

Biologische Wirkungen ionisierender Strahlung und die Befunde von Hiroshima und Nagasaki

von Winfried Koelzer

e-mail Winfried.Koelzer@energie-fakten.de

Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Bereits wenige Monate nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen 1895 und der natürlichen Radioaktivität wurden erste Berichte über schädliche Wirkungen dieser Strahlen auf das menschliche Gewebe, insbesondere Wirkungen auf die Haut, veröffentlicht. 1902 wurde der erste tödliche Strahlenkrebs und 1927 Befunde über genetische Veränderungen durch Röntgenstrahlung an der Fruchtfliege beschrieben. Die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlung beruht auf ihrer Eigenschaft, Atome oder Moleküle anzuregen oder zu ionisieren, d. h. elektrisch aufzuladen. Ein Teil dieser physikalischen Effekte kann zu Konsequenzen im biologischen Bereich führen, d. h. organisches Gewebe verändern oder schädigen, in den meisten Fällen wird aber der Schaden von der Zelle repariert oder die Zelle wird abgetötet. Das Absterben einzelner Zellen ist biologisch völlig bedeutungslos, weil

der Körper ohnehin die meisten seiner Zellen regelmäßig austauscht. Wenn jedoch eine hohe Zahl von Zellen in einem Organ oder Gewebe abgetötet wird, wird die Funktionsfähigkeit des Organs oder Gewebes beeinträchtigt. Schäden dieser Art werden Strahlenfrühschäden genannt. Beim Menschen treten solche Schäden - abhängig vom bestrahlten Organ oder Gewebe - erst oberhalb von 0,2 bis 2 Sievert -Sv - (Sievert ist das Maß für die biologische Strahlenwirkung, die sog. Körperdosis) auf. Bleibt eine nicht oder nicht erfolgreich reparierte Zelle lebensfähig, kann das u. U. zu „stochastischen“ (mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten auftretenden, aber im Einzelfall nicht vorhersehbaren) Strahlenschäden führen. Hierzu gehören Leukämie und Krebs sowie genetischen Veränderungen. Für diese Schadensarten konnte bisher keine untere Dosischwelle nachgewiesen werden.

Durch die Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki starben etwa 150 000 bis 220 000 Menschen durch die unmittelbaren Explosionswirkungen wie Druckwelle, einstürzende Bauwerke, Hitze und Strahlung innerhalb der ersten beiden Monate. Die seit 1950 von der japanisch/amerikanischen Radiation Effects Research Foundation durchgeführten Untersuchungen über die Sterblichkeit an den Atombombenüberlebenden beziehen sich auf 120 321 Personen, von denen sich 93 741 Personen zum Zeitpunkt der Explosionen in Hiroshima und Nagasaki aufhielten. Davon konnte für 86 572 Überlebende eine Berechnung der Strahlendosis durchgeführt werden. 62 % dieser Personen erhielten eine Dosis von weniger als 20 Millisievert - mSv (tausendstel Sievert), 32 % zwischen 20 und 500 mSv und 6 % mehr als 500 mSv. Unter diesen 86 572 Personen sind

von 1950 bis 1997 insgesamt 9 335 Krebssterbefälle aufgetreten, 440 mehr als in einer unbestrahlten Population zu erwarten waren. Für Leukämie liegen die Zahlen von 1950 bis 1990 vor: 249 Leukämiesterbefälle, 87 mehr als erwartet. Aus den Daten ist aber auch zu entnehmen, dass für die rund 37 500 Personen mit Strahlendosen unterhalb 5 mSv gar keine erhöhte Krebssterblichkeit festgestellt werden konnte. Im Gegensatz zu den anfänglichen Befürchtungen haben die Untersuchungen an den Kindern und Kindeskindern der Atombomben-überlebenden bisher keinen Hinweis auf eine strahlenbedingte Erhöhung vererbbarer Effekte ergeben.

