

## Strahlenfolgen

# Genetische Effekte um Nuklearanlagen

**„Verlorene Mädchen“ durch Radioaktivität – Fachgespräch am 7. April 2014 im Deutschen Bundestag in Berlin**

Das Geschlechtsverhältnis bei der Geburt des Menschen (Lebendgeburten männlich/weiblich oder sex odds bzw. sex ratio) ist innerhalb eines Gesellschaftssystems auf Populationsebene relativ konstant. Es herrscht Konsens, dass Veränderungen des Geschlechtsverhältnisses ein empfindlicher Indikator für physikalische oder chemische Expositionen sein können; vorausgesetzt es sind vergleichbare und genügend große exponierte und nicht exponierte Populationen beobachtbar. Für die offiziellen Geburtenzahlen nach Geschlecht auf Gemeindeebene in Europa ist diese Voraussetzung erfüllt. Bereits vor etwa 100 Jahren wurde eine strahleninduzierbare Veränderung der Erbanlagen (Mutagenität) im Tierversuch von HJ Muller festgestellt und für den Menschen postuliert. Mullers Versuche zeigten hohe Raten dominanter genetischer Veränderungen im Tierversuch, die sich unter anderem in einer Veränderung des Geschlechtsverhältnisses manifestierten. Muller erhielt für seine Entdeckungen den Nobelpreis.

Darauf wies Dr. Hagen Scherb, Biomathematiker am Helmholtz-Zentrum München einleitend in einem Fachgespräch über „Die verlorenen Mädchen – Auswirkungen ionisierender Strahlung auf das Geschlechterverhältnis“ hin, das auf Einladung der Bundestagsabgeordneten Sylvia Kotting-Uhl, atompolitische Sprecherin der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen, am 7. April 2014 im Deutschen Bundestag in Berlin stattfand.

Nach den Atombombenabwürfen über Japan beobachtete man auch beim Menschen ein verändertes Geschlechtsverhältnis (Schull und Neel 1958), erklärte Scherb weiter. Neel führte 1966 aus: „Ionisierende Strahlung kann tödliche Mutationen bewirken, die mit dem X-Chromosomen assoziiert sind, und tut das zweifellos auch. Diese Mutationen können unter Umständen zu einer veränderten sex ratio bei den Nachkommen führen, die nach einer Exposition geboren werden.“. Heute geht man davon aus, dass auch biologisch-genetische Vorgänge vor (Spermatogenese), während und nach der Befruchtung (epigenetische Abläufe) durch ionisierende Strahlung gestört werden.

Nach Injektion radioaktiven Materials in die Biosphäre, so Scherb, lassen sich Veränderungen des Geschlechtsverhältnisses auf Länder- und Kontinentebene, aber auch um Nuklearanlagen nach deren Inbetriebnahme einfach und konsistent nachweisen. Scherb und KollegInnen konnten insbesondere zeigen, dass um Nuklearanlagen in Deutschland, in der Schweiz und in Frankreich das Geschlechtsverhältnis erhöht ist: Es kommen mehr Jungen oder weniger Mädchen als erwartet zur Welt.

Während die globalen Veränderungen des Geschlechtsverhältnisses nach den Atomtests und nach Tschernobyl im allgemeinen im Bereich von bis zu 1 Prozent liegen, bewegen sich die zeitlich mit der Einlagerung von HAW (Highly Active Waste) zusammenhängenden Veränderungen im 40-km-Radius um Gorleben und

um Philippsburg in der Größenordnung von 3 bis 8 Prozent. Andere Ursachen als die HAW-Einlagerungen seien nicht ersichtlich. Aufgrund dieser Befunde sei auch ohne genaue Kenntnis der dort wirkenden physikalischen und biologisch/genetischen Mechanismen von einem Ursache-Wirkungszusammenhang auszugehen: Der Effekt sei stark und spezifisch und die Beobachtungen konsistent mit vielen analogen Beobachtungen in Deutschland, in der Schweiz und in Frankreich. Es bestünden signifikante zeitliche und räumliche Zusammenhänge.

Im 25-km Umkreis der Atom- und Mülldeponie in Ellweiler/Rheinland-Pfalz ist das Geschlechtsverhältnis nach mutmaßlichen Freisetzen im Januar 1995 in den folgenden Jahren langfristig um circa 6 Prozent erhöht. Ähnliche Effekte zeichnen sich in den Uranabaugebieten der WISMUT in Sachsen und Thüringen ab.

