

Genetische Folgen ionisierender Strahlung im Niederdosisbereich

Inge Schmitz-Feuerhake, Gesellschaft für Strahlenschutz e.V., Hannover
ingesf@uni-bremen.de

Die derzeitige offizielle Einschätzung des genetischen Strahlenrisikos

Eine der bedeutendsten medizinischen Entdeckungen in den 1920-er Jahren war, dass Röntgenstrahlen Mutationen erzeugen, d.h. wenn männliche und/oder weibliche Geschlechtszellen bestrahlt werden, weisen die Nachkommen Krankheiten oder Missbildungen auf, die sich in die nachkommenden Generationen weiter vererben können.

Herman Joseph Muller, der für diese Erkenntnisse 1946 den Nobelpreis für Medizin erhielt, schloss aus seinen Untersuchungen, dass selbst kleinste Strahlendosen wie auch die natürliche Hintergrundstrahlung mutagen sind.

1955, zur Genfer Atomkonferenz, war der berühmte Strahlenforscher als Festredner vorgesehen. Dort wollte US-Präsident Eisenhower das Programm „Atoms für Peace“ ausrufen, den Einstieg der Industrienationen in das Zeitalter der sog. friedlichen Verwendung der Atomenergie.

Rechtzeitig merkte man jedoch, dass Muller ein Bedenkenträger war gegenüber irgendwelchen zusätzlichen ionisierenden Strahlungsquellen, und deshalb wurde er wieder ausgeladen. Das Manuskript seines Vortrags hatte er zu dem Zeitpunkt bereits fertig.

Seitdem kann man in der Geschichte des Strahlenschutzes verfolgen, dass sich im Interesse der Atomindustrie und der Anwender von ionisierender Strahlung zu friedlichen und militärischen Zwecken die Hypothesen zur Verharmlosung ihrer schädlichen Folgen durchsetzten.

Das normgebende Gremium für unsere Strahlenschutzgesetzgebung ist die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP. Sie hat immerhin aus den Lehren Mullers den Begriff des „stochastischen“ Strahlenschadens entwickelt: Wird ein großes Kollektiv mit einer geringen Dosis bestrahlt, steigt die Anzahl der Schadensfälle mit der Gesamtdosis, jedoch bei jeweils der halben Dosis gibt es immer noch eine erhöhte Schadensrate. Daher besteht kein „Schwellenwert“ (threshold), d.h. ein unschädlicher Dosisbereich. Die Dosiswirkungskurve beginnt ab der Dosis Null zu steigen, weil ein einzelnes Strahlenquant im Prinzip eine Mutation auslösen kann.

Obwohl nach dem Tschernobylunfall 1986 sehr viele genetische Schäden aufgetreten sind, die vorher nicht bekannt waren, und bekannte Effekte bestätigt wurden, hat jedoch die ICRP im Jahr 2007 ihre Einschätzung genetischer Strahlenfolgen sozusagen bis zur Unkenntlichkeit nach unten dekliniert, siehe Tabelle 1. Gegenüber früher wurde der Risikofaktor für eine bestrahlte Bevölkerung um mehr als das 6-fache gesenkt.

Tabelle 1 **ICRP Recommendations 2007**

Absolutes Strahlenrisiko für genetische Schäden bei Bestrahlung einer Bevölkerung
Detriment adjusted nominal risk coefficients for heritable effects in an exposed population

	Present	ICRP 1990
Heritable effects	0.2 % per Sv	1.3 % per Sv

Der Wert 0,2 % pro Sv bedeutet, dass bei Bestrahlung einer Bevölkerung mit einer Gonadendosis von 1 Sv bei 0,2 % der Neugeborenen ein genetischer Defekt auftritt. 1 Sv = 1000 mSv ist eine ziemlich große Dosis und das genetische Risiko wird sehr viel niedriger angesetzt als das Krebsrisiko (bei 1 mSv auf 1 Million Geburten 2 Erbschäden).

Die Risikoschätzung bezieht sich ausschließlich auf dominant vererbare Schädigungen in der 1. Folgegeneration und wurde von Experimenten an Mäusen abgeleitet. Sie entspricht einer Verdopplungsdosis von etwa 2 Sv¹ (UNSCEAR 2001).

Die ICRP behauptet, es gäbe keinen direkten wissenschaftlichen Nachweis dafür, dass Kinder von bestrahlten Eltern Erbkrankheiten haben. Sie stützt sich dabei auf die japanischen Atombombenüberlebenden, bei denen keine signifikant erhöhten Erbschäden bei den Kindern gefunden wurden. Wegen der Evidenzen in Tierversuchen hält sie es aber für notwendig, ein reales Risiko anzunehmen.

Kritiker verweisen auf eine ganze Reihe von Argumenten und Unterschieden, warum die japanischen Überlebenden keine geeignete Referenz für eine normale Bevölkerung sind, die einer Umweltradioaktivität ausgesetzt oder berufsmäßig exponiert ist (IPPNW 2014).

Ein wichtiger Punkt ist die Zeitdauer der Bestrahlung in Hinblick auf den Zeitpunkt der Konzeption. Die Bombenstrahlung war eine „Blitzbestrahlung“, also eine Bestrahlung über einen sehr kurzen Zeitraum – wenn man den radioaktiven Fallout nicht mitberücksichtigt, was aber offiziell der Fall ist. Die Geschlechtszellen sind in den verschiedenen Stadien ihrer Entwicklung bis zur Konzeption unterschiedlich strahlenempfindlich.

Abb. 1 zeigt die verschiedenen Stadien der Spermatogenese. Stammzellen der Spermien, Spermatogonien, beginnen sich zu teilen und führen zu verschiedenen Folgegenerationen mit vollem Chromosomensatz. Bei der Reifeteilung gehen sie in die haploide Form über und verwandeln sich dann weiter in die reife Keimzelle.

Aus zytogenetischen Untersuchungen und Tierversuchen hat man gefolgert, dass die haploiden Formen, also die Spermatozoen, besonders strahlenempfindlich sind. Diese ganze Entwicklung bis zur Konzeption dauert nur etwa 87 Tage – 3 Monate, der empfindliche Zeitraum ca. 35 Tage.

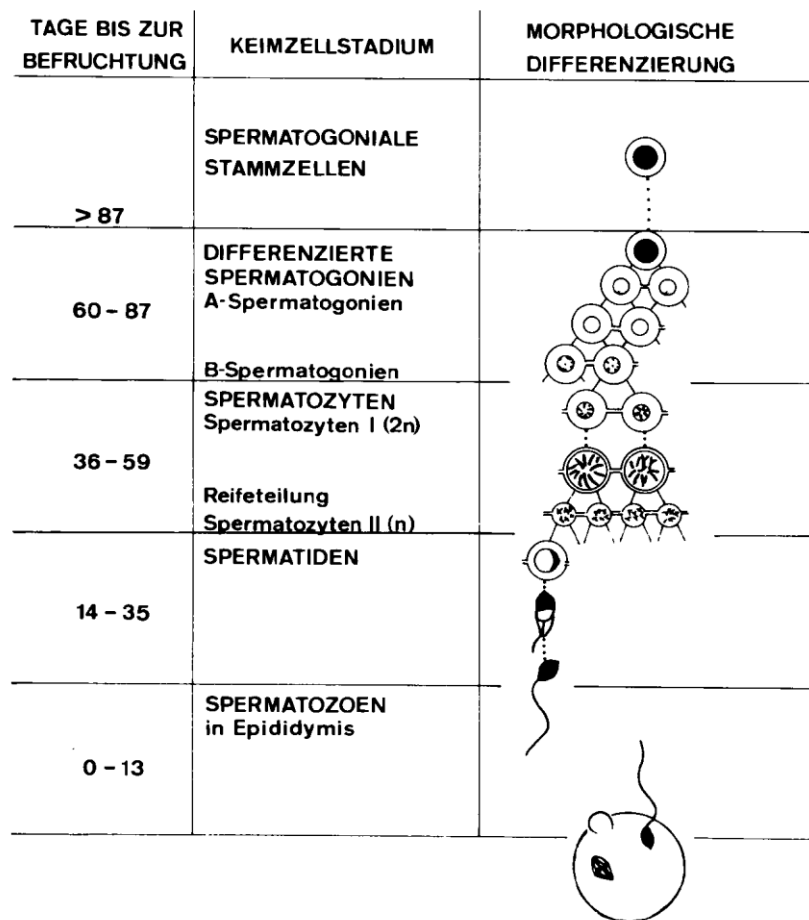
Die besonders empfindlichen Stadien der Spermien können in Hiroshima und Nagasaki daher nur kurz nach dem Bombenabwurf getroffen worden sein und später nicht mehr.

