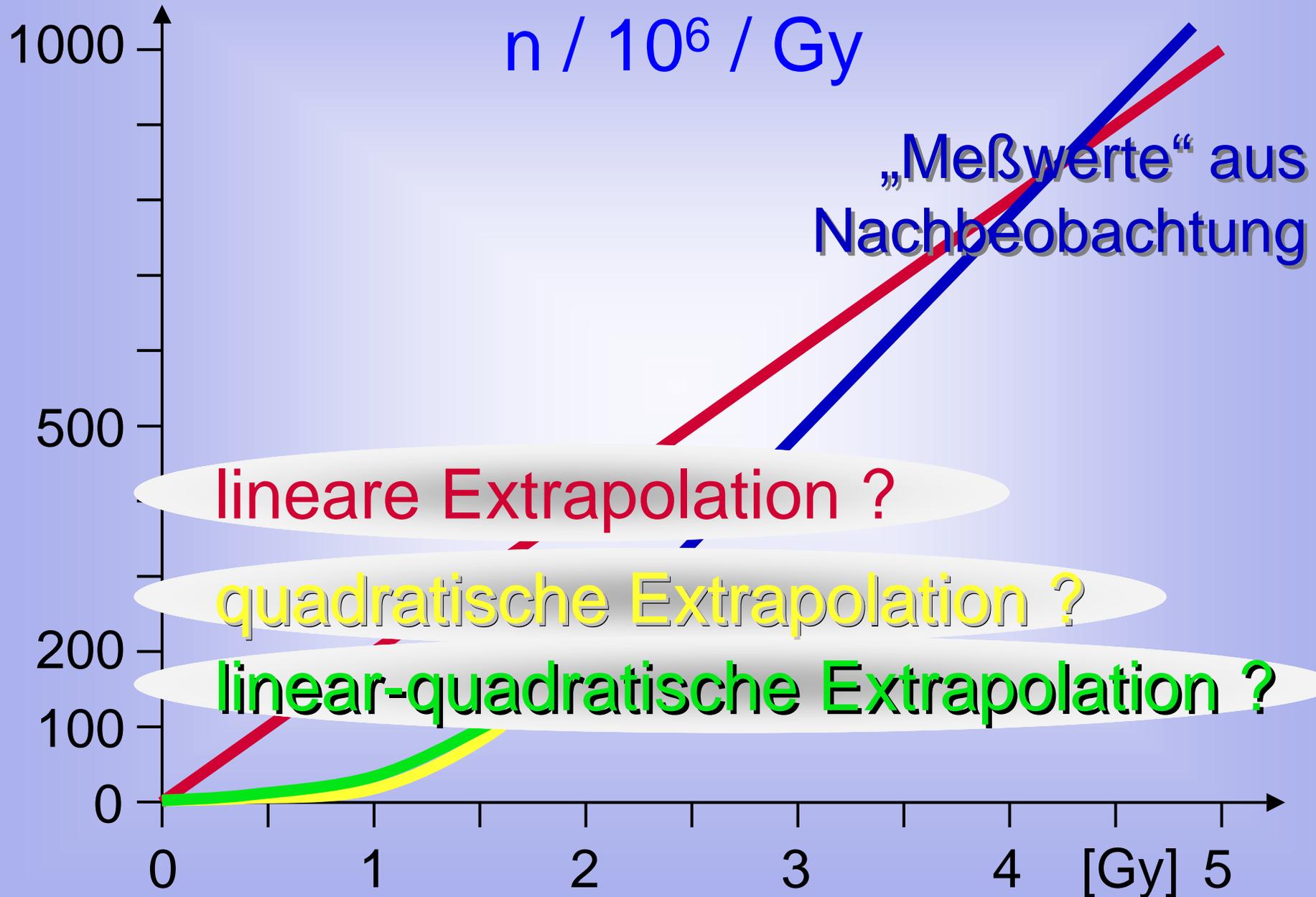
die Bestrahlung von  $2n$  Tieren mit jeweils der halben Dosis  $D/2$  induziert  $< m$  Tumore

die Bestrahlung von  $n$  Tieren mit jeweils der Dosis  $D$ , verteilt über einen längeren Zeitraum, induziert  $< m$  Tumore