Im 80-km Umkreis um das Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble/Frankreich ist das Geschlechtsverhältnis von 1971 bis 2011 laut Scherb signifikant um circa 1 Prozent erhöht. Um den Forschungsreaktor München II (FRM II) ist ab der routinemäßigen Inbetriebnahme im April 1995 das Geschlechtsverhältnis ebenfalls um circa 1 Prozent erhöht. Vor 2005 ist mit der Untersuchungsmethode von Scherb und KollegInnen um den FRM I kein entsprechender Effekt nachweisbar, was allerdings einen möglicherweise unter der Nachweisgrenze des Verfahrens liegenden Effekt, naturgemäß nicht ausschließt.

In der Nähe von Nuklearanlagen sind die Krebshäufigkeit bei Kindern (KiKK-Studie) und das Geschlechtsverhältnis der Neugeborenen erhöht. Nach einem von UNSCEAR/ICRP/WHO/IAEA aufrechterhaltenen Dogma, sind solche Effekte auszuschließen, weil die Strahlendosen dafür an-

geblich zu gering seien. Allerdings wird von atomfreundlichen Wissenschaftlern und Institutionen sozusagen nach dem Motto geforscht: „It's easy to find nothing“. Die verlorenen Mädchen sind ein Indikator unter vielen anderen für falsche Strahlengrenzwerte bei der Konstruktion und Genehmigung von Nuklearanlagen, ist das Fazit von Scherb. Der Betrieb von Nuklearanlagen, ihr Rückbau, die Zwischen- und „Endlagerung“ sind aus seiner Sicht und der seiner KollegInnen unverantwortlich und führen zu beträchtlichen Umwelt- und Gesundheitsschäden. Die Intensivierung der Erforschung der von ihnen aufgezeigten Effekte sei dringend geboten. Zum Schutz der Bevölkerung und zum Schutz der natürlichen Genpools seien sofortige Maßnahmen erforderlich.

## Das epigenetische Konzept

Genetische Effekte nach Tschernobyl (Chromosomenschäden – Down-Syndrom (Trisomie 21)) hatte frühzeitig bereits auch der Berliner Genetiker Professor Dr. Karl Sperling, ehemals Direktor des Instituts für Humangenetik und der Genetischen Beratungsstelle der Charité Berlin, nachgewiesen. Er erklärt die Auffälligkeiten auch in der Veränderung des Geschlechterverhältnisses mit dem in den letzten Jahren entwickelten epigenetischen Konzept. Meinte man früher, mit dem genetischen Code der DNA sei im wesentlichen alles geregelt und alle Entwicklungsschritte seien damit festgeschrieben, so muß man nun erkennen, daß die Gene noch einer übergeordneten Regulierung unterliegen. Epigenetische Effekte spielen bei niedrigen Strahlendosen eine wesentliche Rolle und führen dazu, die Annahme eines linearen Dosis-Effekt-Bezugs der Strahlenwirkung infrage zu stellen, erklärt Sperling. Epigenetische Prozesse seien

entscheidend für das normale Entwicklungsgeschehen. Zu verstehen sind darunter Vorgänge, „die zur stabilen Modifikation der DNA führen, ohne allerdings deren Sequenz zu verändern“.

Die Wirkung besteht in einer Änderung der Biosynthese spezifischer Genprodukte (Genexpression), so Sperling, die an Tochterzellen weitergegeben wird. Die wichtigsten Prozesse hierbei, erklärt Sperling, sind die DNA-Methylierung und die Modifikation DNA-bindender Proteine (Histone), die sich auf die Konformation des Chromatins und damit die Transkription der Gene sowie auf die vielen regulatorisch wirkenden mikro-RNA-Gene auswirken. Die Methylierungsmuster und Histonmodifikationen können durch vielfältige Umweltfaktoren – ionisierende Strahlung eingeschlossen – beeinflusst werden.