Noch krasser ist das bei den Eizellen. Diese liegen praktisch erst zum Zeitpunkt der Konzeption in haploider Form vor.

Bei chronischer oder wiederholter Exposition besteht demgegenüber ein viel höheres Risiko, dass die befruchtete Eizelle eine Mutation trägt.

¹ Die Verdopplungsdosis ist die Dosis, die einen Effekt erzeugt, der genau so groß ist wie die Spontanrate.

Abb.1 Entwicklungsstadien der Spermatogenese



Selbstverständlich muss man davon ausgehen, dass auch in den Stammzellen der Keimzellen Mutationen durch Bestrahlung ausgelöst werden, und wir werden sehen, dass sich diese ebenfalls bemerkbar machen.

Erwartete und beim Menschen beobachtete Erbschäden nach Bestrahlung

Aufgrund von Befunden aus Tierversuchen und der molekulargenetischen Forschung muss man grundsätzlich vier Klassen von Erbschäden nach Bestrahlung erwarten, siehe Tab. 2.

Bei der ersten Gruppe handelt es sich um Schäden, die von einem einzigen veränderten Gen ausgehen und dann nach dem Prinzip des Mendelschen Erbgangs dominant oder rezessiv weitervererbt werden. Bei den Genen kann es sich um solche handeln, die zu einem Autosom gehören, also denjenigen Chromosomen, die nicht zu der Geschlechtsbildung beitragen oder eben einem X- oder Y-Chromosom.

Zu allen 3 Typen sind hier bekannte Beispiele an Erbkrankheiten genannt, die sich so verhalten. Von keiner dieser ist m. W. bekannt, dass sie durch Strahlen erzeugt werden können. Diejenigen Defekte, die nach Bestrahlung beim Menschen beobachtet wurden, habe ich in der Tabelle gelb markiert.

Tabelle 2 **Erbkrankheiten** (Uma Devi et al. 2000)

Hereditary disorders
<p>(a) Mendelian</p> <p><u>Autosomal dominant; examples:</u> Huntington's chorea, polycystic kidney, multiple polyposis, cerebellar ataxia, myotonic dystrophy</p> <p><u>Congenital abnormalities</u> as syndactyly (fusion of fingers), brachydactyly (short fingers), polydactyly (more than 5 fingers or toes in each limb), taste for the chemical PTC (taste is dominant to non-taste), acondroplasia, bilateral aniridia, osteogenesis imperfecta</p> <p><u>Autosomal recessive; examples:</u> Cystic fibrosis, phenylketonuria, lactose intolerance, adrenal hyperplasia</p> <p><u>Sex-linked; examples:</u> X-linked dominant/Duchenne muscular dystrophy, haemophilia A, some forms of colour blindness, fragile-X associated mental retardation, X-linked retinitis pigmentosa</p> <p>X-linked recessive/<u>loss of females</u></p> <p>(b) Chromosomal</p> <p><u>Aneuploidy (numerical chromosomal anomaly); examples:</u> <u>Down syndrome</u> (trisomy 21), Turner syndrome (X0), Klinefelter syndrome (XXY)</p> <p><u>Structural anomalies; examples:</u> Cri du chat syndrome (deletion in chromosome 5), <u>preimplantation loss, embryonal death, foetal abortions</u></p> <p>(c) Polygenic</p> <p>Cluster in families; examples: <u>Congenital abnormalities</u> as <u>neural tube defects, heart defects, pyloric stenosis, cleft lip with or without cleft palate, undescended testes</u></p> <p><u>Common disorders of adult life of varying severity.</u> Among the serious conditions are <u>schizophrenia, multiple sclerosis, epilepsy, acute myocardial infarction</u>, systemic lupus erythematosus. Moderately serious conditions include <u>psychoses</u>, Graves' disease, <u>diabetes mellitus</u>, gout, glaucoma. <u>Essential hypertension, asthma, peptic ulcer, rheumatoid arthritis.</u> The least severe diseases include varicose veins of the lower extremities and allergic rhinitis.</p> <p><u>Cancer</u></p> <p>(d) Non-chromosomal inheritance</p> <p>Cytoplasmic inheritance, mosaicism, imprinting etc.</p>

Die zweite Gruppe (b) führt Schädigungen auf, bei denen man weiss, dass sie einhergehen mit einer morphologischen Änderung an Chromosomen oder Änderung der Anzahl der Chromosomen, was beides im Karyogramm erkennbar ist. Das bekannteste Beispiel für eine Veränderung der Anzahl ist das Down-Syndrom, bei dem das Chromosom Nr. 21 dreimal vorkommt.

Eine weitere Begleiterscheinung chromosomaler Defekte ist das frühe Absterben der Frucht. Das weiss man u.a. durch Chromosomenstudien an Aborten.

Die dritte Gruppe (c) umfasst Erkrankungen, die auf Schäden an mehreren Genen zurückzuführen sind, also solche, die nicht so einem eindeutigen Mendelschen Erbgang folgen. Dass solche Defekte durch Strahlen erzeugt werden können, und zwar in sehr viel größerem Umfang als Mendelsche Erbschäden, weiss man aus Tierversuchen. Beim Menschen erkennt man die genetische Ursache durch Häufungen von Defekten in Familien. Es können Entwicklungs-

störungen sein, die bei Neugeborenen erscheinen, oder Erkrankungen, die sich erst im Erwachsenenalter bemerkbar machen.

Über Krebserkrankungen als genetische Folge wird noch zu reden sein.

Gruppe (d) umfasst Gesundheitsschäden, die offenbar vererbt werden können, ohne dass sie sich auf Genveränderungen zurückführen lassen. Man spricht entsprechend auch von epigenetischen Effekten.

Befunde über strahleninduzierte angeborene Fehlbildungen und Entwicklungsstörungen

Die meisten in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Befunde über strahleninduzierte kongenitale (angeborene) Fehlbildungen sind von verschiedenen Forschergruppen nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl 1986 erhoben worden, s. Tabelle 3.

Tab.3 Beobachtete Anstiege von Fehlbildungen bei Neugeborenen nach dem Tschernobylunfall

Region	Art der Effekte Untersuchungsdauer	Referenzen
<u>Weißrussland</u> Verschiedene Regionen	Kongenitale Entwicklungsstörungen bis 1994	Sevtschenko 1997; Lazjuk u.a.1997; Feshchenko 2002
hoch belastete Region Gomel	Kongenitale Fehlbildungen bis 1994	Bogdanovich 1997; Savchenko 1995; Petrova u.a.1997
Chechersky-Distrikt bei Gomel	Kongenitale Fehlbildungen	Kulakov u.a. 1993
Region Mogilev	Kongenitale Fehlbildungen bis 1990	Petrova u.a. 1997
Region Brest	Kongenitale Fehlbildungen	Shidlovskii 1992
<u>Ukraine</u> Polesky-Distrikt bei Kiev	Kongenitale Fehlbildungen bis 1990	Kulakov u.a. 1993
Region Lygyny	Kongenitale Fehlbildungen	Godlevsky, Nasvit 1998
Provinz Rivne	Kongenitale Fehlbildungen bei Geburten 2000-2006	Wertlecki 2010
<u>Türkei</u>	Anenzephalie, spina bifida bis 1989	Akar u.a.1988/89; Caglayan u.a.1990; Güvenc u.a. 1993; Mocan u.a. 1990
<u>Bulgarien</u> , Region Pleven	Fehlbildungen bei Herz u. ZNS, Mehrfachanomalien	Moumdjiev u.a. 1992
<u>Kroatien</u>	Fehlbildungen in Autopsien von Aborten und nach frühem Tod des Neugeborenen/vor und nach dem Unfall	Kruslin u.a. 1998
<u>Deutschland</u> DDR, Zentralregister f. Fehlbildungen	Lippen/Gaumenspalten	Zieglowski, Hemprich 1999
Bayern	Lippen/Gaumenspalten Kongenitale Fehlbildungen	Scherb, Weigelt 2004 Körblein 2003, 2004; Scherb, Weigelt 2003
Jahresgesundheitsbericht für West-Berlin 1987	Fehlbildungen bei Totgeborenen	Strahlentelex 1989
Jena (Fehlbildungsregister)	Isolierte Fehlbildungen	Lotz u.a. 1996

Da durch den radioaktiven Fallout Männer und Frauen anhaltend exponiert waren, sind die genetischen Effekte nicht klar von solchen zu unterscheiden, die durch Bestrahlung von Embryonen und Föten im Mutterleib entstehen können. Der zeitliche Verlauf der Fehlbildungsraten in den Anrainerländern zeigt jedoch Anstiege über viele Jahre hinaus.