⇒ **das Risiko der Tumorinduktion wird überproportional reduziert mit der Dosis und der Dosisleistung**

# Risiko stochastischer Strahlenschäden

$n / 10^6 / \text{Gy}$



# Biologische Strahlenfolgen

bei **hohen Strahlendosen  $> 0.3$  Gy** nimmt mit der Dosis

- das **Ausmaß** des somatischen Fröhschadens
- die **Wahrscheinlichkeit** einer Tumorinduktion oder genetischen Mißbildung zu.

bei **niedrigen Strahlendosen  $< 0.05$  Gy** ist

- ein Fröhschaden nicht nachweisbar
- die **Wahrscheinlichkeit** eines Spätschadens (Krebs) deutlich kleiner, als aus der linearen Dosis-Wahrscheinlichkeitsbeziehung (DWB) folgen würde.

⇒ **Wegen der geringen Schadenshäufigkeit kann die DWB experimentell nicht bestimmt werden**

# Zelluläre Reparaturmechanismen

- Hefezellen besitzen etwa 3000 Gene, davon sind über 100 Gene Reparaturgene.
- die Reparaturkapazität von Zellen langlebiger Tiere ist größer als kurzlebiger Tiere
- kurzlebige Leukozyten besitzen eine geringere Reparaturkapazität als andere langlebige Körperzellen (desselben Tieres)
- im genetischen Experiment kann ein Einzelstrangbruch in 10 - 20 Min. repariert werden
- die Reparaturkapazität menschlicher Körperzellen kann strahleninduzierte Schäden von 0.02 bis max. 0.05 Sv/d beheben.

# Dosimetrie

*Wirkung ionisierender Strahlung*

*Quantifizierung*

*„objektive Berichterstattung“*

# Frederic Vester in SZ vom 14.05.1986

Technik  
Vorgän  
schen  
Andersartigk  
sie über dies  
gewohnte W  
rungen im Ve  
aktorunfall i  
sechs Fragen  
ausgegriffen.  
sequenzen a  
an Hand einig

## 1. Kann man tätigkeit gleich

Entgegen d  
der von ihnen  
schen natürli  
keine Unters  
durch 1 Rönt  
selbe sei wie d  
unfall, ist der  
mental. Die s  
che Strahlung  
paraturmecha  
lungsgeschich  
bis auf weni  
Strahlung, die  
zum Teil gar n  
wenn sie vom  
hinterher nich

quelle liegt in der Sonne oder im Kosmos oder ist in Gesteinen der Erde fest gebunden. Unser Organismus kommt also mit ihr nie in Berührung. Nur wenige radioaktive Stoffe, wie z. B. der äußerst geringe Anteil an Kalium 40, wandern als materielle Strahlenquelle durch die Welt des Lebendigen.

Entgegen der Feststellung der Betreiber und der von ihnen informierten Behörden, daß es zwischen natürlicher und künstlicher Radioaktivität keine Unterschiede gäbe und daß die Belastung durch 1 Röntgen aus natürlicher Strahlung dasselbe sei wie durch 1 Röntgen aus einem Reaktorunfall, ist der Unterschied in der Realität fundamental. Die ständige und sehr schwache natürliche Strahlung, an die sich unser biologischer Reparaturmechanismus im Laufe der Entwicklungsgeschichte angepaßt hat, besteht nämlich bis auf wenige Ausnahmen aus *immaterieller* Strahlung, die *von außen* auf den Körper trifft, zum Teil gar nicht erst durch die Haut dringt und,

als Meßdaten aussagen

Von Frederic Vester

„Wenn der Körper selbst zur Strahlenquelle wird“  
von Frederic Vester, SZ vom 14.05.86

*„Entgegen den Feststellungen der Betreiber ..., daß es zwischen natürlicher und künstlicher Radioaktivität keine Unterschiede gebe ..., ist der Unterschied in der Realität fundamental.“*