So werden normalerweise in der Frühphase der Embryonalentwicklung bestimmte Gene durch Methylierung abgeschaltet. Es kommt auch zu einer unterschiedlichen Prägung (Imprinting) des mütterlichen und des väterlichen Genoms in der befruchteten Eizelle, wobei die betreffenden väterlichen Gene bevorzugt die Entwicklung des extraembryonalen Gewebes steuern und die mütterlichen die des eigentlichen Embryos. Insbesondere auch die Gene des X-Chromosoms unterliegen epigenetischen Vorgängen, die bereits von Natur aus sehr empfindlich sind und deshalb für Störungen besonders anfällig.

Inzwischen, so Sperling, ist gut belegt, daß niedrige Dosen ionisierender Strahlung in vitro und in vivo derartige Prozesse beeinflussen. Sie können die Physiologie und den Stoffwechsel der betroffenen Menschen verändern und das Risiko für Alterskrankheiten erhöhen. Sie können auch zu „genomischer Instabilität“ führen und sich so auf das Krebs-

risiko auch der Nachkommen auswirken. Im Vergleich zu Mutationen werden epigenetische Veränderungen bereits durch wesentlich geringere Strahlendosen ausgelöst.

Im Zeitraum um die Zeugung herum besteht nicht nur eine besondere Anfälligkeit für die Erzeugung von Chromosomenanomalien, sondern auch für die Verschiebung des Geschlechtsverhältnisses. Beim Jungen stammt das X-Chromosom von der Mutter und nur Mädchen haben auch ein X-Chromosom vom Vater. Das väterliche X-Chromosom unterliegt bereits in der Spermio-genese einer Inaktivierung (Imprinting), erklärt Sperling, es bleibt im frühen Entwicklungsstadium im extraembryonalen Gewebe zunächst inaktiviert, was in der inneren Zellmasse des späteren Embryos aber wieder rückgängig gemacht wird, wobei es anschließend zu einer zufälligen Inaktivierung des väterlichen oder mütterlichen X-Chromosoms kommt. Wird dieser Vorgang der Inaktivierung des väterlichen X-Chromosoms gestört oder geht es sogar völlig verloren, so wirkt sich dies deshalb nur auf weibliche Embryonen nachteilig aus und entsprechend verschiebt sich das Geschlechterverhältnis zu Lasten der Mädchen.

#### Kommentar

Dr. Thomas Jung, Leiter des Fachbereichs Strahlenschutz und Gesundheit im Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), meinte demgegenüber, als Behördenvertreter auf Zurückhaltung bei derartigen Hypothesenbildungen dringen zu müssen: Weil man „sonst die wahren Ursachen übersehen“ könne. Ihm seien die Hinweise auch noch „nicht stark genug“, um dafür Forschungsgelder zu aktivieren. Da stellt sich die Frage, wie man sich in seiner Behörde Wissenschaft ohne Hypothesenbildung vorstellt.

Frau Kotting-Uhl wiederum fände es nicht gut, wenn die

Parlamentarier sich mit Grenzwertfragen befassen würden, mit denen bisher in Verordnungen anstatt in Gesetzen festgelegt wird, wieviele Menschenopfer für eine Technik akzeptiert werden sollen. Dafür, meinte die Bundestagsabgeordnete, bräuchte es „die Wissenschaft“. Zur Erinnerung: Verordnungen werden lediglich von den Regierungen beschlossen, Gesetze dagegen vom Parlament. **Th.D.**

<http://www.esp.org/foundations/genetics/classical/holdings/m/hjm-1927a.pdf> (HJ Muller, Science 1927)

[http://push-zb.helmholtz-muenchen.de/frontdoor.php?source\\_opus=5922&la=en](http://push-zb.helmholtz-muenchen.de/frontdoor.php?source_opus=5922&la=en)

[http://www.naturwissenschaftliche-rundschau.de/navigation/dokumente/NR\\_5\\_2011\\_HB\\_Scherb.pdf](http://www.naturwissenschaftliche-rundschau.de/navigation/dokumente/NR_5_2011_HB_Scherb.pdf)

[http://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/ICB/biostatistics\\_pdfs/scherb/ScherbVoigtMolWSWittmann2013.pdf](http://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/ICB/biostatistics_pdfs/scherb/ScherbVoigtMolWSWittmann2013.pdf)

[http://www.strahlentelex.de/Stx\\_10\\_558\\_S01-04.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_10_558_S01-04.pdf)

[http://www.strahlentelex.de/Stx\\_10\\_574\\_S02-05.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_10_574_S02-05.pdf)