In Weissrussland wird seit 1979 ein Zentralregister für angeborene Entwicklungsstörungen beim Gesundheitsministerium geführt. Daraus wurden die Raten angeborener Entwicklungsstörungen vor und nach Tschernobyl verglichen (Shevtschenko 1997).

Tabelle 4 zeigt Ergebnisse für angeborene Fehlbildungen in 17 Gebieten mit der höchsten Belastung.

Tabelle 4 Erhöhung der Rate angeborener Fehlbildungen in den 17 höchstbelasteten Gebieten von Weissrussland 1987-1994 in Prozent (Lazjuk 1997)

Art der Fehlbildung	Erhöhung um
Anenzephalie (<i>Froschkopf</i>)	39 %
Spina bifida (<i>offener Rücken</i>)	29 %
Lippen/Gaumenspalten	60 %
Polydaktylie (<i>zusätzliche Finger oder Zehen</i>)	910 %*
Verkümmerung von Gliedmaßen	240 %*
Atresie (<i>Verschluss</i>) der Speiseröhre	13 %
Atresie des Rektums (<i>Darmverschluss</i>)	80 %*
Mehrfachfehlbildungen	128 %*

*) signifikant ($p < 0,05$)

Die Autoren halten diese Effekte für genetisch induziert. Denn in der Tat ist es nicht anzunehmen, dass es bei abklingender Umgebungskontamination und abklingender Kontamination der Nahrungsmittel in den Folgezeiten nach dem Unfall zu steigenden Uterusdosen bei den Frauen für die relativ kurze Zeit neuer Schwangerschaften kommen kann.

Dies bestätigt sich bei solchen Entwicklungsstörungen, die mit einer erkennbaren Genmutation einhergehen, die bei den Eltern nicht vorliegt. Dabei kann es sich nur um eine Mutation zwischen den Generationen handeln. Auch für diese werden in Weissrussland erhöhte Raten beobachtet (Lazjuk 1999).

Mindestens bis zum Jahr 2004 wurden erhöhte Fehlbildungsraten anhand des weissrussischen Registers publiziert (Yablokov 2009). Da die Daten über größere Zeiträume gemittelt wurden, lässt sich daraus nicht ableiten, bis wann die Raten angestiegen, gleich geblieben oder wieder abgefallen sind

Erhöhte Fehlbildungsraten noch bei Geburten im Zeitraum von 2000 bis 2006 – also über 14 Jahre nach dem Unfall – beschreibt Wertelecki (2010) aus der ukrainischen Provinz Rivne, ca. 250 km westlich von Tschernobyl. Insbesondere im hochverstrahlten nördlichen Teil ergeben sich signifikante Erhöhungen im Vergleich zum südlichen Teil: um 52 % für alle Fehlbildungen, 46 % für Neuralrohrdefekte, 180 % für Mikrozephalie und 389 % für Mikrophthalmie (abnorme Kleinäugigkeit).

Auch im ehemaligen Atomtestgebiet der Sowjetunion bei Semipalatinsk (Kasachstan) registriert man in jüngerer Zeit erhöhte Fehlbildungsraten in der Bevölkerung (Sviatova 2001). Insbesondere treten auch Mehrfachfehlbildungen erhöht auf.

Bei der Exposition einer Bevölkerung können genetische Effekte natürlich sowohl über die Keimbahn der Väter als auch die der Mütter induziert werden. In Deutschland ergab eine Un-

tersuchung an beruflich strahlenexponierten Frauen, die im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz erfolgte, eine 3,2-fach erhöhte Rate an kongenitalen Defekten, darunter auch Fehlbildungen (Wiesel 2011). Die Autoren interpretieren diesen Befund als Effekt durch Exposition in utero. Woher sie das allerdings wissen wollen, bleibt unklar.

Von Interesse sind daher insbesondere solche Ergebnisse, bei denen das Geschlecht des exponierten Elternteils einheitlich ist. In Tabelle 5 sind Untersuchungen aufgeführt, die die Nachkommen beruflich exponierter Männer betreffen.

Tabelle 5 Angeborene Anomalien, insbesondere Fehlbildungen bei den Nachkommen (1.Generation) beruflich strahlenexponierter Männer

Nr.	Kohorte der Väter	Art der Geburtsfehler	Dosis	Referenzen
1	Radiologen in den USA 1951	Kongenitale Fehlbildungen Erhöhung um 20 %		Macht 1955
2	Beschäftigte der Nuklearwaffenfabrik Hanford USA	Neuralrohrdefekte (Off. Rücken, Gehirnmissbildungen u.a.) signifikant verdoppelt	im allg. < 100 mSv	Sever 1988
3	Beschäftigte Wiederaufarbeitungsanlage für Kernbrennstoff Sellafield U.K.	Totgeburten mit Neuralrohrdefekten Pro 100 mSv signifikant um 69 % erhöht	Mittelwert 30 mSv	Parker 1999
4	Röntgentechniker in Jordanien	Erhöhung kongenitaler Anomalien 10-fach signifikant		Shakhatreh 2001
5	Liquidatoren aus Obninsk (Russ.) mit 300 Kindern	Erhöhung kongenitaler Anomalien zwischen 1994-2002	überwiegend 10-250 mSv	Tsyb 2004
6	Liquidatoren aus Russland, Provinz Bryansk	Erhöhung kongenitaler Anomalien ca. 4-fach		Matveenko 2005
7	Liquidatoren aus Russland 2379 Neugeborene bis 1 J.	Signifikante Erhöhung ca. um: Anenzephalie 310 % Spina bifida 316 % Lippen/Gaumenspalten 170 % Gliedermaßenverkümmern 155% Mehrfachfehlbildungen 19 % Fehlbildungen gesamt 120 %	5-250 mSv	Lyaginskaja 2009

Im Zeitraum vor dem Tschernobylunfall 1986 gab es nur wenige Untersuchungen über Strahlenschäden bei beruflich exponierten Kollektiven, daher auch kaum solche an deren Nachkommen. Man hielt die Exposition innerhalb der zulässigen Grenzwerte für hinreichend gering, um statistisch erkennbare Schädigungen auszuschließen. Krebs- und andere Erkrankungen als Folge der Arbeit im erlaubten Dosisbereich sind inzwischen ein anerkanntes Risiko.

Die angegebenen Dosen bei den Beschäftigten in Nuklearanlagen (Nr. 2 und 3 in Tabelle 5) sind sehr gering. Die Befunde führten trotzdem nicht zu großangelegten Folgeuntersuchungen.

Als „Liquidatoren“ bei Tschernobyl wurden etwa 800.000 vorwiegend junge Männer der Armee und anderer staatlicher Einrichtungen sowie Reservisten eingesetzt, um Strahlenschutzmaßnahmen am Unfallreaktor und Aufräumarbeiten vorzunehmen. Sie bilden eine sehr große Gruppe, an der die Gesundheit der Nachkommen studiert werden kann (Nr. 5, 6, 7 in Tab.5).

Geschlechtsverhältnis und X-chromosomale Letalfaktoren

Beim Menschen kann normalerweise nicht untersucht werden, wieviele befruchtete Eizellen infolge einer Bestrahlung der Keimzellen absterben. Es gibt aber einen Parameter, mit dem ein solcher Effekt nachweisbar ist. Man beobachtet, dass bei Männern, die vor Konzeption exponiert wurden, weniger Töchter geboren werden: das Verhältnis männlicher zu weiblicher Geburten nimmt zu.

Grundsätzlich können Genschäden die Ursache für ein Absterben der Frucht sein, und das eben auch an den Geschlechtschromosomen, wobei diese hauptsächlich an dem größeren X-Chromosom zu erwarten sind. Das X-Chromosom des Mannes kann nur an die Töchter weitergegeben werden. Ein dominanter Letalfaktor dort führt zum Absterben der weiblichen Zygote. Rezessive Letalfaktoren am X-Chromosom sind wesentlich häufiger als dominante (Vogel 1969). Diese können sich auch nur bei den Töchtern auswirken.

Wenn man genügend große Bevölkerungen studiert, kann man diesen Effekt nachweisen. Ein sehr eindrucksvoller Befund wurde an Beschäftigten der Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield erhoben (Tabelle 6).

