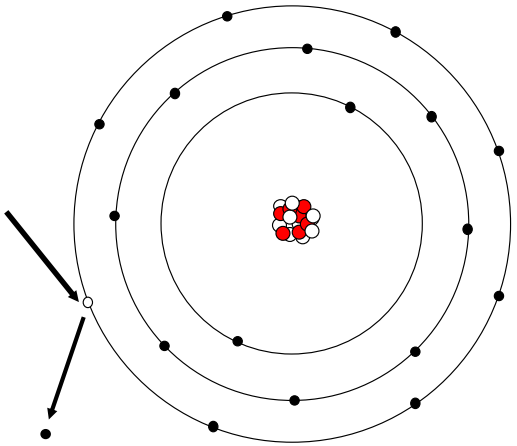
Strahleneffekte und Strahlenschutz (ionisierende Strahlung)

42. Sitzung des Nationalen Begleitgremiums (NBG)
9. September 2020
Berlin

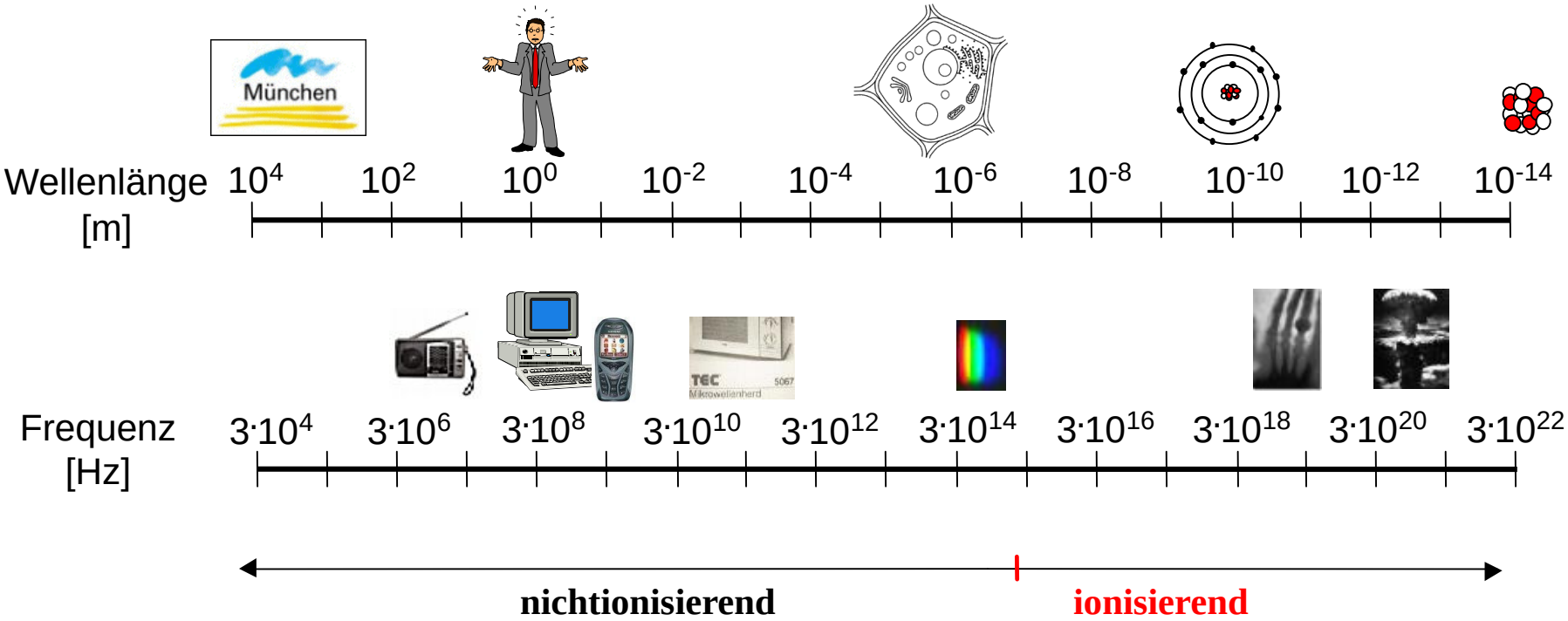
Prof. Dr. W. Rühm
Institut für Strahlenmedizin
Helmholtz Zentrum München, Neuherberg

Ionsierende Strahlung

- Strahlung, die Elektronen aus der Atomhülle entfernen kann
- Energie zur Induktion eines DNA-Doppelstrangbruchs: 10-15 eV



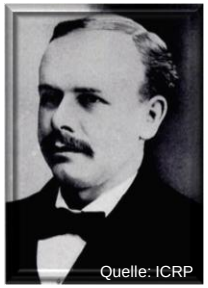
Beispiel: Elektromagnetische Strahlung



Die Geschichte

Quelle: Wikipedia

- Wilhelm Conrad Roentgen: Entdeckung der nach ihm benannten Röntgenstrahlung 1895; Nobelpreis 1901


Quelle: ICRP

- Wolfram Fuchs (deutschstämmiger Ingenieur): 1896 erste Strahlenschutzempfehlungen – Zeit, Abstand, Abschirmung

Courtesy: C. Clement, ICRP Secretary

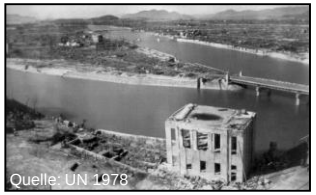
- Gründung der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) auf dem 2nd International Congress of Radiology 1928