- es gibt keinen Unterschied zwischen natürlicher und künstlicher Radioaktivität
- bei gleicher Exposition, gleicher Strahlenart und gleicher zeitlicher und räumlicher Verteilung einer Strahlung, sind die Wirkungen identisch

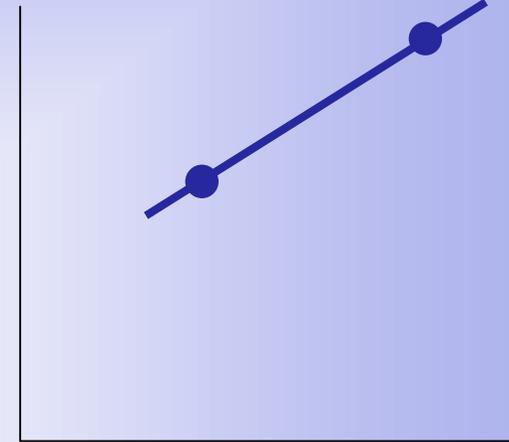
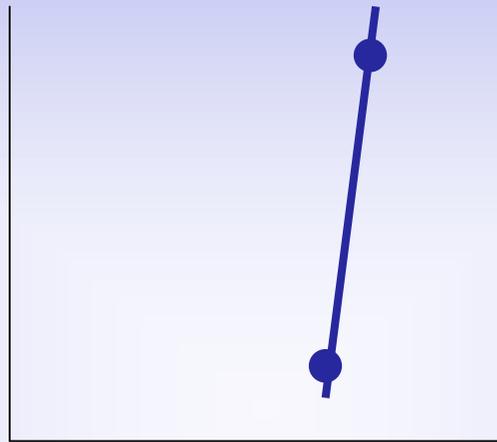
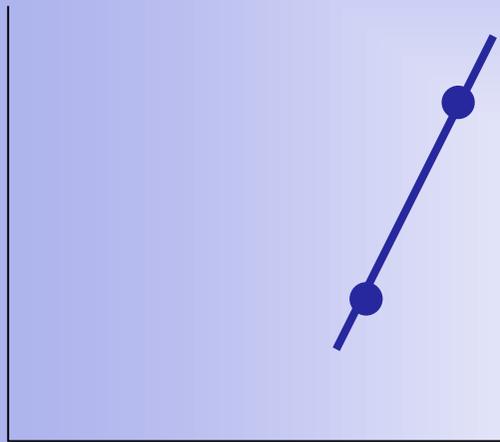
„Wenn der Körper selbst zur Strahlenquelle wird“  
von Frederic Vester, SZ vom 14.05.86

*„Die ständige ... natürliche Strahlung ... besteht bis auf wenige Ausnahmen aus immaterieller Strahlung, die von außen auf den Körper trifft, zum Teil gar nicht erst durch die Haut dringt“.*

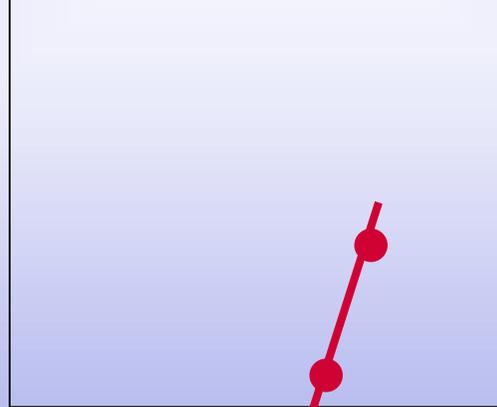
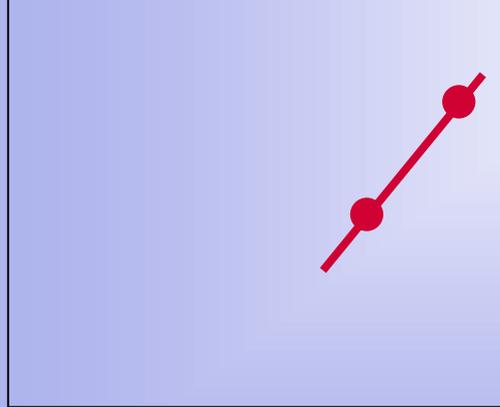
- Mehr als 50% der natürlichen Strahlungsexposition wird durch  $\beta$ -Strahlung („materielle“ Teilchen) inkorporierter Radionuklide verursacht
- „immaterielle“  $\gamma$ -Strahlung dringt weiter ein als „materielle“ Strahlung