[http://www.strahlentelex.de/Stx\\_11\\_586\\_S01-03.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_11_586_S01-03.pdf)

[http://www.strahlentelex.de/Stx\\_12\\_616\\_S01-04.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_12_616_S01-04.pdf)

[http://www.strahlentelex.de/Stx\\_14\\_650-651\\_S03-06.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_14_650-651_S03-06.pdf)

[http://www.strahlentelex.de/Stx\\_14\\_652-653\\_S01-05.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_14_652-653_S01-05.pdf)

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17482426>

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21336635>

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22076251>

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22327606>

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22421798>

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22798146>

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23947741>

Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (NLGA) und Fachgespräch zum Thema „Gorleben“:

[http://www.nlga.niedersachsen.de/download/60794/Veraenderung\\_n\\_beim\\_sekundaeren\\_Geschlechterverhaeltnis\\_in\\_der\\_Umgebung\\_des\\_Transportbehaelterlagers\\_Gorleben\\_ab\\_1995.pdf](http://www.nlga.niedersachsen.de/download/60794/Veraenderung_n_beim_sekundaeren_Geschlechterverhaeltnis_in_der_Umgebung_des_Transportbehaelterlagers_Gorleben_ab_1995.pdf)

[http://www.nlga.niedersachsen.de/download/65642/Sekundaeres\\_Geschlechterverhaeltnis\\_in\\_der\\_Umgebung\\_des\\_Transportbehaelterlagers\\_TBL\\_Gorleben\\_-\\_Fachgespraech\\_am\\_12\\_Maerz\\_2012.pdf](http://www.nlga.niedersachsen.de/download/65642/Sekundaeres_Geschlechterverhaeltnis_in_der_Umgebung_des_Transportbehaelterlagers_TBL_Gorleben_-_Fachgespraech_am_12_Maerz_2012.pdf)

vergl. auch:

Kinderkrebs um Atomkraftwerke. Strahlenrisiken sind wissenschaftlich nachweisbar, von denen sich behördliche Kalkulationen nichts träumen lassen. Evidenz – Kontroverse – Konsequenz: Umweltmedizin-Symposium der Gesellschaft für Strahlenschutz vom 28. September 2008 in Berlin

[www.strahlentelex.de/Stx\\_08\\_52\\_2\\_S01-07.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_08_52_2_S01-07.pdf)

#### Strahlenfolgen

## Das genetische Strahlenrisiko – ein sträflich vernachlässigtes Problem bei der Folgenabschätzung atompolitischer Maßnahmen

Von Inge Schmitz-Feuerhake\*

Das genetische Strahlenrisiko wird von der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP, dem normgebenden Gremium für unsere Strahlenschutzgesetzgebung, als äußerst gering eingeschätzt. Dies ist nur möglich unter Ausblendung zahlreicher wissenschaftlicher Befunde, denn zu erwarten sind u.a. Schädigungen der Frucht und Totgeburten sowie Fehlbildungen und Krebserkrankungen bei den Kindern, wenn die Keimdrüsen der Eltern vor Konzeption

**einer Bestrahlung ausgesetzt waren. Eine Zusammenstellung solcher Ergebnisse wird vorgestellt, die nach beruflicher Exposition, nach diagnostischen Bestrahlungen sowie bei radioaktiven Umweltkontaminationen und insbesondere nach Tschernobyl erhoben wurden. Ein neues Schutzkonzept für nachfolgende Generationen muss gefordert werden.**

Herman Joseph Muller entdeckte in den 20-er Jahren des vorigen Jahrhunderts, dass Röntgenstrahlen mutagen sind. Man kannte damals bereits die Chromosomen als Träger des Erbmaterials und als eine direkte Strahlenwirkung hatte man sichtbare Änderungen an den Chromosomen festgestellt – Änderungen der Form und der Anzahl. Mullers Beitrag bestand insbesondere darin, dass er Missbildungen und frühe Sterblichkeit bei den Nachkommen bestrahlter Eltern fand. Sein Studienobjekt war die Taufliede wegen der vielen Generationen, die man in kurzer Zeit untersuchen kann.

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 sogenannten friedlichen Verwendung der Atomenergie.

Rechtzeitig merkte man jedoch, dass Muller ein Bedenkenträger war gegenüber zusätzlichen ionisierenden Strahlungsquellen, und deshalb wurde er wieder ausgeladen. Diese Tradition hat sich bis heute erhalten.