- Anwendungen von Radioaktivität und ionisierender Strahlung werden begeistert angenommen

Quelle – Augergesellschaft

- Seit 1945: Wachsende Sorgen der Öffentlichkeit wegen möglicher strahleninduzierter Erbschäden und Krebserkrankungen

- Atombomben über Hiroshima und Nagasaki


Quelle: UN 1978

Quelle: US Army; in Days to Remember

- Atmosphärische Kernwaffentests

Bravo-Test: Quelle – US Air Force

- Fallout Lucky Dragon

Quelle – Wikipedia

- Chernobyl-Unfall 1986

http://new.chnpp.gov.ua

- Fukushima-Unfall 2011

Nhk, 12.3.2011 ca. 16:00 LT (Tepco 15:36)

> Ionisierende Strahlung ist eines der am besten untersuchten Karzinogene, internationale Forschung seit 125 Jahren!

- Wirkung an Molekülen (DNA), Zellen, Tieren, Menschen

Die internationale Arbeitsteilung im Strahlenschutz, vereinf.

Unscear (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation): Reviews scientific evidence on radiation exposures and effects

ICRP (International Commission on Radiological Protection): Develops recommendations for radiological protection

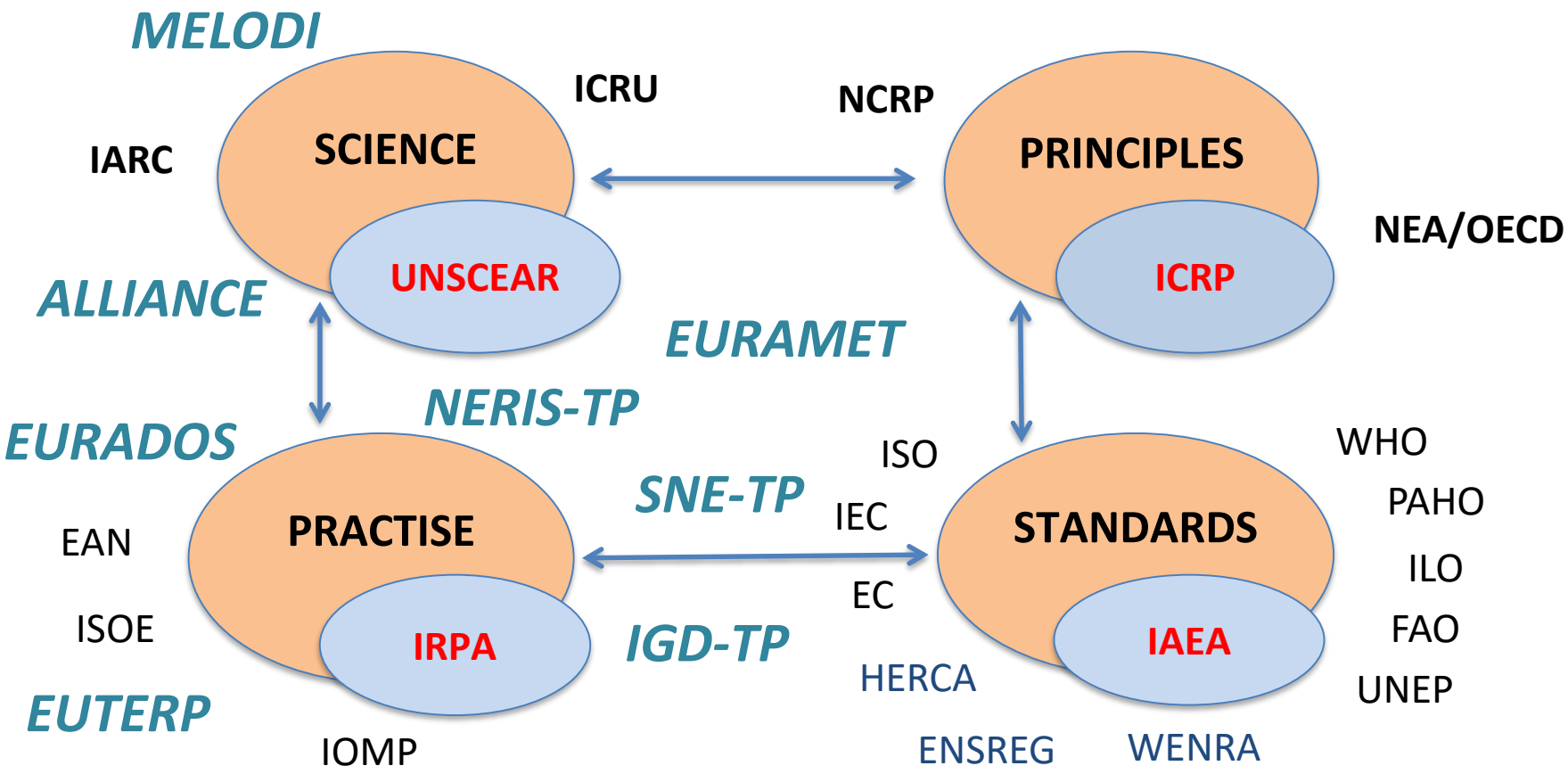
IAEA (International Atomic Energy Agency): Formulates basic safety standards

EC Article 31 Group: Advices EC in issuing Directives obligatory for all EU member states

Strahlenschutz Kommission (SSK): Advices German Government e.g. in transposing EC Directives in German law