# „Ergebnisse“ des Physikers Sternglass

Kindersterblichkeit



emittierte Radioaktivität



60 64 68

Dresden

60 64 68

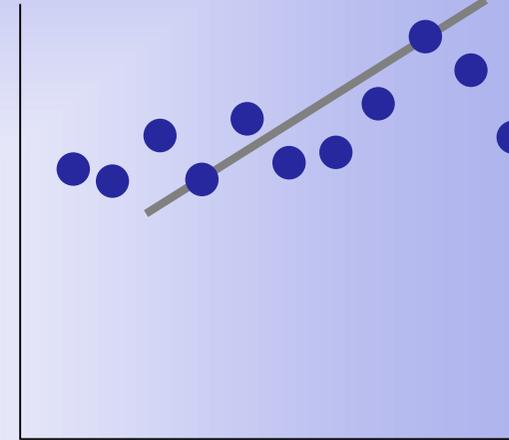
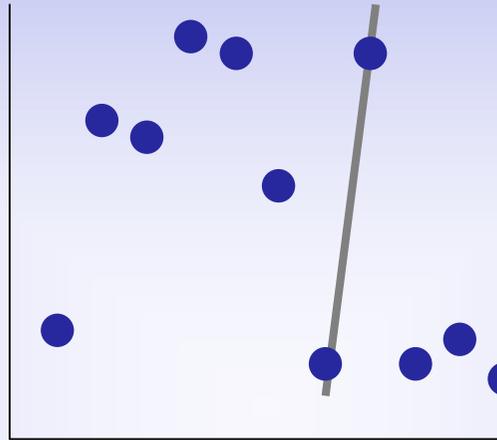
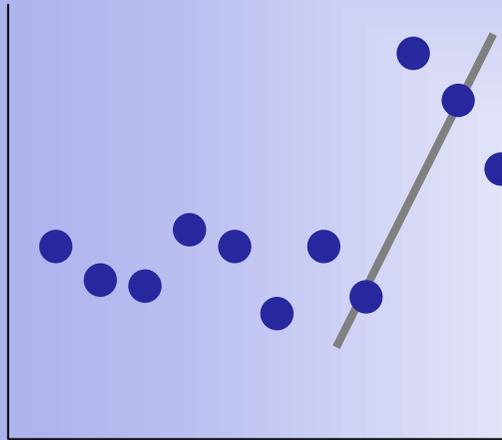
Humboldt Bay

60 64 68

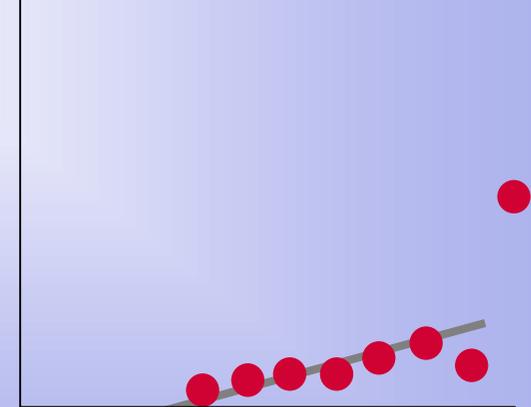
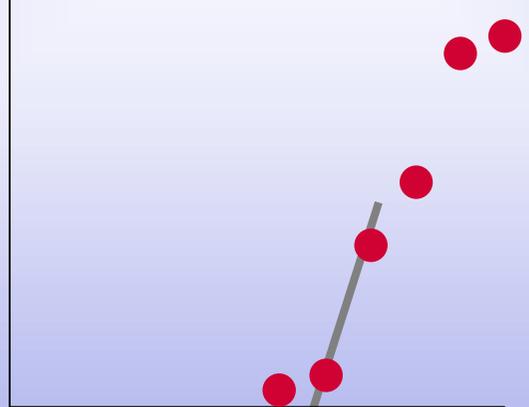
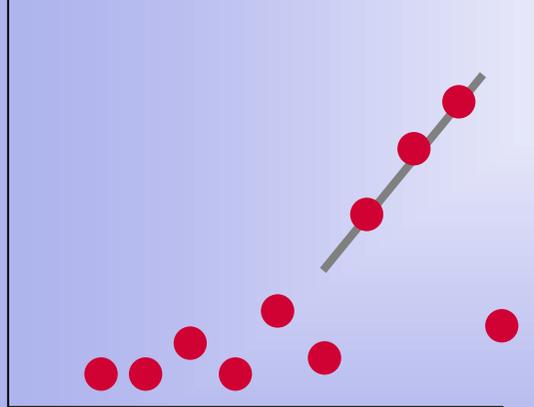
Indian Point