Tab.6 Geschlechterverhältnis bei Geburten in Cumbria
(Dickinson et al. 1996)

All Cumbrian children	All fathers employed*) at Sellafield	Fathers employed at Sellafield > 10 mSv**)
1.055	1.094	1.396

*) employed before conception

**) dose 90 day preconceptional

Einen ähnlichen Effekt zeigt eine Untersuchung an männlichen Kardiologen, die Herzkatheteruntersuchungen ausführen und dadurch einer relativ hohen Röntgendosis ausgesetzt sind (Abb. 2). Der Anteil weiblicher Nachkommen nimmt ab, je höher die Exposition der Väter war.²

Abb.2 Prozentsatz Jungen- und Mädchengeburt bei Kardiologen (Choi et al. 2007)

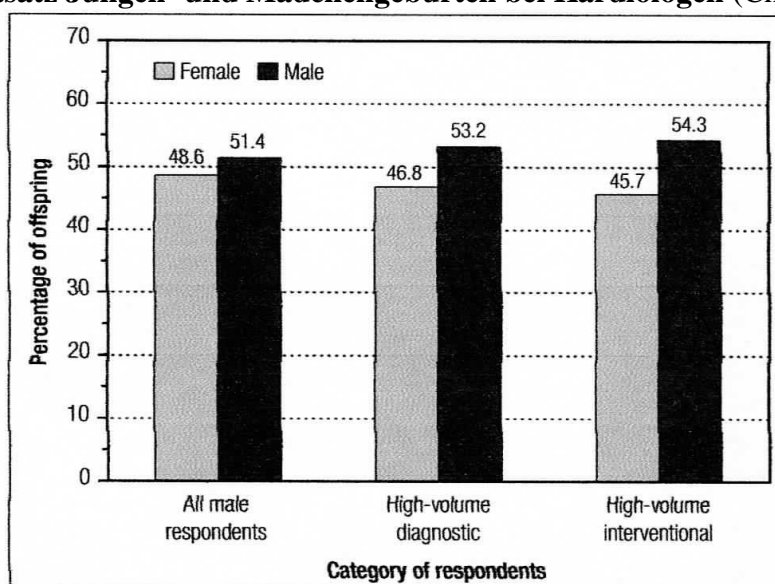


Figure. Percentage of male and female offspring among respondents.

² Die Autoren wollten allerdings das Gegenteil überprüfen, nämlich dass die männlichen Geburten abnehmen.

Es zeigt sich nun, dass auch bei Bestrahlung einer Bevölkerung mit beiderlei Eltern ebenfalls eine Abnahme der weiblichen Geburten erfolgt.

Hagen Scherb, Kristina Voigt vom Helmholtz-Zentrum München und Mitarbeiter haben nach Tschernobyl eine ganze Reihe von Untersuchungen an exponierten Bevölkerungsgruppen auf genetische Effekte unternommen. Sie haben Ergebnisse über strahlenbedingte Totgeburten und frühkindliche Sterblichkeit, Fehlbildungen, Down-Syndrom und Änderung des Geschlechterverhältnisses vorgelegt.

Das Geschlechterverhältnis untersuchten sie als Folge von:

den oberirdischen Atomtests an U.S. -Bewohnern

nach Tschernobyl in Europa

in der Umgebung europäischer Nuklearanlagen

Sie fanden jeweils signifikante Abnahmen des weiblichen Geburtenanteils. Abb.3 zeigt Beispiele über den Verlauf des männlichen Geburtenanteils nach Tschernobyl. Es sind jährliche Werte aufgetragen und es zeigt sich ein sprunghafter Anstieg im Jahr 1987 nach dem Reaktorunfall 1986.

Abb.3 Männliche Geburtenrate für Tschechien+Dänemark +Finnland+Deutschland+Ungarn +Norwegen + Polen+Schweden (CDFGHNPS) und für Bayern+DDR+Westberlin (BGW) (Scherb et al. 2007)

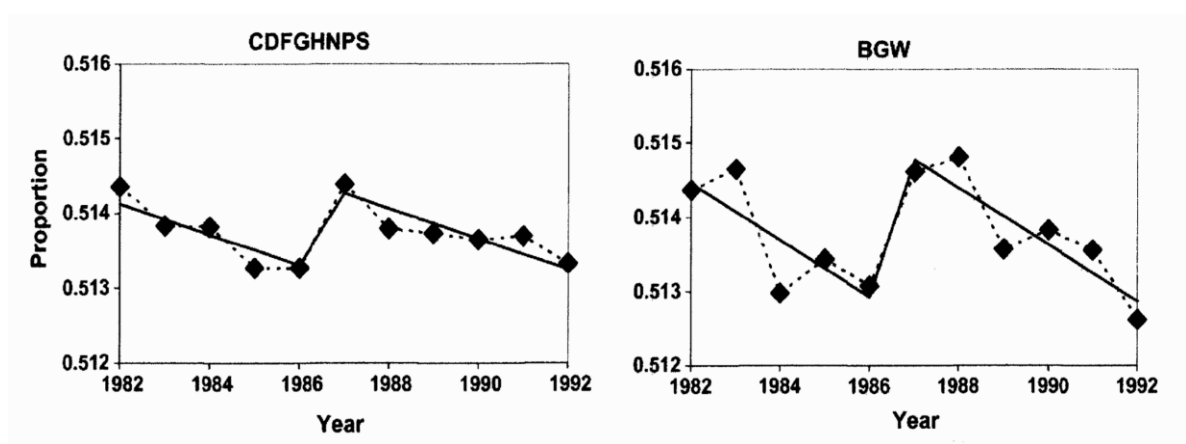


Tabelle 7 enthält ihre Befunde bei Nuklearanlagen in Deutschland und der Schweiz. Trotz der Tatsache, dass bei AKWs nur relativ wenige Leute wohnen und deshalb der umliegende Bezirk mit 35 km Radius sehr groß gewählt ist, zeigt sich in der Gesamtheit ein signifikanter Rückgang der Mädchengeburten.

Das Geschlechterverhältnis ist ein sehr bedeutsamer Parameter. Es zeigt, dass genetische Veränderungen in den Keimzellen des Menschen durch überaus geringe Strahlendosen erzeugt werden, und es erweist sich als ein gut zu erhebender Indikator für die Strahlenbelastung einer Bevölkerung.

Tabelle 7 Geschlechterverhältnis der Neugeborenen bei 32 Nuklearanlagen in Deutschland und der Schweiz (Scherb et al. 2012)

No. (s. Fig. 2)	NF	Type	In operation since/to	Live births < 35 km during NF operation, lagged for gestation		Sex odds ratio vs. last row of this Table	p-value (Chi ²)	hold one NF out p-value (Chi ²), compare to **
				male	female			
1	Biblis	PWR	1975 -	223,648	211,753	1.0017	0.5804	0.0007
2	Obrigheim	PWR	1969 - 2005	164,321	155,447	1.0026	0.4733	0.0010
3	Neckarwestheim	PWR	1976 -	380,463	360,212	1.0017	0.4640	0.0005
4	Philipsburg	BWR/PWR	1980 -	333,967	314,761	1.0063	0.0133	0.0019
5	Grafenreihfeld	PWR	1981 -	95,714	90,722	1.0006	0.8957	0.0007
6	Isar I und II	BWR/PWR	1977 -	67,059	63,341	1.0041	0.4627	0.0011
7	Gundremmingen	BWR	1966 -	142,702	135,276	1.0005	0.8986	0.0006
8	Fessenheim	PWR	1977 -	99,148	93,694	1.0036	0.4290	0.0012
9	Beznau I und II	PWR	1969 -	337,335	317,880	1.0065	0.0106	0.0031
10	Goesgen	PWR	1979 -	220,979	208,604	1.0047	0.1308	0.0005
11	Leibstadt	BWR	1984 -	143,467	135,293	1.0057	0.1354	0.0008
12	Muehleberg	BWR	1971 -	218,795	207,560	0.9998	0.9387	0.0004
13	Emsland	PWR	1988 -	55,502	52,301	1.0065	0.2915	0.0011
14	Grohnde	PWR	1984 -	84,739	80,308	1.0008	0.8791	0.0009
15	Wuergassen	BWR	1972 - 1994	34,453	32,643	1.0010	0.8960	0.0010
16	BR*	PWR	1962 - 1987	5,332	5,288	0.9563	-	-
17	Doel*	PWR	1974 -	392,512	375,500	0.9914	-	-
18	Tihange*	PWR	1975 -	122,594	117,476	0.9897	-	-
19	Dodewa*	BWR	1968 - 1997	5,926	5,710	0.9843	-	-
20	Brunsbuettel	BWR	1977 -	21,085	20,003	0.9997	0.9779	0.0010
21	Brokdorf	PWR	1986 -	15,505	14,769	0.9957	0.7073	0.0009
22	Kruemmel	BWR	1984 -	35,882	33,745	1.0085	0.2662	0.0012
23	Stade	PWR	1975-2003	43,456	40,771	1.0109	0.1174	0.0021
24	Unterweser	PWR	1979 -	86,010	81,341	1.0029	0.5608	0.0010
25	Lingen	BWR	1968 - 1977	19,372	18,400	0.9985	0.8862	0.0007
26	Karlsruhe	BWR	1966 - 1991	149,269	140,584	1.0070	0.0624	0.0007
27	Ahaus	NSS	2000 -	26,427	24,866	1.0080	0.3701	0.0009
28	Juelich	NSS	2000 -	75,735	71,688	1.0020	0.7076	0.0008
29	Eilweiler	UM	1969 -	31,361	29,450	1.0100	0.2225	0.0013
30	Menzenschwand	UM	1969 -	132,037	124,574	1.0052	0.1892	0.0012
31	Gorleben	NSS	2000 -	1,753	1,573	1.0570	0.1108	0.0010
32	Hanau/Kahl	NFE	1969 -	54,772	51,343	1.0118	0.0577	0.0021
	German states and Switzerland < 35 km from NF			2,532,471	2,393,556	1.0035	** 0.0008	
	German states and Switzerland > 35 km from NF			7,948,690	7,538,729	1.0000	1.0000	