Und – es gibt viel mehr „Mitspieler“ …

International Radiation Protection Organisations and EUROPEAN Research PLATFORMS



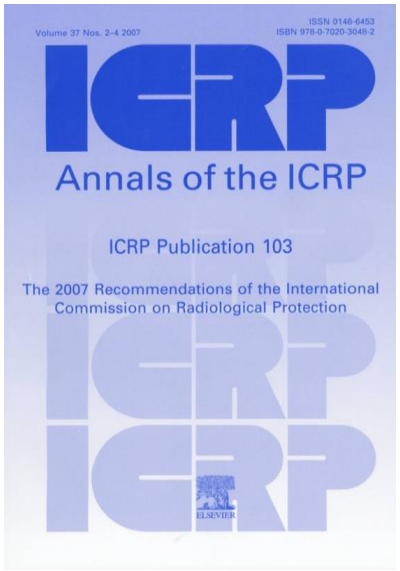
Courtesy: S. Salomaa, STUK

Grundzüge des Strahlenschutzes – die ICRP

- Gründung der International Commission on Radiological Protection (ICRP): 1928 (www.icrp.org)
- Gibt **Empfehlungen** zum Strahlenschutz
- Mission: **“To protect people from the detrimental effects of ionising radiation without unduly limiting its beneficial use“**
- **Wichtig: Informieren von Betroffenen, „empowerment of people“**

Grundpfeiler des Strahlenschutzes

- **Justification**: To do more good than harm
- **Application of dose limits**
- **Optimisation**: ALARA – „… should be kept **a**s **l**ow **a**s **r**easonably **a**chievable, taking into account economic and societal factors“
- Also keine „Dosisminimierung“ um jeden Preis



Gegenwärtige Strahlenschutzregelungen basieren auf breitem internationalen Konsens!

Aber: Abweichungen von ICRP-Empfehlungen möglich

- ICRP empfiehlt z.B. im beruflichen Strahlenschutz jährlichen Grenzwert für die effektive Dosis von 20 mSv
  - Bem: In den USA gilt 50 mSv pro Jahr
  - Bem: In D zusätzlich Berufslebenszeit-Dosis von 400 mSv

„… eines der am besten untersuchten Karzinogene…“

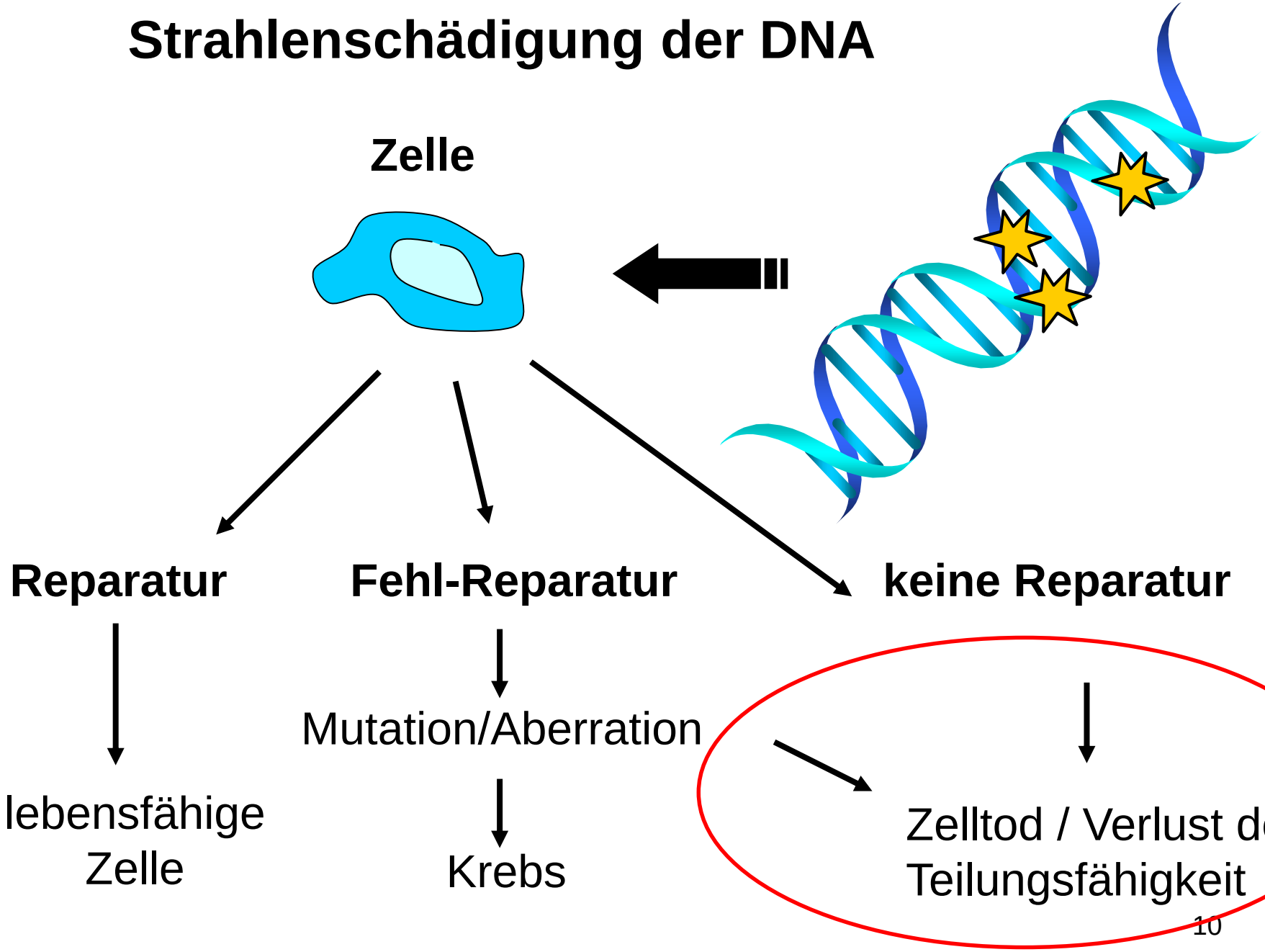
„… internationaler Konsens im Strahlenschutz…“

Trotzdem kontroverse Diskussionen?