Die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP, das normgebende Gremium für unsere Strahlenschutzverordnung, behauptet, es gebe keinen direkten wissenschaftli-

chen Nachweis dafür, dass Kinder von bestrahlten Eltern Erbkrankheiten haben. Im Jahr 2007 hat sie ihre Abschätzung für das genetische Strahlenrisiko auf einen sehr kleinen Wert gesenkt.

Prinzipiell muss man aber, wie man aus Tierversuchen und Beobachtungen beim Menschen weiss, mit den folgenden Schädigungen rechnen:

- 1) Absterben der Frucht, Totgeburten, Säuglingssterblichkeit, früher Tod
- 2) Fehlbildungen der Gliedmaßen und Organe, Stoffwechselstörungen, durch Chromosomen- oder Genanomalien bedingte Krankheiten
- 3) Krebs im Kindes- oder Erwachsenenalter
- 4) Immunschwäche und multiple Degenerationerscheinungen

Nach dem Tschernobylunfall sind in vielen kontaminierten Gebieten erhöhte Raten an Totgeburten und frühkindlichen Todesfällen registriert worden. Ebenso sind zahlreiche Untersuchungen über kongenitale (angeborene) Fehlbildungen und andere Entwicklungsstörungen gemacht worden, siehe Tabelle 1.

Diese Effekte werden von den meisten Autoren für solche gehalten, die durch Bestrahlung von Embryonen und Föten im Mutterleib entstehen. Tatsächlich kann man bei Bestrahlung einer Bevölkerung die Folgen solcher vorgeburtlichen Expositionen nicht sämtlich von genetisch induzierten unterscheiden.

Nun ist es natürlich so, dass nach Tschernobyl Effekte im Mutterleib nicht jahrelang anhaltend erhöht bleiben können oder womöglich noch anstei-

gen, weil die Falloutbelastung im Körper abnimmt und auch die Nahrungsmittelkontamination.

Bemerkenswert ist, dass in der Ukraine von Wertelecki in der hochverstrahlten nördlichen Provinz Rivne mehr als 14 Jahre nach dem Unfall noch über 50 Prozent erhöhte Fehlbildungsraten gefunden werden (Tabelle 1). Er interpretiert das als Effekt im Mutterleib. Plausibel wäre jedoch, das als genetische Folge anzusehen.

In Weißrussland gibt es seit 1983 ein zentrales Register für Fehlbildungen und andere Geburtsfehler. Das wurde also bereits vor Tschernobyl eingerichtet und man registriert dort über Jahre ansteigende Fehlbildungen, die als genetisch induziert gelten.

Tabelle 2 enthält Ergebnisse der letzten mir bekannten Veröffentlichung, in der auch die Arten der Fehlbildungen spezifiziert werden.

Die Autoren halten diese Fehlbildungen auch deshalb für genetisch bedingt, weil sie solche Entwicklungsstörungen gesondert untersucht haben, die mit einer erkennbaren Genmutation einhergehen, die bei den Eltern nicht vorliegt. Auch diese Fehlbildungen waren erhöht. Dabei kann es sich nur um eine Mutation zwischen den Generationen handeln (Lazjuk 1999).

Ein weiteres verstrahltes Gebiet, in dem noch lange Zeit nach der Kontamination erhöhte Fehlbildungsraten in der Bevölkerung festgestellt wurden, ist das ehemalige Atomtestgebiet der Sowjetunion bei Semipalatinsk, jetzt Kasachstan (Sviatova 2001).

Von Interesse sind natürlich solche Ergebnisse, bei denen entweder exponierte Väter oder exponierte Mütter und deren Kinder untersucht werden, weil die Expositionen von Vätern und Müttern unterschiedliche Auswirkungen haben. In Tabelle 3 sind Un-

tersuchungen aufgeführt, die die Nachkommen beruflich exponierter Männer betreffen.

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 3) sind sehr gering. Der Befund in Hanford führte in der Fachwelt zu erheblichen Zweifeln, konnte aber letztlich nicht wegdiskutiert werden. Diese Arbeiten 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.3). Bei ihnen zeigen sich erschreckend hohe Fehlbildungsraten und andere Geburtsfehler.