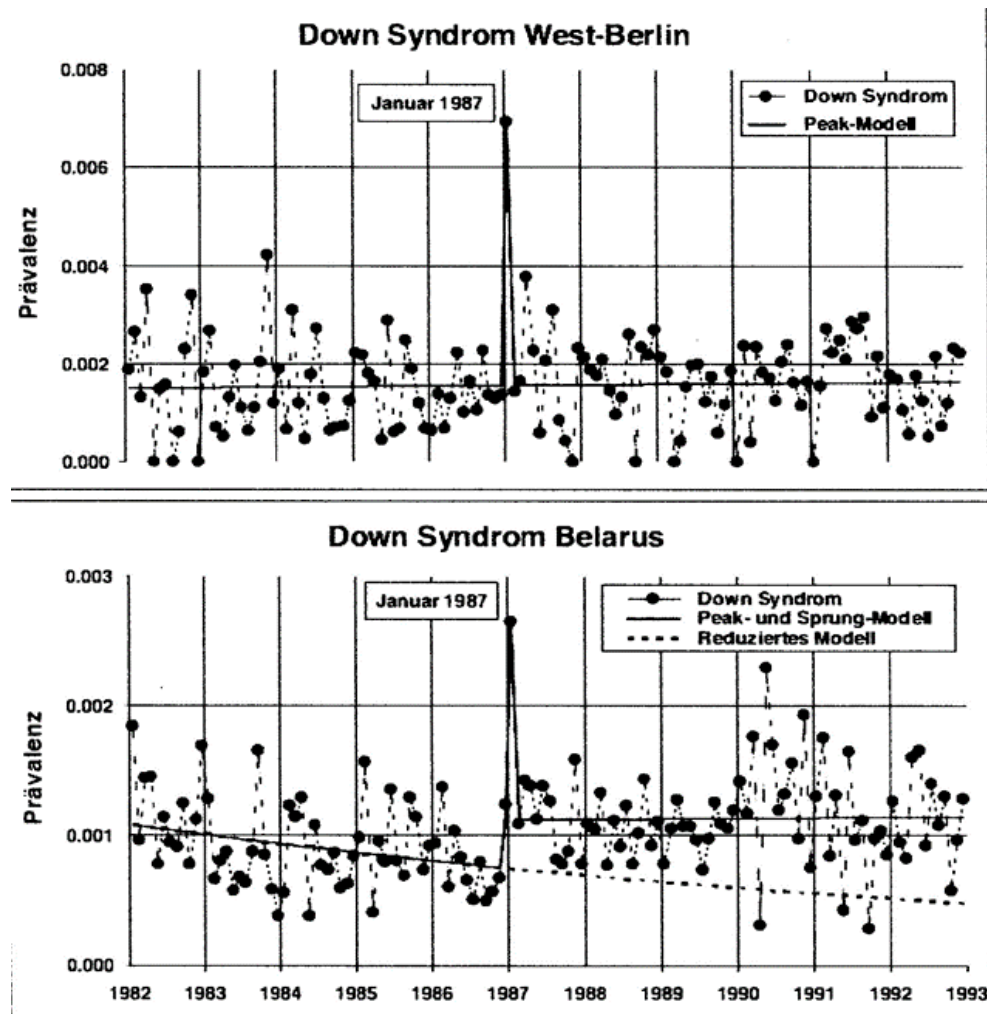
Down-Syndrom

Bereits vor Tschernobyl haben einige Forschergruppen anhand ihrer Befunde nach medizinischen Strahlenanwendungen darauf hingewiesen, dass das Down-Syndrom als Folge einer vorgeburtlichen Exposition auftreten kann.

Erhöhte Raten von Menschen mit dieser Behinderung wurden auch in Bevölkerungen festgestellt, die in Gegenden mit stark erhöhter Umgebungsstrahlung leben. Einmal betrifft das den indischen Staat Kerala, wo sich im Untergrund hohe Anteile des natürlichen Strahlers Thorium befinden (Kochupillai 1976; Padmanabhan 1994). Des weiteren gibt es in China eine hochgelegene Gegend mit erhöhtem Strahlenpegel, wo ein solcher Effekt auftritt (China 1980). Im ehemaligen Atomtestgebiet der Sowjetunion, bei Semipalatinsk im heutigen Kasachstan, wurde ebenfalls ein erhöhtes Vorkommen in der Nachfolgeneration der bis 1963 durch die Explosionen stark belasteten Bevölkerung registriert (Sviatova 2001).

Nach Tschernobyl stiegen in mehreren europäischen Ländern mit nachgewiesener Kontamination die Fälle an (Busby 2009). Abb.4 zeigt Beispiele. In Westberlin, das damals eine Art abgeschlossene Insel war, fand der Humangenetiker Sperling einen steilen signifikanten Anstieg von Fällen recht genau 9 Monate nach der Katastrophe. Ein ganz ähnlicher Verlauf ergab sich in Weissrussland (Zatsepin 2004).

Abb.4 Down-Syndrom vor und nach dem Tschernobyl-Unfall aus (Scherb & Sperling 2011)



Befunde über Krebs bei Nachkommen bestrahlter Eltern

Im Jahr 1984 war eine sehr auffällige Erhöhung der Leukämieerkrankungen von Kindern und Jugendlichen bei der britischen Wiederaufarbeitungsanlage von Kernbrennstoffen Sellafield bekannt geworden. Diese war im Folgenden von Gardner und Mitarbeitern als genetischer Effekt gedeutet worden, da sich zeigte, dass die betroffenen Patienten Väter hatten, die in der Anlage gearbeitet hatten (Gardner 1990). Das Ergebnis ist über Jahre in zahlreichen Abhandlungen diskutiert und vielen Folgestudien bestätigt oder auch angeblich widerlegt worden. Dabei waren derartige Effekte prinzipiell aus Tierversuchen bekannt (Nomura 1982, 2006) und bereits nach beruflicher Exposition und diagnostischem Röntgen gefunden worden (Tabelle 5).

Tab.5 Strahleninduzierte Krebserkrankungen im Kindesalter nach präkonzeptioneller beruflicher oder diagnostischer Niederdosisbestrahlung vor Tschernobyl

Bestrahtetes Kollektiv	Krankheit	Gonadendosis mSv	Relatives Risiko
Sellafield			
Seascale Väter (Gardner 1990)	Leukämie+Lymphome	200	7
alle Stadien der Spermatogenese	“	10	7
6 Monate vor Konzeption	“		1,9
Sellafield Arbeiter (Dickinson 2002)			
Berufliche Exposition			
Väter W.Cumbria (McKinney 1991)	Leukämie+Lymphome		3,1
Exposition beim Militär (Hicks 1984)	Krebs		2,7
Präkonzeptionelle Röntgendiagnostik			
Väter (Graham 1966)	Leukämie		1,3
Väter (Shu 1988)	Leukämie	3-30	1,4-3,9
Väter (Shu 1994)	Leukämie		3,8
Mütter (Stewart 1958)	Leukämie		1,7
Mütter (Graham 1966)	Leukämie		1,7
Mütter (Natarajan 1973)	Leukämie		1,4
Mütter (Shiono 1980)	Krebs		2,6

Von besonderem Interesse sind in unserem Zusammenhang die Befunde nach berufsmäßiger chronischer Exposition. McKinney und Mitarbeiter fanden dreifach erhöhte Raten von Leukämie und Lymphomen bei beruflich strahlenexponierten Männern aus drei britischen Regionen in einer Fall-Kontrollstudie (1991). Das Ergebnis von Hicks und Mitarbeitern (1984) bezieht sich auf exponierte Soldaten bei der Luftwaffe.