>> Biologische Wirkung ionisierender Strahlung

Gewebeschäden (deterministische Schäden) und Stochastische Schäden

Strahlenschädigung der DNA



Deterministische Schäden („Tissue Reactions“)

Dosis	mittlere Überlebenszeit	Symptome
> 300.000 µSv	-	**Prodromalstadium** erste klinische Symptome wie z.B. Erbrechen, Kopfschmerzen, ...
> 2.000.000 µSv	mehrere Wochen	**Hämatopoetisches Syndrom** Knochenmarks-Aplasie (ungenügende Bildung blutbildender Zellen) Hämorrhagie (Blutungen), Infektionen …
> 10.000.000 µSv	2 Wochen	**Gastrointestinales Syndrom** Hämorrhagie, Infektionen Diarrhoe (Durchfall), Dehydration …
20.000.000 µSv	1-2 Tage	**Cerebrovaskuläres-Syndrom** Hirnödem (Flüssigkeitseinlagerung), kardiovaskuläre Insuffizienz …

Deterministische Strahlenschäden

- Es gibt einen **Schwellenwert**
- **Schwere des Auftretens steigt mit Dosis**
- Akute Strahlenkrankheit, Früh- und Spätfolgen der Strahlentherapie, Strahlenteratogenese (Organbildung)