Über Letalfaktoren und Down-Syndrom haben meine Vorredner schon berichtet.<sup>†</sup>

Krebserkrankungen als genetischer Strahleneffekt wurden in

<sup>†</sup> Dr. Hagen Scherb, Prof. Dr. Karl Sperling; vergl. vorstehenden Bericht über das Fachgespräch „Die verlorenen Mädchen – Auswirkungen ionisierender Strahlung auf das Geschlechterverhältnis“ am 7. April 2014 im Deutschen Bundestag; Anm. d. Red.

den 1990-er Jahren heftig diskutiert, als es um die Leukämien bei der britischen Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield ging. Diese waren von Gardner und Mitarbeitern als genetischer Effekt gedeutet worden, da sich zeigte, dass die Väter der betroffenen Patienten in der Anlage gearbeitet hatten (Gardner 1990). Das Ergebnis ist in mehreren 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 4).

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

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

Im weißrussischen Nationalregister wurden 1995 erhöhte Inzidenzen für folgende Erkrankungsgruppen bei den Kindern von tschernobylbelasteten Eltern festgestellt (Lomat 1997):

- Blutkrankheiten (6-fach)
- Endokrine Erkrankungen (2-fach)
- Erkrankungen der Verdauungsorgane (1,7-fach)

Zur Frage, inwieweit genetische Schäden über die Keimbahn der Mütter induziert werden können, gibt es eine interessante Arbeit aus Deutschland. An der Univer-

Tabelle 1:  
**Beobachtete Anstiege von Fehlbildungen bei Neugeborenen nach dem Tschernobylunfall**

Region	Art der Effekte Untersuchungsdauer	Referenzen
<b>Weißrussland</b> 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
<b>Ukraine</b> Polessky-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	Wertelecki 2010
<b>Türkei</b>	Anenzephalie, spina bifida bis 1989	Akar u.a.1988/89; Caglayan u.a.1990; Güvenc u.a. 1993; Mocan u.a. 1990
<b>Bulgarien</b> , Region Pleven	Fehlbildungen bei Herz u. ZNS, Mehrfachanomalien	Moumdjiev u.a. 1992
<b>Kroatien</b>	Fehlbildungen in Autopsien von Aborten und nach frühem Tod des Neugeborenen/vor und nach dem Unfall	Kruslin u.a. 1998
<b>Deutschland</b> DDR, Zentralregister für 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

sitätskinderklinik Mainz wird ein Geburtenregister über angeborene Anomalien geführt. Im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz erfolgte dort eine Untersuchung an strahlenexponierten Frauen. Bei deren Kindern zeigte sich eine 3,2-fach erhöhte Rate an Fehlbildungen (Wiesel 2011).

Die Autoren interpretieren diesen Befund als Effekt durch Exposition in utero. Woher sie das allerdings wissen wollen, bleibt unklar. Er ist auch keinesfalls kompatibel mit den Annahmen der ICRP, die für Strahleneffekte in utero einen unschädlichen

Tabelle 2:  
**Erhöhung der Rate angeborener Fehlbildungen in den 17 höchstbelasteten Gebieten von Weissrussland 1987 bis 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	40 %*
Atresie ( <i>Verschluss</i> )der Speiseröhre	13 %
Atresie des Rektums ( <i>Darmverschluss</i> )	80 %*
Mehrfachfehlbildungen	128 %*

\* signifikant (p<0,05)

Dosisbereich von 100 mSv (!) annimmt. Man hätte erwarten können, dass ein solches Ergebnis, das zwar nur auf 4 Fällen beruht, die aber sämtlich sehr schwerwiegend sind, zumindest zu umfangreicheren Folgeuntersuchungen geführt hätte. Das ist aber nicht der Fall.

Mein Anliegen in diesem Beitrag war es, aufzuzeigen, dass Maßnahmen zum „Schutz künftiger Generationen“ sich nicht auf die möglichst sichere Verwahrung von Atommüll beschränken dürfen. Ein besonderer Schutz des Erbgutes vor zusätzlichen Strahlenbelastungen ist offiziell schon lange nicht mehr vorgesehen. Denn die von der ICRP als Schadensmaß eingeführte „effektive“ Dosis und damit die geltenden Dosisgrenzwerte orientieren sich ausschließlich am Krebsrisiko für die Bestrahlten selbst. Die bei ihren Nachkommen induzierten Erbschäden werden damit nicht erfasst.