# „Ergebnisse“ des Physikers Sternglass

Kindersterblichkeit



emittierte Radioaktivität

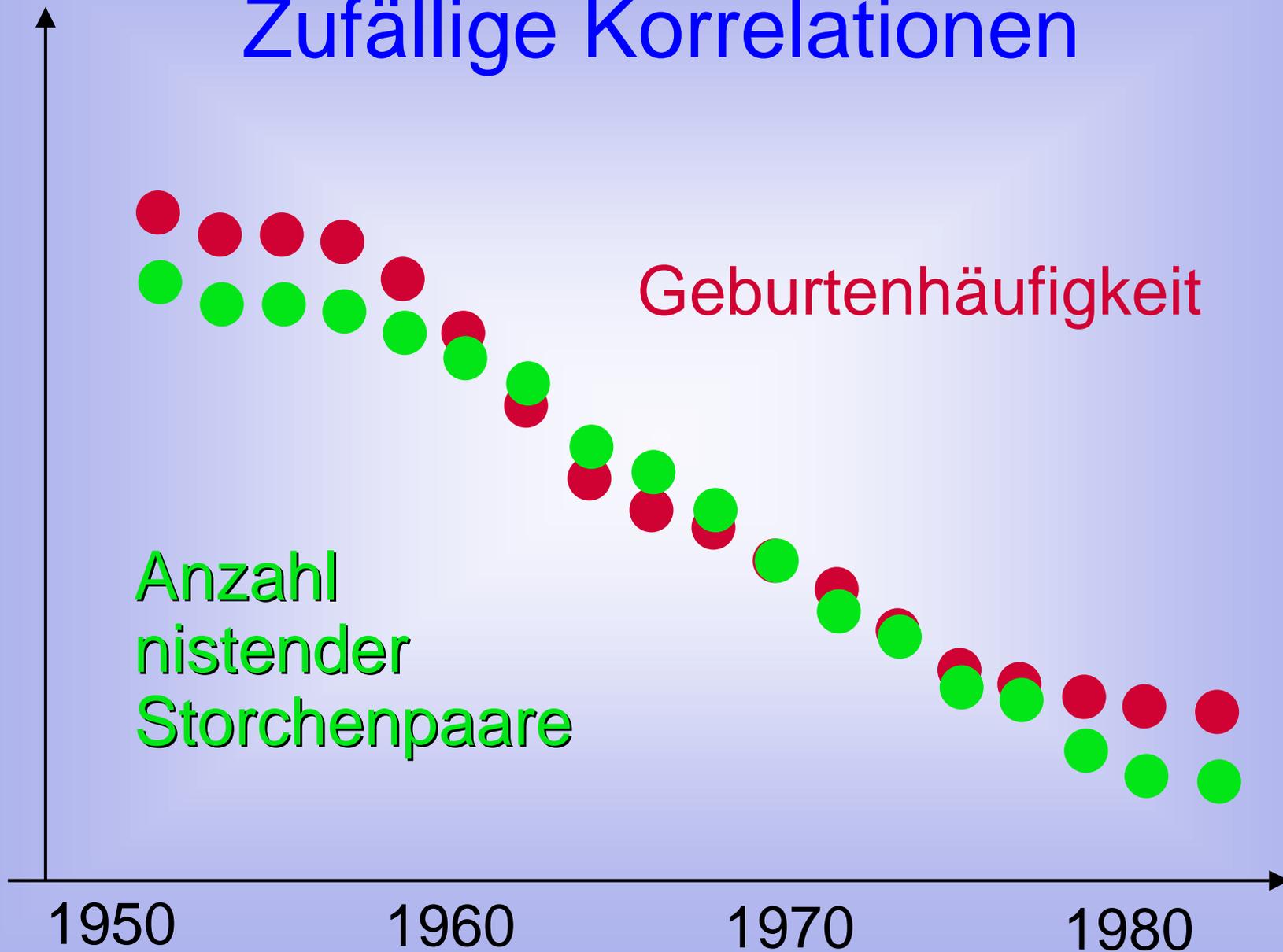


60 64 68  
Dresden

60 64 68  
Humboldt Bay

60 64 68  
Indian Point

# Zufällige Korrelationen



# Sterbestatistik von Arbeitern in Hanford

## Interpretation einer Statistik -1-

Beschäftigungsdauer	< 2 Jahre		> 2 Jahre	
untersuchte Arbeiter	7 767		13 075	
Todesursache	r	m	r	m
Herz/Kreislauf	0.45	0.45	0.46	0.46
Unfälle/Vergiftungen	0.13	0.11	0.10	0.10
andere	0.22	0.27	0.22	0.26
ungeklärt	0.03		0.02	
Krebs	0.17	0.17	0.20	0.18

r = relative Sterblichkeit der untersuchten Arbeiter

m = relative Sterblichkeit im Landesmittel

# Sterbestatistik von Arbeitern in Hanford

## Interpretation einer Statistik -2-

Von 13 075 Arbeitern waren gestorben **2 089**

in einer altersentsprechenden Kontroll-  
gruppe wären gestorben:

**2 741**

Herzerkrankungen

1 261

955

Unfälle, Vergiftungen

291

216

andere Ursachen

700

495

ungeklärt

49

Krebs

**489**

**414**

**In Hanford sind weniger Arbeiter an Krebs  
gestorben als im Landesmittel**