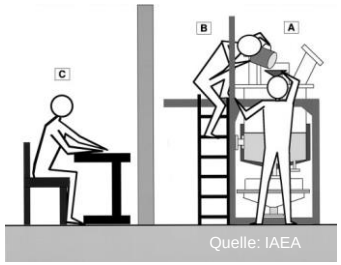
Hiroshima, Nagasaki

Goiania-Unfall

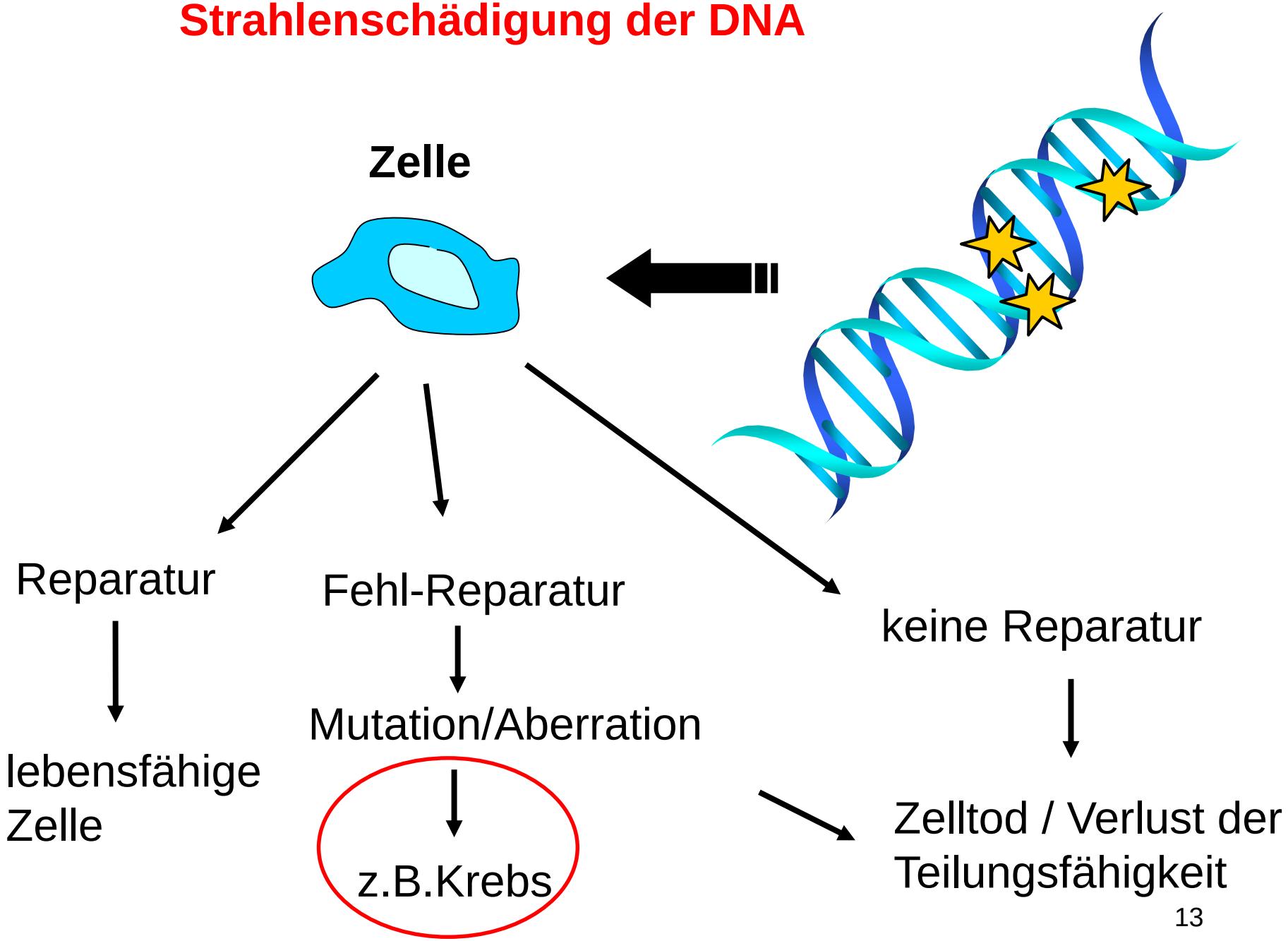
Chernobyl

Strahlentherapie

Tokai-Unfall



Strahlenschädigung der DNA



Stochastische Strahlenschäden

- Beruhen auf Mutationen und Aberrationen
- Es gibt keinen **Schwellenwert (Annahme im Strahlenschutz)**
- **Wahrscheinlichkeit des Auftretens steigt mit Dosis**

Bsp: Kanzerogenese, genetische Schäden

Quelle - Augergesellschaft

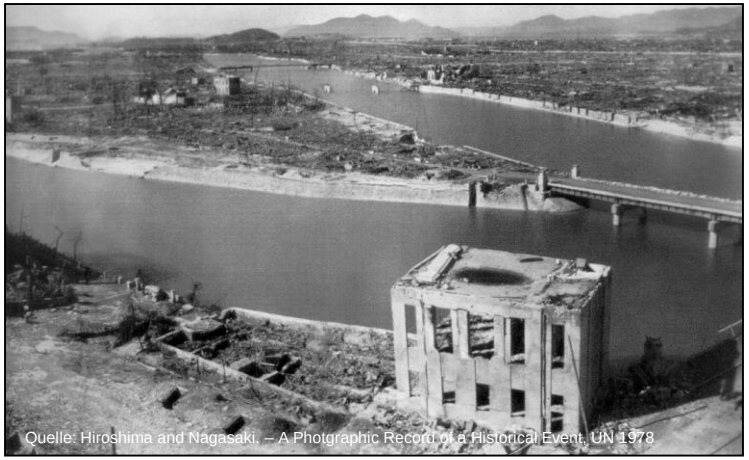
aber ...

… Kenntnisse über stochastische Wirkungen aus epidemiologische Untersuchungen an Menschen, die bestrahlt worden waren.

- Wichtigste Studie: **Atombombenüberlebende**
- Es gibt viele andere untersuchte Gruppen!

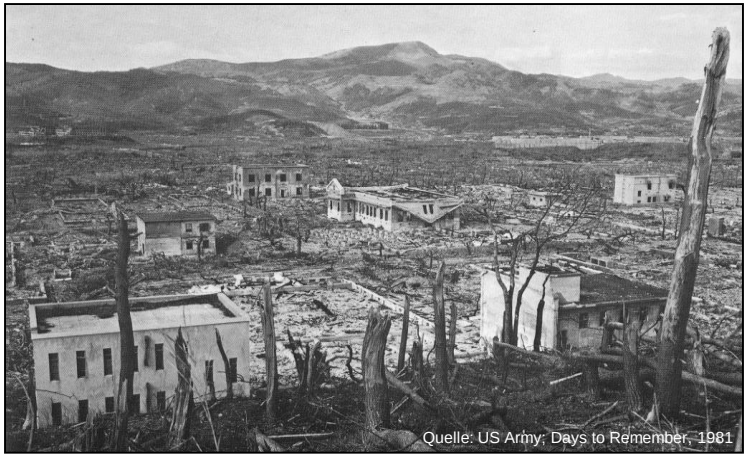
Untersuchungen an den Überlebenden der Atombomben-Explosionen über