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  
 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  
 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  
 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  
 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  
 McKinney, P.A., Alexander, F.E., Cartwright, R.A., Parker, L.: Parental occupations of children with leukemia in west Cumbria,

Tabelle 3: **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 (offener 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	im allg. 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 Jahr	Signifikante Erhöhung ca. um: Anenzephalie 310 % Spina bifida 316 % Lippen/Gaumenspalten 170 % Gliedmaßenverkümmerng 155 % Mehrfachfehlbildungen 19 % Fehlbildungen gesamt 120 %	5-250 mSv	Lyaginskaja 2009

Tabelle 4: **Krebserkrankungen bei Kindern nach präkonzeptioneller beruflicher oder diagnostischer Niederdosisbestrahlung von Eltern vor Tschernobyl**

Bestrahtetes Kollektiv	Krankheit	Gonadendosis mSv	Relatives Risiko
Sellafield			
Seascale Väter (Gardner 1990)	Leukämie+Lymphome	200	7
alle Stadien der Spermatogenese 6 Monate vor Konzeption	"	10	7
Sellafield Arbeiter (Dickinson 2002)	"		1,9
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	3-30	1,3
Väter (Shu 1988)	Leukämie		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

north Humberside, and Gatehead. *Br. Med. J.* 302 (1991) 681-687  
 Natarajan, N., Bross, I.D.J.: Preconception radiation leukemia. *J. Med.* 4 (1973) 276-281  
 Nomura, T.: Parental exposure to X-rays and chemicals induces he-

ritable tumours and anomalies in mice. *Nature* 296 (1982) 575-577  
 Nomura, T.: Transgenerational effects of radiation and chemicals in mice and humans. *J. Radiat. Res.* 47, Suppl. (2006) B83-B97  
 Pflugbeil, S., Paulitz, H., Claßen, A., Schmitz-Feuerhake, I.

2006. Gesundheitliche Folgen von Tschernobyl. 20 Jahre nach der Reaktorkatastrophe. IPPNW u. Ges. f. Strahlenschutz e.V. (Herausg.) 76 S.  
 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

Die weiteren Literaturhinweise können dem Artikel „Genetisch

strahleninduzierte Fehlbildungen“ in Strahlentelex Nr. 644-645 vom 7.11.2013, S. 1-5, entnommen werden.

[www.strahlentelex.de/Stx\\_13\\_644-645\\_S01-05.pdf](http://www.strahlentelex.de/Stx_13_644-645_S01-05.pdf)

\* Prof. Dr. Inge Schmitz-Feuerhake, Hannover, Gesellschaft für Strahlenschutz e.V., [ingesf@uni-bremen.de](mailto:ingesf@uni-bremen.de)

Dieser Text ist die überarbeitete Fassung des Vortrages in dem Fachgespräch „Die verlorenen Mädchen – Auswirkungen ionisierender Strahlung auf das Geschlechterverhältnis“ am 7. April 2014 im Paul-Löbe-Haus des Deutschen Bundestages in Berlin, veranstaltet von der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen. ●

## Atommüll-Zwischenlager

# Castoren als ständige Neutronenquelle

Von Rolf Bertram<sup>‡</sup>

In der näheren Umgebung eingelagerter Castoren existiert ein Mischstrahlungsfeld von Neutronen- und Gammastrahlen. Die vom Inventar eines Castors ausgehende Strahlung wird definitionsgemäß abgeschirmt. „Abschirmung“ bedeutet aber nur, dass die Strahlung bis auf die zulässige Dosis abgeschwächt wird. Die Aufsummierung aller Außenflächen der über 100 eingelagerten Castoren (z.B. im Zwischenlager Gorleben) übersteigt die Fläche eines Fußballfeldes.

Direkt an der Außenhaut von CASTOREN ist ein erheblicher Neutronenfluss mit einem hohen Anteil thermischer Neutronen festgestellt worden – bis zum 100.000fachen der natürlichen Strahlung. Die Intensität dieser thermischen Neutronen reicht aus, um auf der Außenhaut adsorbierte Ionen, Atome und Moleküle mittels kernchemischer Reaktionen zu aktivieren.