Biologische Wirkungen ionisierender Strahlung und die Befunde von Hiroshima und Nagasaki

von [Winfried Koelzer](#)

e-mail Winfried.Koelzer@energie-fakten.de

Hier die Fakten - Langfassung

Frühe Berichte über Strahlenschäden

Bereits kurz nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen im November 1895 und der natürlichen Radioaktivität im März 1896 wurden erste Berichte über schädliche Wirkungen dieser Strahlen auf das menschliche Gewebe, insbesondere Wirkungen auf die Haut, veröffentlicht („Es dürfte noch nicht allgemein bekannt sein, dass die so viel besprochenen X-Strahlen die Eigenschaft besitzen, ähnlich den Sonnenstrahlen, die Haut zu verbrennen.“ Deutsche Medicinische Wochenschrift, 9. Juli 1896). 1902 wurde der erste tödliche Strahlenkrebs bei einem Röntgenologen aus England beschrieben und 1927 veröffentlichte Hermann J. Muller seine Befunde über genetische Veränderungen durch Röntgenstrahlung, die er bei Experimenten an der Fruchtfliege gewonnen hatte.

Biologische Wirkung ionisierender Strahlung

Die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlung beruht

auf ihrer Eigenschaft, Atome oder Moleküle anzuregen oder zu ionisieren. Ein Teil dieser physikalischen Primäreffekte kann zu Konsequenzen im biologischen Bereich führen, d. h. organisches Gewebe verändern oder schädigen, aber eben nur ein Teil, denn erstens ist eine Zelle in den allermeisten Fällen in der Lage, die aus einem physikalischen Primäreffekt folgenden chemischen Sekundäreffekte (z. B. die Bildung freier Radikale wie OH⁻) vollständig zu reparieren und zweitens kann im Falle des Versagens der Reparatur die geschädigte Zelle durch intra- und interzelluläre Effekte eliminiert werden (siehe auch [„Wie nützlich und wie schädlich sind Strahlen“](#)). Reparatur oder Eliminierung beseitigen die Schäden. Das Eliminieren (Absterben) einzelner Zellen ist biologisch völlig bedeutungslos, weil der Körper ohnehin die meisten seiner Zellen regelmäßig austauscht. Wenn jedoch eine hohe Zahl von Zellen in einem Organ oder Gewebe abgetötet wird, wird die Funktionsfähigkeit des Organs oder Gewebes be-

einträchtigt. Schäden dieser Art werden „deterministische“ Strahlenschäden, Strahlenfrühschäden oder akute Schäden genannt. Schäden dieser Art sind z. B. verbrennungsähnliche Hautschäden, Katarakt der Augenlinse oder eine Störung der blutbildenden Zellen.

Bleibt eine nicht oder nicht erfolgreich reparierte Zelle lebensfähig, kann das (muss aber nicht, die meisten bleibenden Veränderungen sind biologisch unbedeutsam) zu so genannten „stochastischen“ Strahlenschäden führen. Hierzu gehören die somatischen Schäden (Schäden an Körperzellen, die sich im betroffenen Individuum auswirken) Leukämie und Krebs und die genetischen Veränderungen (Schäden im Erbgut der Keimzellen, die sich erst in der Nachkommenschaft auswirken).

Deterministische Strahlenschäden

Der Verlust vieler Zellen eines Gewebes durch Zelltod kann - wie gesagt - zu einem Funktionsverlust des Gewebes führen.

LANGFASSUNG

Bei niedrigen Strahlendosen ist die Zahl der abgetöteten Zellen hierfür zu klein. Oberhalb eines bestimmten Schwellenwertes treten jedoch innerhalb kurzer Zeit charakteristische Krankheitsbilder auf (akute Strahlenkrankheit). Beim Menschen beträgt dieser Schwellenwert abhängig vom bestrahlten Organ oder Gewebe 0,2 bis 2 Sv.

Da mit zunehmender Dosis immer mehr Zellen zerstört werden, wird das Krankheitsbild oberhalb des Schwellenwertes mit zunehmender Dosis immer schwerer. Bei sehr hohen Dosen (beim Menschen oberhalb etwa 7 bis 10 Sv Ganzkörperbestrahlung) tritt der Tod ein.