Hiroshima



- 6. August 1945, 8:15
- Einwohner: 350.000
- Opfer (Ende 1945): 140.000

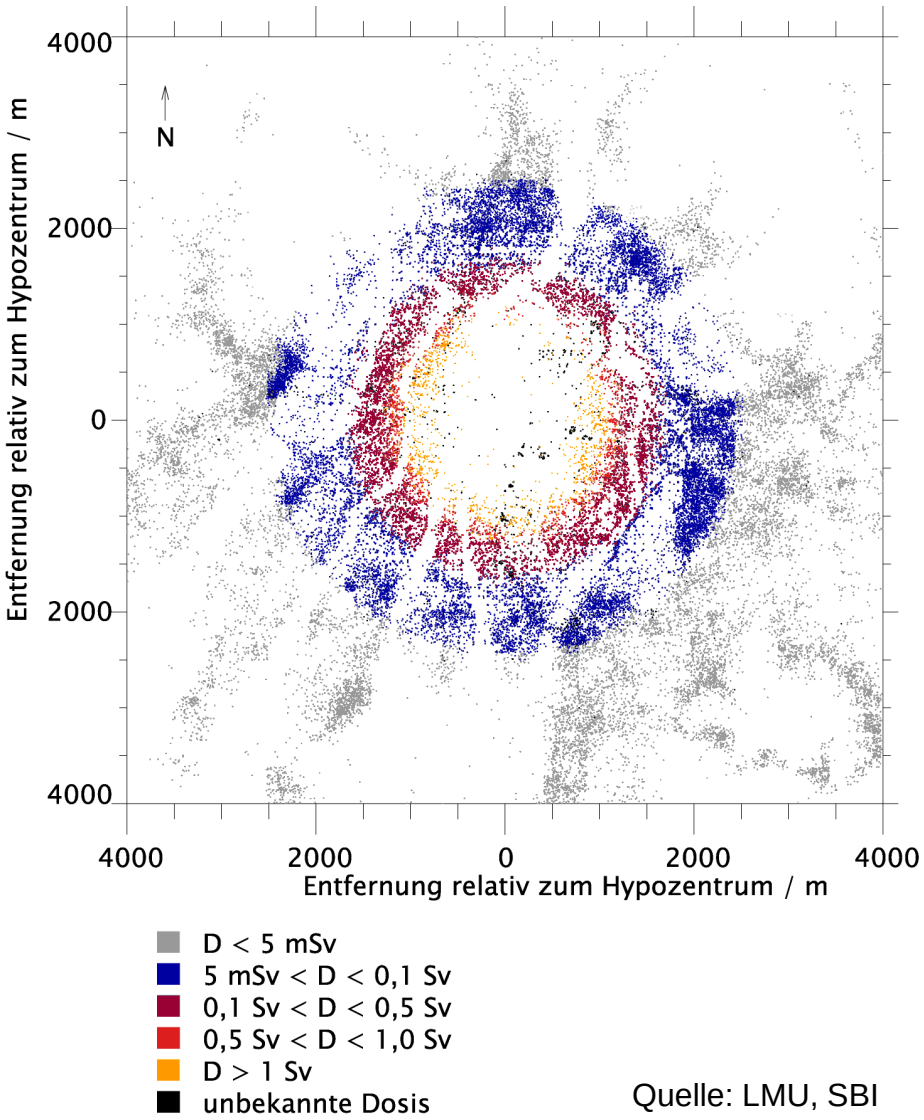
Nagasaki



- 9. August 1945, 11:02
- Einwohner: 270.000
- Opfer (Ende 1945): 70.000

Die Life-Span Study der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki

- ca. 120.000 Überlebende
- Individuelle Dosisabschätzung
- Durchschnittsdosis der Exponierten: 160.000 µSv



Aufenthaltsorte der Überlebenden zum Zeitpunkt der Explosion über Hiroshima

Quelle: LMU, SBI

The Life Span Study Cohort

- Follow-up of 120,000 survivors by
- Atomic Bomb Casualty Commission (ABCC): 1947 - 1975
- Radiation Effects Research Foundation (RERF): 1975 -

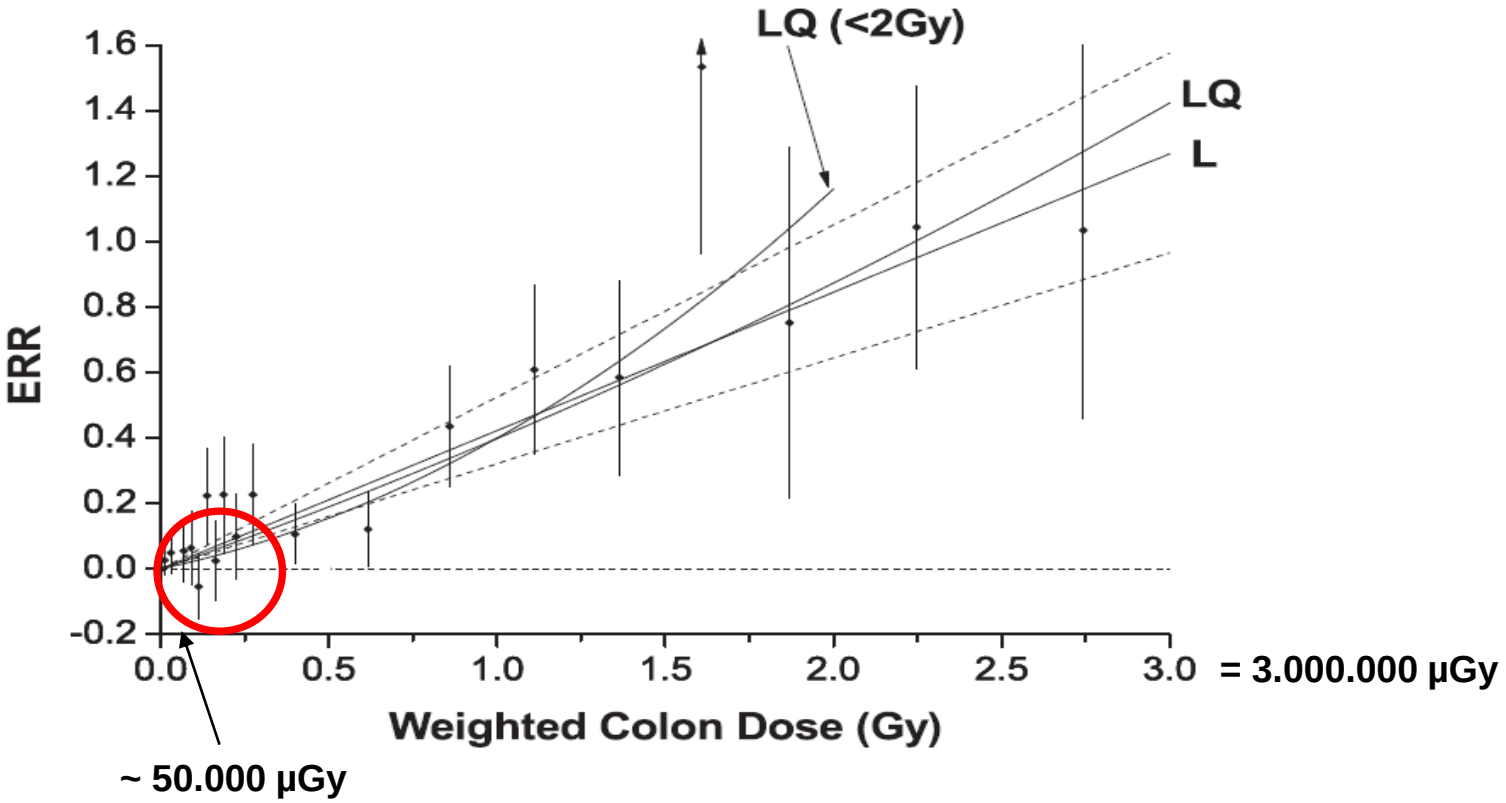
1950 - 1990	Hiroshima	Nagasaki	total	1950 – 2003 total
Survivors	58,459	28,113	**86,572**	**86,611**
Deaths	26,495	11,175	37,670	50,620
Solid tumors	5,436	2,142	7,578	10,929
Radiation-induced	247	87	**334**	**527**
Leukemia	196	53	249	310*)
Radiation-induced	70	17	**87**	**103*)**