Statistische Erhebungen in Weißrussland und anderen hoch kontaminierten Regionen in den Anrainerstaaten von Tschernobyl haben Anstiege der Krebsmortalität bei Kindern ergeben, 9die Jahre nach dem Unfall geboren wurden (Pflugbeil 2006; Yablokov 2006, 2007). Kinder von Liquidatoren litten ebenfalls vermehrt an Leukämie und anderen Krebserkrankungen (Pflugbeil 2006).

Weitere polygenische Strahleneffekte

Bei den Kindern der Liquidatoren wurden nicht nur Fehlbildungen und Krebs nachgewiesen sondern auch andere Erkrankungen wie endokrinologische und metabolische Erkrankungen sowie psychische Erkrankungen (Tsyb 2004; Pflugbeil 2006; Yablokov 2007).

Im weissrussischen Nationalregister wurden 1995 erhöhte Inzidenzen für folgende Erkrankungsgruppen bei den Kindern von tschernobylbelasteten Eltern festgestellt (Lomat 2007):

- Hematological diseases (6-fold)
- Endocrine diseases (2-fold)
- Digestive organs (1.7-fold)

Schlussfolgerungen

1. Genetisch induzierte Fehlbildungen, Krebserkrankungen und zahlreiche andere Gesundheitsschäden bei den Nachkommen in Bevölkerungen, die einer chronischen Niederdosisexposition durch ionisierende Strahlung ausgesetzt waren, sind in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen nachgewiesen worden.
2. Der Dosiswirkungszusammenhang lässt sich derzeit nur sehr grob abschätzen. Die Verdopplungsdosis für Fehlbildungen liegt etwa bei 100 mSv Gonadendosis des Vaters, auf jeden Fall sehr viel niedriger als nach ICRP anzunehmen. Für Krebs- und Leukämieerkrankungen liegt sie noch wesentlich niedriger.

Die Frage ist, wieso die ICRP und auch das Strahlenkomitee der Vereinten Nationen UNSCEAR dazu kommen, die genannten wissenschaftlichen Untersuchungen einfach zu ignorieren. Die Dosis für die Bevölkerung in den durch den Tschernobylfallout kontaminierten Regionen wird vom Strahlenkomitee der Vereinten Nationen als sehr gering eingeschätzt (UNSCEAR 1988). Selbst in den hochverstrahlten Gegenden der Anrainerländer mit mehr als 37 kBq/m² Bodenbelastung mit Cs-137 soll sie im Mittel nicht mehr als etwa 10 mSv betragen (effektive Lebenszeitdosis). Für die Türkei und die weiter entfernten Länder Zentraleuropas soll sie unterhalb von 1,2 mSv liegen.

Es wird dann einfach behauptet, dass solch kleine Dosen keine statistisch erkennbaren Strahleneffekte erzeugen können. Durch viele Studien über Chromosomenaberrationen in den Bevölkerungen, die man als „biologische“ Dosimetrie ansehen kann, weiss man aber, dass die Dosen etwa um den Faktor 100 höher liegen (Domracheva 2000; Schmitz-Feuerhake 2011).

Das Verhalten der internationalen Gremien ist unverantwortlich, denn gegenwärtig zeigt sich bereits ein vielfach höheres Strahlenrisiko für künftige Generationen als angegeben und das volle Ausmass ist derzeit noch gar nicht absehbar.

Diskutiert werden in neuerer Zeit die Auswirkungen zweier Strahleneffekte, die erst vor einigen Jahren entdeckt und auf zellulärer Ebene inzwischen vielfach bestätigt wurden. Es handelt sich um den „Bystander“-Effekt und die „Genomische Instabilität“ (Averbeck 2010; Baverstock 2010). Während früher davon ausgegangen wurde, dass die stochastischen Effekte durch ionisierende Strahlung Folge einer direkten Wechselwirkung eines Strahlenquants mit dem Erbmateriale einer getroffenen Zelle sind, zeigt der Bystander-Effekt eine mutagene Wirkung in einer von dem „Einschlag“ entfernten Zelle. Genomische Instabilität bedeutet, dass sich Strahlenwirkungen nicht in der unmittelbaren Tochterzelle der bestrahlten zeigen, wohl aber in einer späteren Generation der Zellteilung.

Chromosomenveränderungen wurden bei Kindern von Liquidatoren und durch den Tschernobylfallout exponierten Eltern nachgewiesen und als Genomische Instabilität gedeutet (Pflugbeil 2006; Weinberg 2001; Yablokov 2009; Agadzhanian 2010). Die Beachtung solcher Phänomene bei der Bewertung des genetischen Risikos und ihre weitere Erforschung steht aus.

Die letzten Absätze von Mullers nicht gehaltenem Vortrag 1955 lauten (in deutscher Übersetzung) wie folgt:

„Alle diese Fragen müssen nicht nur diskutiert, sondern auch weit realistischer untersucht werden, als dies in der Vergangenheit geschehen ist, sonst könnten wir eines Tages – genetisch gesehen – vor einem ähnlichen Problem von allerdings noch größerem Ausmaß stehen, als es durch die Abholzung unserer Wälder und die Auswaschung unserer Flussbette bereits geschaffen wurde. Es handelt sich hier nicht nur um das Problem der möglichen Folgen eines Atomkrieges. Es handelt sich hier um ein Problem, dem sich in gleicher Weise die Vorkämpfer für den Frieden gegenübergestellt sehen, wenn wir in einem Atomzeitalter leben sollen, das die Gefahr einer verlängerten „zulässigen“ Bestrahlung mit sich bringt, die sich aus der Verwendung der Atomenergie für wirtschaftliche Zwecke und aus den radioaktiven Abfallprodukten ergeben würde.

Der Frieden wird, dies hoffen wir alle, einer langen Folge von Generationen erhalten bleiben. Unter diesen Umständen wird es umso notwendiger sein, die Strahleneinwirkung zu kontrollieren und zu begrenzen, der die Bevölkerung in ihrer Gesamtheit ausgesetzt ist; denn nach einer genügend langen Generationenfolge wird das Niveau erreicht sein, auf dem ein Gleichgewicht der Schädigung erreicht ist, ein Niveau, auf dem der Schaden nicht länger durch Pufferwirkung abgeschwächt wird, sondern genau der bestehenden Mutationsrate entspricht. Dann wird eine verhältnismäßig kleine r-Dosis in einer Generation eine weitaus größere Wirkung haben, als dies jetzt der Fall zu sein scheint. In diesem Augenblick, in dem dieser Prozess gerade erst begonnen hat, sollten weitblickende Maßnahmen ergriffen werden. Diese Maßnahmen müssen uns vor dem gefährlichen Irrtum bewahren, dass wir uns um Dinge, die man weder sieht noch fühlt, nicht zu kümmern brauchen.

Bis zur Ausarbeitung geeigneter Maßnahmen auf diesem Gebiet muss der Schutz der Menschheit vor einer durch Strahleneinwirkung verursachten genetischen Schädigung das Problem sein, vor dem alle anderen Probleme – wie die Verwendung der Strahlen zur genetischen Verbesserung nützlicher Organismen und zur Ausrottung oder Reduzierung schädlicher Organismen im Interesse der Menschheit – weit in den Hintergrund zu treten haben. In dem Maße jedoch, in dem die bedrohlicheren Aspekte der Strahleneinwirkung kontrolliert werden können, werden diese konstruktiven Verwendungsmöglichkeiten der Strahlen auf dem Gebiete „biologischer Planung“ immer mehr in den Vordergrund treten. Schon heute gibt es genügend Hinweise für Verwendungsmöglichkeiten der Strahlen in großem Maßstab und zum Wohle der Menschheit.