Stochastische Strahlenschäden

Im Gegensatz zu den akuten Wirkungen, bei denen dosisabhängig die Schwere des Krankheitsbildes verändert wird, ist bei den stochastischen Effekten die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens dosisabhängig. Bei diesen Schäden liegt zwischen Ursache und beobachtetem Effekt eine Latenzzeit von Jahren bis Jahrzehnten, daher spricht man auch von Spätschäden. Das Auftreten stochastischer Schäden ist unabhängig davon, ob vorher eine akute Wirkung aufgetreten ist oder nicht. Man unterscheidet zwischen somatischen Wirkungen bei Schäden an den Körperzellen der betroffenen Person und genetischen Wirkungen, wenn das Erbgut der Keimzellen verändert ist. Eine solche Erbgutveränderung ist nicht gleichbedeutend mit einem Erbschaden in den Folgegenerationen, weil Repara-

turen und Eliminierung (einschließlich Nicht-Berücksichtigung der geschädigten Keimzelle bei der Produktion von Nachkommen) auch hier möglich und meist auch erfolgreich sind, kann aber zu einem solchen führen.

Somatische Strahlenschäden

Typische somatische Strahlenschäden sind Leukämie und Krebs. Bei hoher Dosis und Dosisleistung lässt sich ein kausaler Zusammenhang zwischen Strahlendosis und Krebs- oder Leukämierate nachweisen. Bei niedriger Dosis und Dosisleistung ist die mögliche Erhöhung des Leukämie- und Krebsrisikos so gering, dass sie wegen der hohen spontanen Krebsrate - in Deutschland sterben etwa 25 % aller Menschen an Krebs - zahlenmäßig nicht mehr erfassbar ist. Zur konservativen Abschätzung - nicht zur Berechnung! - der Wirksamkeit kleiner Strahlendosen bei niedriger Dosisleistung bedient man sich deshalb des Verfahrens der Extrapolation, wobei man von den im hohen Dosisbereichen gefundenen Wirkungen auf den Bereich niedriger Dosen umrechnet. Die Höhe des auf diese Weise quantifizierbaren Risikos ist stark von der Wahl des mathematischen Modells abhängig. Die vorliegenden Ergebnisse erlauben es nicht, abschließend ein Modell als das richtige zu bezeichnen. Die im Strahlenschutz heute übliche Risikoabschätzung nach einem linearen Modell ohne Schwellenwert ist der Versuch, eine Obergrenze des strahlenbedingten Risikos zu definieren und stellt keinesfalls einen Beweis des

Schlagwortes "Keine Dosis ohne Risiko" dar.

Im Gegenteil, infolge der unter bestimmten Randbedingungen nachgewiesenen strahlenbedingten Stimulierung der zellulären Reparatur- und Eliminierungsprozesse kann heute ein Schwellenwert nicht mehr aus grundsätzlichen Überlegungen heraus verworfen werden (siehe [Wie nützlich und wie schädlich sind Strahlen](#)). Ob ein solcher Schwellenwert allerdings auch tatsächlich existiert, kann nur durch weitere Forschungsarbeiten geklärt werden.

Genetische Effekte

Genetische Effekte sind erst in den folgenden Generationen feststellbar. Dominante Mutationen treten bereits in der ersten Generation nach Bestrahlung auf, rezessive Mutationen oft erst viele Generationen später. Infolge der hohen spontanen Mutationsrate stößt die Abschätzung des genetischen Risikos einer Bestrahlung grundsätzlich auf ähnliche Schwierigkeiten wie die Abschätzung des somatischen Risikos. Erschwerend kommt noch hinzu, dass strahlenbedingte Erbschäden auf jeden Fall so selten sind, dass sie bei Menschen noch in keinem Fall beobachtet wurden. Die auffallende Diskrepanz zu Krebserkrankungen ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Reparatur- und Eliminierungsprozesse bei Keimzellen besonders effektiv arbeiten, vielleicht auch deshalb, weil der Natur die Arterhaltung immer wichtiger war als die Erhaltung des Individuums.

LANGFASSUNG

Strahlenepidemiologische Untersuchungen der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki

Durch den Atombombenabwurf am 6. August 1945 auf Hiroshima starben von den geschätzten 310 000 Einwohnern der Stadt etwa 90 000 bis 140 000 Menschen durch die unmittelbaren Explosionswirkungen wie Druckwelle, Hitze, Strahlung und einstürzende Bauwerke. Genauere Angaben sind nicht möglich, da keine nachprüfbareren Angaben über militärisches Personal und Zwangsarbeiter vorliegen. Durch die Atombombe vom 9. August 1945 auf Nagasaki starben von den rund 250 000 Einwohnern 60 000 bis 80 000 Personen an den unmittelbaren Wirkungen innerhalb der ersten beiden Monate.