Pierce et al. 1996, Report 12

Ozasa et al. 2012, Report 14

*) Richardson et al. 2009 (1950-2000)

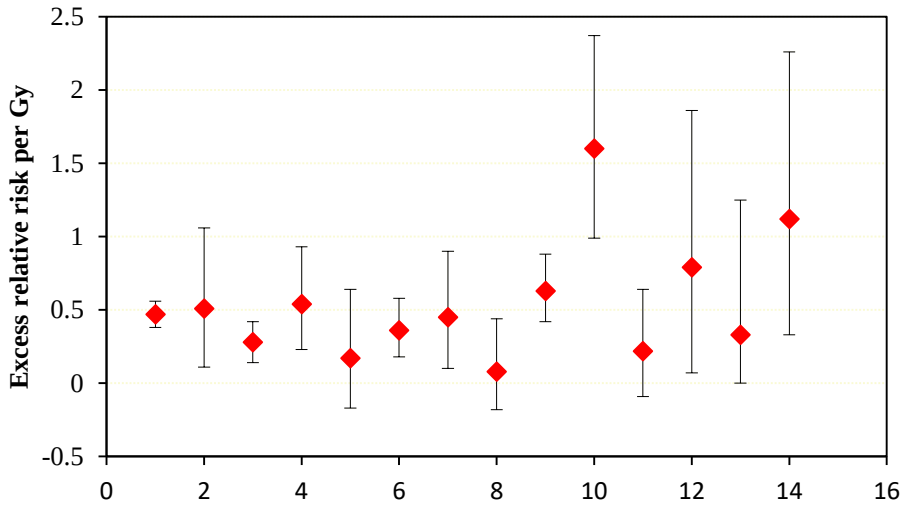
Mortalität durch alle soliden Tumoren



- ERR = (beob.-erwartet)/erwartet
- ERR=1: Risiko verdoppelt
- ≈ linearer Verlauf

- ERR/Gy (Steigung): 0,42 ± 0,10 / Gy
- bei 30 y age at exposure, age 70
- **Effekt ab ≈ 50.000-100.000 µGy statistisch signifikant**

Mortalität organabhängig



1 – all solid cancers; 2 – esophagus;
3 – stomach; 4 – colon;
5 – rectum; 6 – liver;
7 – gall bladder; 8 – pancreas;
9 – lung; 10 – breast;
11 – uterus; 12 – ovary;
13 – prostate; 14 – bladder

error bars represent 95% confidence intervals

Nicht-Krebserkrankungen (1950-2003) (Ozasa et al. 2012) ? ? ?

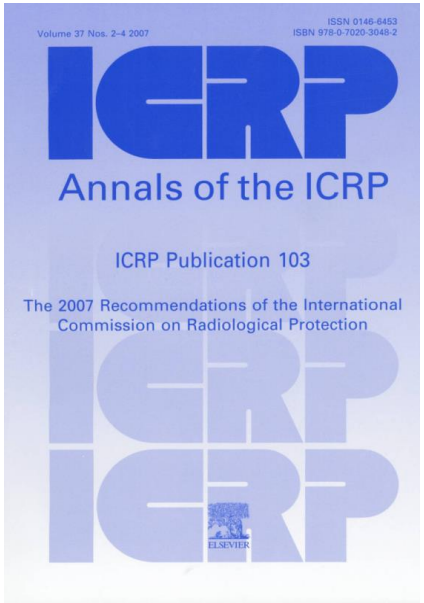
aufgetretene Fälle: 35.685 >>> davon strahleninduziert: **353**

Herzkreislauf, Schlaganfall, Atemwege, Verdauungstrakt
(ab ca. 500.000 µGy beobachtet)

außerdem z.B.:

Chromosomenaberrationen, Katarakte, aber (noch?) **keine Erbschäden!**

Momentan aktuellste Empfehlung der ICRP (aus Publ. 103 (2007))



Schadensgewichtete nominale Risikofaktoren für stochastische Effekte nach Exposition mit ionisierender Strahlung bei niedrigen Doisraten (in % / Sv)

	Krebs	Erbschäden	Gesamt
Bevölkerung	**5.5**	**0.2**	**5.7**
Erwachsene (Beruf)	4.1	0.1	4.2

Ist ein Sievert viel oder wenig?