# Sterbestatistik von Arbeitern in Hanford

## Interpretation der Daten

Vor Arbeitsbeginn werden Arbeiter ausgesucht, die bezüglich ihres Herz- / Kreislaufsystems und der Atemwege gesund sind

⇒ das Risiko späterer Erkrankungen des Herzens und der Atemorgane ist verringert

Es gibt keine Möglichkeit, Krebs oder eine Krebsdisposition vor Krankheitsausbruch zu erkennen

⇒ das absolute Krebsrisiko bleibt unverändert

⇒ das relative Krebsrisiko muß zunehmen

# Radioaktivität und Strahlenrisiko

Radioaktivität ist die heute am besten erforschte  
Umweltnoxe

das Risiko von Radioaktivität in hoher Dosis ist  
bekannt, daraus wird eine Obergrenze für das  
Risiko bei niedriger Dosis abgeleitet

bekannt ist, daß bei Dosisreduktion das Risiko  
überproportional abnimmt

unbekannt ist, wie klein das Risiko bei niedriger  
Dosis und Dosisleistung tatsächlich ist

# Wirkung ionisierender Strahlung

physikalische Primärprozesse: Ionisierung

direkte  
Wirkung

indirekte  
Wirkung

chemische Sekundärprozesse:  
Radiolyse, Radikal- und Peroxidbildung

biochemische Veränderungen: Membrane, Enzyme, DNS

biologische Folgen (zelluläre Veränderungen):  
Chromosomenanomalie, Proliferationsstörung, Zelltod