Gleichzeitig sollte man aber nicht dem gefährlichen Irrtum verfallen, den Menschen als eine Spezies zu betrachten, die durch Bestrahlung ihres Keimplasmas Vorteile auf lange Sicht zu erwarten habe. Das eigene Erbgut des Menschen ist sein unschätzbarer und unersetzlicher Besitz. Dieses Erbgut unterliegt bereits einer Reihe von Veränderungen, die im Verhältnis zur Zeugungspraxis der Menschen unserer Tage an die Grenzen der Belastbarkeit reichen. Unter diesen Umständen muss die erste Sorge des Menschen bei der Behandlung des Strahlenproblems seinem eigenen Schutze gelten.“

Aghajanyan, A., Suskov, I.: Transgenerational genomic instability in children of irradiated parents as a result of the Chernobyl nuclear accident. *Mutat. Res.* 671 (2009) 52-57

Akar, N., Cavdar, A.O., Arcasoy, A.: High incidence of Neural Tube defects in Bursa, Turkey. *Paediatric and Perinatal Epidemiol.* 2 (1988) 89-92

Averbeck, D.: Non-targeted effects as a paradigm breaking evidence. *Mutat. Res.* 687 (2010) 7-12

- Baverstock, K., Belyakov, O.V.: Some important questions connected with non-targeted effects. *Mutat. Res.* 687 (2010) 84-88
- Bogdanovich, I.P.: Comparative analysis of the death rate of children, aged 0-5, in 1994 in radio-contaminated and conventionally clean areas of Belarus. In: *Medicobiological effects and the ways of overcoming the Chernobyl accident consequences. Collected book of scientific papers dedicated to the 10th anniversary of the Chernobyl accident.* Minsk-Vitebsk, 1997, p. 4
- Busby, C., Lengfelder, E., Pflugbeil, S., Schmitz-Feuerhake, I.: The evidence of radiation effects in embryos and fetuses exposed to Chernobyl fallout and the question of dose response. *Medicine, Conflict and Survival* 25 (2009) 20-40
- Caglayan, S., Kayhan, B., Menteshoglu, S., Aksit, S.: Changing incidence of neural tube defects in Aegean Turkey. *Paediatric and Perinatal Epidemiol.* 4 (1990) 264-268
- China, High Background Radiation Research Group: Health survey in high background radiation areas in China. *Science* 209 (1980) 877-880
- Choi, J.W., Mehrotra, P., MacDonald, L.A., Klein, L.W., Linsky, N.M., Smith, A., Riccardi, M.J.: Sex proportion of offspring and exposure to radiation in male invasive cardiologists. *Proc. (Bayl. Univ. Med. Cent.)* 20 (2007) 231-234
- Dickinson, H.O., Parker, I., Binks, K., Wakeford, R., Smith, J.: The sex ratio of children in relation to paternal preconceptional radiation dose: a study in Cumbria, northern England. *J. Epidemiol. Community Health* 50 (1996) 645-652
- Dickinson, H.O., Parker, I.: Leukaemia and non-Hodgkin's lymphoma in children of male Sellafield radiation workers. *Int. J. Cancer* 99 (2002) 437-444
- Domracheva, E.V., Aseeva, E.A. et al.: Cytogenetic features of leukaemias diagnosed in residents of areas contaminated after the Chernobyl nuclear accident. *Appl. Radiat. Is.* 52 (2000) 1171-1177
- Feshchenko, S.P., Schröder, H.C., Müller, W.E.G., Lazjuk, G.I.: Congenital malformations among newborns and developmental abnormalities among human embryos in Belarus after Chernobyl accident. *Cell. Mol. Biol.* 48 (2002) 423-426
- Gardner, M.J., Snee, M.P., Hall, A.J., Powell, A.J., Downes, S., Terrell, J.D.: Results of case-control study of leukaemia and lymphoma among young people near Sellafield nuclear plant in West Cumbria. *Brit. Med. J.* 300 (1990) 423-429
- Godlevsky, I., Nasvit, O.: Dynamics of health status of residents in the Lugyny district after the accident of the ChNPS: In Imanaka, T. (ed.): *Research activities about the radiological consequences of the Chernobyl NPS accident and social activities to assist the sufferers by the accident.* Research Reactor Institute, Kyoto University, KURRI-KR-21, 1998, 149-156
- Graham, S., Levin, M.L., Lilienfeld, A.M. et al.: Preconception, intrauterine, and postnatal irradiation as related to leukemia. *Natl. Cancer Inst. Monogr.* 19 (1966) 347-371
- Güvenc, H., Uslu, M.A., Güvenc, M., Ozkici, U., Kocabay, K., Bektas, S.: Changing trend of neural tube defects in Eastern Turkey. *J. Epidemiol. Community Health* 47 (1993) 40-41
- Hicks, N., Zack, M., Caldwell, G.G., Fernbach, D.J., Falletta, J.M.: Childhood cancer and occupational radiation exposure in parents. *Cancer* 53 (1984) 1637-1643
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* ICRP-Publication 103, Ann. ICRP 37 Nos. 2-4 (2007)
- IPPNW Deutsche Sektion der Internationalen Ärzte für die Verhütung des Atomkriegs/Ärzte in sozialer Verantwortung e.V.: *Gefahren ionisierender Strahlung.* Berlin, Jan. 2014 www.ippnw.de
- Körblein, A.: Säuglingssterblichkeit nach Tschernobyl. *Berichte des Otto Hug Strahleninstituts* Nr.24 (2003) 6-34
- Körblein, A.: Fehlbildungen in Bayern nach Tschernobyl, *Strahlentelex* Nr. 416-417, 2.5.2004, 4-6
- Kochupillai, N., Verma, I.C., Grewal, M.S., Remalingaswami, Y.: Down's syndrome and related abnormalities in an area of high background radiation in coastal Kerala. *Nature* 262 (1976) 60-61
- Kruslin, B., Jukic, S., Kos, M., Simic, G., Cviko, A.: Congenital anomalies of the central nervous system at autopsy in Croatia in the period before and after the Chernobyl accident, *Acta Med. Croatica* 52 (1998) 103-107
- Kulakov, V.I., Sokur, T.N., Volobuev, A.I., Tzibulskaya, I.S., Malisheva, V.A., Zikin, B.I., Ezova, L.C., Belyaeva, L.A., Bonartzev, P.D., Speranskaya, N.V., Tchesnokova, J.M., Matveeva, N.K., Kaliznuk, E.S., Miturova, L.B., Orlova, N.S.: Female reproduction function in areas affected by radiation after the Chernobyl power station accident, *Environ Health Persp.* 101 (1993) Suppl. 2: 117-123