Mittlere (!) jährliche Strahlenexposition in Deutschland

(Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz, Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht (2005))

Natürliche Quellen (ca. 2.100 µSv, 2004)

• Terrestrische Strahlung (Radionuklide in Erdkruste)	~ 400 µSv
• Kosmische Strahlung	~ 300 µSv
• Radon u. Radonfolgeprodukte	~ 1100 µSv
• Inkorporation natürlicher Radionuklide	~ 300 µSv

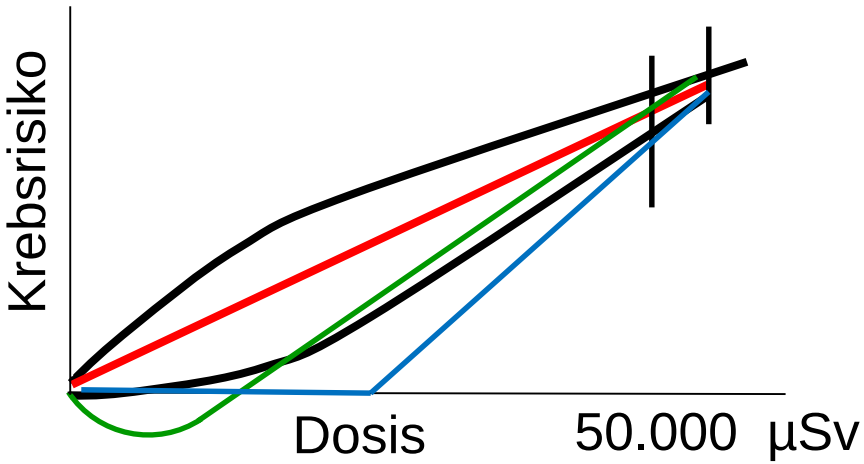
Künstliche Quellen (ca. 1.800 µSv, 2002)

• Medizin (Diagnose)	~ 1.800 µSv
• berufliche Exposition	< 10 µSv
• kerntechnische Anlagen	< 10 µSv
• Kernwaffen-Fallout	< 10 µSv
• Flugverkehr	< 10 µSv
• Tschernobyl	< 20 µSv

- **Kosmische Strahlung** abhängig von Höhe über Meeresspiegel
  - Berlin: ~ 300 µSv/a
  - La Paz (3900 m): ~ 2.000 µSv/a
- **Strahlendosisleistung im Flugzeug** abhängig von Breitengrad, Flughöhe, Sonnenaktivität
  - Flughöhe 10 km: ~ 5 µSv/h
- **Strahlendosis durch Chernobyl**
  - Süddeutschland, 50-Jahre-Folgedosis: ~ 2.000 µSv
  - Inkorporation von 1.000 Bq ^{137}Cs (Pilzmahlzeit): ~ 10 µSv
- **Mammographie** (1 Aufnahme, Organdosis): ~ 1.500 – 2.000 µSv
- **CT-Aufnahme Thorax**: ~ 10.000 µSv

Wie zu den kleinen Dosen, die im Strahlenschutz oft relevant sind, extrapolieren???

Wie extrapolieren zu kleineren Dosen (z.B. 10 µSv pro Jahr bei Endlagerung)?



- Supralinear?
- Linear?
- Sublinear?
- Schwelle?
- Positiver Effekt?

- **Die schlechte Nachricht**: Für das Krebsrisiko wissen wir es nicht (es gibt viele nichtlineare Effekte auf zellulärer Ebene)!

- **Die gute Nachricht**: Wenn, dann muss das Krebsrisiko bei kleinen Dosen zumindest klein sein, sonst hätten wir es schon gesehen!

- ***Pragmatischer*** **Ansatz im praktischen Strahlenschutz: Linear-no-Threshold (LNT) Modell (außer bei Leukämie)**

Zusammenfassung

- **Im Strahlenschutz versucht man, vor den schädlichen Folgen einer Strahlenexposition zu schützen, ohne die positive Anwendung von ionisierender Strahlung unnötig zu behindern**
- **Ionisierende Strahlung ist eines der am besten untersuchten Karzinogene**
- **Gegenwärtige Strahlenschutzregelungen basieren auf breitem internationalen Konsens**
- **Deterministische Strahlenschäden haben eine Dosisschwelle, die Dosis bestimmt die Schwere des Schadens**
- **Stochastische Strahlenschäden haben vermutlich keine Dosis-schwelle, die Dosis bestimmt die Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens**

- **Dosisgrenzwerte sind so gewählt, dass deterministische Schäden ausgeschlossen und stochastische Schäden tolerierbar sind**

- **Studien an den Atombombenüberlebenden sind (immer noch) die wichtigste Quelle unseres Wissens über strahleninduzierte stochastische Schäden am Menschen**

- **Beobachtet wurde u.a. eine Erhöhung von soliden Tumoren, Leukämie, Trübungen der Augenlinse, aber keine Erbschäden**

- **Im Strahlenschutz wird aus praktischen Überlegungen linear zu kleinen Dosen extrapoliert**

- **Die mittlere jährliche effektive Strahlendosis in Deutschland beträgt ca. 4.000 µSv**

- **Es gibt nicht 0 oder z.B. 10 µSv pro Jahr, nur 4.000 oder 4.010 µSv pro Jahr**

Danke!