Der Grad der Aktivierung der genannten Teilchen hängt von der Halbdauer, von der Ortsdosisleistung der Neutronen an der Haftstelle, vom Wirkungsquerschnitt (barn) der getroffenen Atome und von Art und Größe der anhaftenden Teilchen ab. Die Halbdauer

er (ggf. bis zur Desorption) hängt von der Oberflächenmorphologie (glatt, rau) und von Art und Menge der beteiligten Komponenten ab.

Eine zweite Ursache für Luftkontamination liegt in der Aktivierung von natürlichen Luftbestandteilen durch vom Castor ausgehende bis tief in den Luftraum reichender Neutronenstrahlung ab (Luftstickstoff N-14 wird mittels einer n,p-Reaktion zu Radiokohlenstoff C-14).

Eine weitere Ursache ist die Aktivierung von in der Luft befindlichen Schwebstoffteilchen. Die normale Umgebungsluft enthält große Mengen an Partikeln unterschiedlicher Art und Größe. Einzelne suspendierte Teilchen bestehen aus Tausenden von Atomen, darunter auch aktivierbare. Bei Berücksichtigung von Ultrafeinstaub (Nanopartikel) kann die Partikelzahl pro Kubikmeter Luft mehr als 1 Million betragen. Durch den zur Kühlung dienenden ungefilterten Naturzug von Zuluft und Abluft (z.B. im Castor-Zwischenlager Gorleben: „unten rein oben raus“) muss während der langen Standzeiten mit einer ständigen Kontamination der Abluft und der davon betroffenen Biosphäre gerechnet werden. Die luftgetragenen radioaktiven suspendierten Teilchen

dürften radiologisch und radioökologisch von besonderer Bedeutung sein.

Neben der radioaktiven Verseuchung der Atemluft (ein Mensch benötigt durchschnittlich 23.000 Liter Atemluft pro Tag) spielt die Boden- und Wasserverseuchung, hervorgerufen durch sedimentierte kontaminierte Partikel aus bodennahen Luftschichten eine große Rolle. Bedeutsam dürfte der Einfluss auf Feldfrüchte sein, vorrangig durch die Assimilation radiokohlenstoffhaltigen Kohlendioxids (<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>) während der Vegetationsperiode.

Systematische Untersuchungen und belastbare Modelle oder plausible Theorien über diese Prozesse, an deren Ende die Freisetzung radioaktiver Aerosole und radioaktiver Atome/Moleküle – vorrangig C-14 – steht, sind nicht bekannt. Vorliegende Abschätzungen zeigen eine enorme Unsicherheit. Es ist auffällig, dass von Betreibern und Behörden systematisch jene Schätzwerte herangezogen werden, die zur Rechtfertigung der Maßnahmen und der bisherigen Genehmigungspraxis dienen. Damit ergeben sich bisher unzureichend bearbeitete Probleme für alle Arten der Zwischenlagerung von hochaktivem Atommüll. ●

## Katastrophenschutz

# Keine Reaktorsicherheit in Rußland

Die russischen und ukrainischen Atomkraftwerke (AKW) weisen massive Sicherheitslücken auf und entsprechen nicht den modernen Anforderungen. Die Qualifikation des Personals sei mangelhaft, die Normen für die radioaktive Sicherheit würden immer weiter aufgeweicht und das Problem der Lagerung der abgebrannten Brennstäbe sei bislang ungelöst. Diese Einschätzungen von Vladimir Kuznetsov, Professor der Arkhangelsk Arctic State University, lösten am 19. März 2014 in einer öffentlichen Anhörung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit des Deutschen Bundestages Besorgnis unter den Abgeordneten aus. Von einer „unvorstellbaren Situation“ sprach Steffen Kanitz von der CDU/CSU-Fraktion, Klaus Mindrup (SPD) bezeichnete die Ausführungen des Sachverständigen als „erschütternd“.

Kuznetsov, der vor der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl als Hauptingenieur im dortigen Reaktor 3 gearbeitet hatte, nach der Katastrophe am 26. April 1986 als „Liquidator“ tätig war und später als Mitarbeiter der sowjetischen Atomenergieaufsichtsbehörde, sagte im Ausschuss, die Havarie des AKW habe alle Schwachstellen der Atom-

<sup>‡</sup> Prof. Dr. Rolf Bertram, [bertramrolf@aol.com](mailto:bertramrolf@aol.com)