- Lazjuk, G.I., Nikolaev, D.L., Novikova, I.V.: Changes in registered congenital anomalies in the Republic of Belarus after the Chernobyl accident, *Stem Cells* 15 (1997), Suppl. 2: 255-260
- Lazjuk, G., Satow, Y., Nikolaev, D., Novikova, I.: Genetic consequences of the Chernobyl accident for Belarus Republic. In: Imanaka, T. (Ed.), *Recent Research Activities on the Chernobyl NPP Accident in Belarus, Ukraine and Russia*, 1999, KURRI-KR-7 (Kyoto University, Kyoto), 174-177
- Lotz, B., Haerting, J., Schulze, E. (1996): Veränderungen im fetalen und kindlichen Sektionsgut im Raum Jena nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl. Vortrag auf der Int. Konf. Ges. f. Medizinische Dokumentation, Statistik und Epidemiologie in Bonn
- Lomat, L., Galburt, G., Quastel, M.R., Polyakov, S., Okeanov, A., Rozin, S.: Incidence of childhood disease in Belarus associated with the Chernobyl accident. *Environ. Health Persp.* 105 (Suppl. 6) 1997, 1529-1532
- Lyaginskaja, A.M., Tukov, A.R., Osipov, V.A., Ermalitskiy, A.P., Prohorova, O.N.: Congenital malformations at posterity of the liquidators of the consequences from Chernobyl accident. *Radiationnaya Biologiya Radioekologiya* 49 (2009) 694-702 (Russ.)
- Macht, S., Lawrence, P.: National Survey of congenital malformations resulting from exposure to Roentgen radiation. *Am. J. Roentgenol.* 73 (1955) 442-466
- Matveencko, E.G., Borovykova, M.P., Davydow, G.A.: Physical characteristics and primary morbidity in liquidator's children. In *Konferenzproceedings "Chernobyl 20 Years After"*, 2005, zitiert nach Yablokow 2009, S. 148
- McKinney, P.A., Alexander, F.E., Cartwright, R.A., Parker, L.: Parental occupations of children with leukemia in west Cumbria, north Humberside, and Gateshead. *Br. Med. J.* 302 (1991) 681-687
- Mocan, H., Bozkaya, H., Mocan, Z.M., Furtun, E.M.: Changing incidence of anencephaly in the eastern Black Sea region of Turkey and Chernobyl. *Paediatric and Perinatal Epidemiol.* 4 (1990) 264-268
- Moumdjiev, N., Nedkova, V., Christova, V., Kostova, Sv. (1994): Influence of the Chernobyl reactor accident on the child health in the region of Pleven, Bulgaria. 20th Int. Congr. Pediatrics Sept. 6-10, 1992 in Brasil, 1992, p.57. Cited by Akar, N.: Further notes on neural tube defects and Chernobyl. (Letter). *Paediatric and Perinatal Epidemiol.* 8: 456-457
- Natarajan, N., Bross, I.D.J.: Preconception radiation leukemia. *J. Med.* 4 (1973) 276-281
- Nomura T 1982 Parental exposure to X-rays and chemicals induces heritable tumours and anomalies in mice *Nature* 296 575-7
- Nomura, T.: Transgenerational effects of radiation and chemicals in mice and humans. *J. Radiat. Res.* 47, Suppl. (2006) B83-B97
- Padmanabhan, V.T., Sugunan, A.P., Brahmaputhran, C.K., Nandini, K., Pavithran, K.: Heritable anomalies among the inhabitants of regions of normal and high background radiation in Kerala: results of a cohort study, 1988-1994. *Int. J. Health Serv.* 34 (1994) 483-515
- Parker, L., Pearce, M.S., Dickinson, H.O., Aitkin, M., Craft, A.W.: Stillbirths among offspring of male radiation workers at Sellafield nuclear reprocessing plant. *Lancet* 354 (1999) 1407-1414
- Petrova, A., Gnedko, T., Maistrova, I., Zafranskaya, M., Dainiak, N.: Morbidity in a large cohort study of children born to mothers exposed to radiation from Chernobyl, *Stem Cells* 16 (1997) Suppl. 2, 141-150
- Pflugbeil, S., Paulitz, H., Claußen, A., Schmitz-Feuerhake, I.: Gesundheitliche Folgen von Tschernobyl. 20 Jahre nach der Reaktorkatastrophe. In *IPPNW, Ges. f. Strahlenschutz e.V. Berlin*, April 2006, 76 S.
- Savchenko, V.K.: The Ecology of the Chernobyl Catastrophe. Scientific outlines of an international programme of collaborative research. *Man and the Biosphere Series Vol. 17* (1995) UNESCO Paris, p.83
- Scherb, H., Weigelt, E.: Zunahme der Perinatalsterblichkeit, Totgeburten und Fehlbildungen in Deutschland, Europa und in hochbelasteten deutschen und europäischen Regionen nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl im April 1986, *Berichte des Otto Hug Strahleninstituts Nr. 24* (2003) 35-75
- Scherb, H., Weigelt, E.: Cleft lip and cleft palate birth rate in Bavaria before and after the Chernobyl nuclear power plant accident. *Mund Kiefer Gesichtschir.* 8 (2004) 106-110
- Scherb, H., Voigt, K.: Trends in the human sex odds at birth in Europe and the Chernobyl Nuclear Power Plant accident. *Reprod. Toxicol.* 23 (2007) 593-599
- Scherb, H., Voigt, K.: The human sex odds at birth after the atmospheric atomic bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 18 (2011) 697-707

- Scherb, H., Sperling, K.: Heutige Lehren aus dem Reaktorunfall von Tschernobyl. *Naturwiss. Rundschau* 64, Heft 5 (2011) 229-239
- Scherb, H., Voigt, K., Kusmierz, R.: Modelling human radiation risks around nuclear facilities in Germany and Switzerland: a case study. In Seppelt, R. et al. (Eds.) 2012 Int. Congr. Environ. Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet. Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>
- Schmitz-Feuerhake, I.: How reliable are the dose estimates of UNSCEAR for populations contaminated by Chernobyl fallout? A comparison of results by physical reconstruction and biological dosimetry. ECRF Int. Conference „Criticisms and Developments in the Assessment of Radiation Risks” in Molyvos, Lesbos, Greece, May 5-6, 2009. *Proceedings* 2011, 70-85
- Sever, L.E., Gilbert, E.S., Hessol, N.A., McIntyre, J.M.: A case-control study of congenital malformations and occupational exposure to low-level ionizing radiation. *Am. J. Epidemiol.* 127 (1988) 226-242
- Shakhatreh, F.M.: Reproductive health of male radiographers. *Saudi Med. J.* 22 (2001) 150-152
- Shevtchenko, V.A., Platonov, E.S., Snigiryova, G.P.: Genetic consequences of disaster at Chernobyl nuclear plant on April 26, 1986. In: Int. Association for Restoration of the Environment and for Safe Living of People “Senmurv” (Minsk-Moscow-Kiev): Chernobyl Accident. Reasons and Consequences. Ed. V.B. Nesterenko, Minsk 1997, P. 213-245
- Shidlovskii, P.R.: General morbidity of the population in districts of the Brest region, Zdravoohranenie Belorussii (Minsk) 1 (1992) 8-11 (Russ.)
- Shiono, P.H., Chung, C.S., Myriantopoulos, N.C.: Preconception radiation, intrauterine diagnostic radiation, and childhood neoplasia. *J. Natl. Cancer* 65 (1980) 681-686
- Shu, X.O., Gao, Y.T., Brinton, L.A., Linet, M.S., Tu, J.T., Zheng, W., Fraumeni, J.F.: A population-based case-control study of childhood leukemia in Shanghai. *Cancer* 62 (1988) 635-644
- Shu, X.O., Reaman, G.H., Lampkin, B., Sather, H.N., Pendergrass, T.W., Robison, L.L.: Association of paternal diagnostic x-ray exposure with risk of infant leukemia. *Cancer Epidemiol., Biomarkers & Prevention* 3 (1994) 645-653
- Stewart, A., Webb, J., Hewitt, D.: A survey of childhood malignancies. *Brit. Med. J.* (1958) 1495-1508
- Strahlentext 55 (1989): Säuglinge starben vermehrt oder wurden tot geboren. S. 6
- Sviatova, G.S., Abil'dinova, G.Zh., Berezina, G.M.: Frequency, dynamics, and structure of congenital malformations in populations under long-term exposure to ionizing radiation. *Genetika* 37 (2001) 1696-1704 (Russ.)
- Tsyb, A.F., Souchkevitch, G.N., Lyasko, L.I., Artamonova, Yu.Z., Nvolokon, V.V., Raykina, L.G.: General characterization of health in first-generation offspring born to liquidators of the Chernobyl NPP accident consequences. *Int. J. Radiat. Med. Special Issue* 6 (1-4) 2004 <http://www.mns.gov.ua>
- Uma Devi, P., Nagarathnam, A., Satish Rao, B.S.: *Introduction to Radiation Biology*. B.I. Churchill Livingstone PVT Ltd. New Delhi 2000
- UNSCEAR United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Hereditary effects of radiation. 2001 Report to the General Assembly, United Nations, New York 2001; www.unscear.org
- Vogel, Friedrich et al.: *Strahlengenetik der Säuger*. Band 1. Fortschritte der allg. und klinischen Humangenetik. Herausgeber E. Becker et al., Georg Thieme Verlag Stuttgart 1969
- Weinberg, H.Sh., Korol, A.B., Kirshner, V.M. et al.: Very high mutation rate in offspring of Chernobyl accident liquidators. *Proc. R. Soc. Lond. B* 268 (2001) 1001-1005
- Wertelecki, W.: Malformations in a Chernobyl-impacted region. *Pediatrics* 125 (2010) 836-843
- Wiesel, A., Spix, C., Mergenthaler, A., Queißer-Luft, A.: Maternal occupational exposure to ionizing radiation and birth defects. *Radiat. Environ. Biophys.* 50 (2011) 325-328
- Yablokov, A.V., Nesterenko, V.B., Nesterenko, A.V.: Chernobyl– Consequences of the catastrophe for people and the environment. *Ann. New York Academy of Sciences* Vol.1181, Boston 2009
- Zatsepin, I.O., Verger, P., Robert-Gnansia, E., Gagniere, B., Khmel, R.D., Lazjuk, G.I. (2004): Cluster of Down's syndrome cases registered in January 1987 in Republic of Belarus as a possible effect of the Chernobyl accident, *Int. J. Radiat. Med. Special Issue* 6 (1-4), Kiev: 57-71 <http://www.mns.gov.ua>
- Ziegowski, V., Hemprich, A.: Facial cleft birth rate in former East Germany before and after the reactor accident in Chernobyl, *Mund Kiefer Gesichtschir.* 3 (1999) 195-199