Die seit 1950 von der Radiation Effects Research Foundation - einer gemeinsam von Japan und den USA getragenen wissenschaftlichen Einrichtung mit Sitz in Hiroshima und Nagasaki - durchgeführten Untersuchungen über die Sterblichkeit an den Atombombenüberlebenden beziehen sich auf die so genannte Life Span Study (LSS)-Untersuchungsgruppe mit insgesamt 120 321 Personen, von denen sich 93 741 Personen zum Zeitpunkt der Explosionen in Hiroshima und Nagasaki aufhielten. Davon konnte für 86 572 Überlebende aufgrund detaillierter Angaben über den Aufenthaltsort eine Berechnung der Strahlendosis durchgeführt werden. Die LSS-Gruppe umfasst mit 50 113 Personen fast alle Überlebenden aus dem 2,5-km-Radius um das

Hypozentrum der Explosion und weitere 36 459 Personen als Vergleichsgruppe mit ähnlicher Größe und vergleichbarer Altersstruktur diejenigen Personen, die sich im Bereich von 2,5 bis 10 km vom Hypozentrum aufhielten und eine vernachlässigbare Strahlendosis (weniger als 5 mSv) erhielten.

Von den 86 572 Überlebenden, für die eine Dosisberechnung erfolgte, erhielten 53 380 (62 %) eine Dosis von weniger als 20 Millisievert, 15 928 eine solche zwischen 20 und 100 Millisievert, 11 775 Personen erhielten 100 bis 500 Millisievert und 5 489 Personen erhielten mehr als 500 Millisievert.

Von diesen 86 572 Personen, die die zentrale Untersuchungsgruppe für die Ermittlung der Strahlenauswirkungen darstellen, sind von 1950 bis Ende 1990 insgesamt 37 764 Personen verstorben, davon 7 578 an Krebs und 249 an Leukämie. Die erwarteten Zahlen betragen 7 244 Krebs- und 162 Leukämieerbfälle. Damit lassen sich in dieser Untersuchungsgruppe 334 Krebs- und 87 Leukämieerbfälle - insgesamt also 421 - auf die Strahlenspätwirkungen der Bombenabwürfe zurückführen.

Im Jahre 2003 veröffentlichte die Radiation Effects Research Foundation Ergebnisse über die Fortführung ihrer Untersuchungen für die Jahre 1991 bis 1997. Es ergab sich kein Hinweis auf eine weiterhin erhöhte Leukämieerbfälle, während für die Krebssterbfälle weiterhin eine erhöhte Rate festgestellt wurde. Von 1950 bis nunmehr 1997 sind insgesamt 9 335 Krebssterbfälle aufgetreten, 440 mehr als

erwartet. Aus den Daten ist aber auch zu entnehmen, dass für die rund 37 500 Personen mit Strahlendosen unterhalb 5 Millisievert gar keine erhöhte Krebssterblichkeit festgestellt werden konnte.

Die Radiation Effects Research Foundation bezieht auch Sterbefälle durch nicht krebsbedingte Erkrankungen in ihre Untersuchungen ein. Für einige Krankheiten wie Schlaganfall, Lungenentzündung oder Leberzirrhose wurden dabei für Strahlendosen oberhalb von 500 Millisievert erhöhte Sterblichkeitsraten festgestellt, die allerdings bezogen auf die Gesamtzahl deutlich niedriger liegen als bei den Krebssterbefällen. Die Gesamtzahl der Sterbefälle durch nicht krebsbedingte Erkrankungen in der Untersuchungsgruppe im Zeitraum 1950 - 1997 betrug 31 881 gegenüber einer erwarteten Zahl von 31 631 - ein Mehr von 250 Sterbefällen.

Im Gegensatz zu den anfänglichen Befürchtungen haben die Untersuchungen an den Kindern und Kindeskindern der Atombombenüberlebenden bisher keinen Hinweis auf eine strahlenbedingte Erhöhung vererbbarer Effekte ergeben. ■