Körperzellen

Keimzellen

akute oder  
Frühschäden

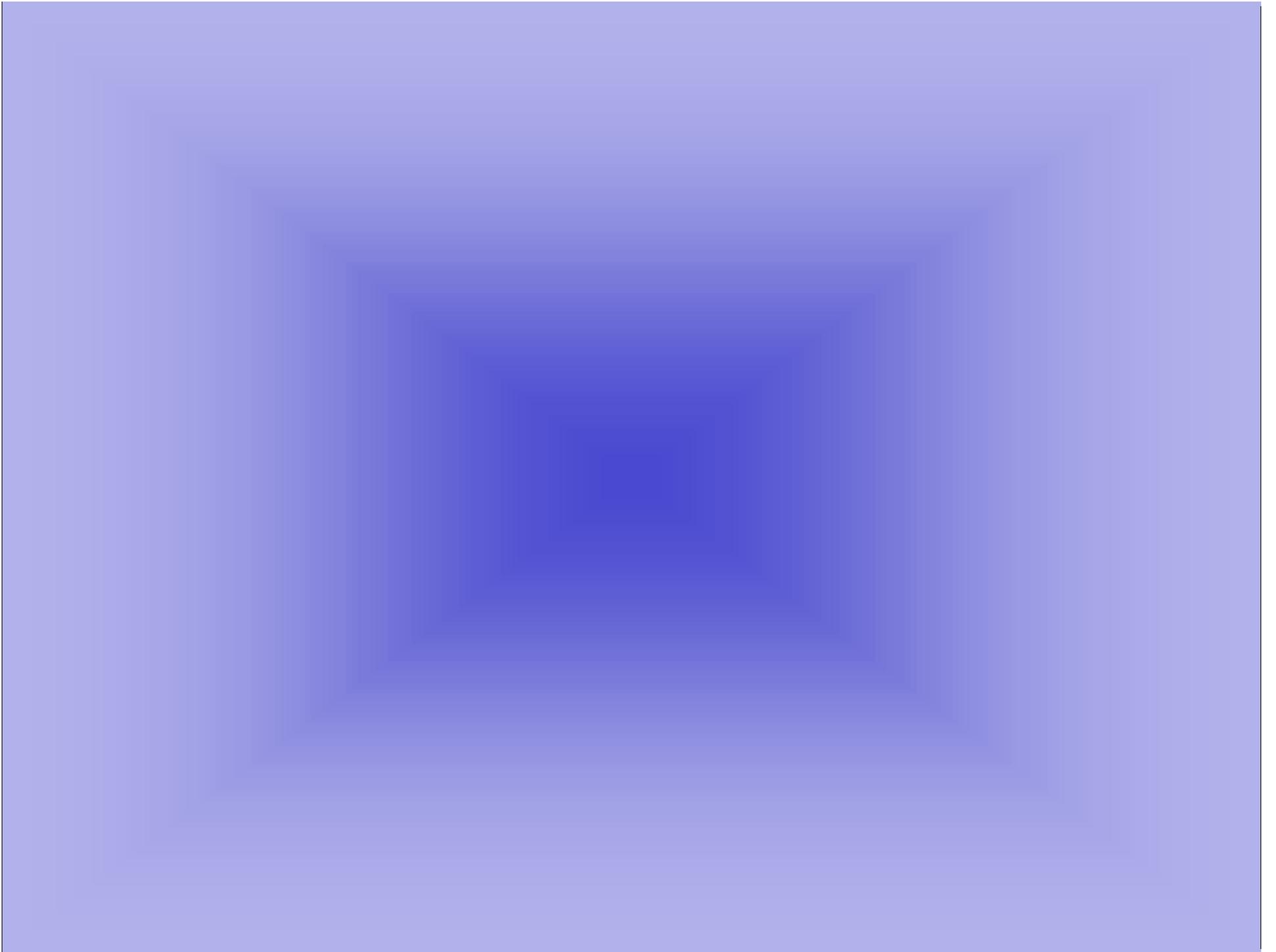
nicht bösartige  
Spätschäden

Tumor-  
induktion

Erbschäden

deterministische Strahlenschäden

stochastische Strahlenschäden



**Ende**