

Gefahren ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt in Bezug auf kerntechnische Anlagen

Felix Hübner, Jennifer Jana Jung, Frank Schultmann

No. 19 | März 2017

WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY



Gefahren ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt in Bezug auf kerntechnische Anlagen

Felix Hübner, Jennifer Jana Jung and Frank Schultmann

Chair of Business Administration, Production and Operations Management,
Institute for Industrial Production (IIP),
Karlsruhe Institute of Technology (KIT),
Hertzstr. 16, building 06.33, 76187 Karlsruhe,
Tel.: +49 721 608-44677, email: felix.huebner@kit.edu

Die Stromerzeugung mit Hilfe der Kernspaltung ist weltweit verbreitet. Als Vorteil dieser Technologie wird häufig die Stromerzeugung mit geringem CO₂-Ausstoß genannt. Andererseits wird vor den Gefahren für Mensch und Umwelt durch die Nutzung der Kernenergie gewarnt. Eine Untersuchung der Gefahren der bei der Kernspaltung entstehenden ionisierenden Strahlung ist somit von Bedeutung. Die vorliegende Arbeit gibt daher einen Überblick über die Gefahren ionisierender Strahlung für Menschen sowie Tiere und Umwelt. Sie stellt dabei die gesundheitlichen Folgen für den Menschen in den Vordergrund und nimmt Bezug auf Kernkraftwerke.

In Kernkraftwerken treten sowohl natürliche als auch durch die Kernspaltung künstlich erzeugte Strahlungsarten auf. Diese ionisierende Strahlung kann bei normalem Betrieb in kleinen Mengen in die Umwelt gelangen. Bei einem Nuklearunfall oder durch Fehler beim Rückbau können sich sogar gravierende Folgen ergeben. Je nach Reaktortyp, Betriebsphase und Störfall treten unterschiedliche Leitnuklide in den Vordergrund.

Zu Beginn werden Strahlungsarten mit ihren verschiedenen Eigenschaften und Wirkungen auf den betroffenen Organismus erläutert. Empfindliche Organe werden dabei besonders hervorgehoben. Individuelle Risiken hängen von vielen Faktoren ab und können nicht vorhergesagt werden.

Die Gefahren ionisierender Strahlung werden zunächst anhand von wissenschaftlichen Studien und Veröffentlichungen aus dem medizinischen Bereich zusammengetragen. Die Folgen hoher Dosen ionisierender Strahlung sind gut erforscht. Für einige Erkrankungen, insbesondere nach geringen Strahlungs Dosen, herrscht Uneinigkeit über einen Zusammenhang mit ionisierender Strahlung. Aus diesem Grund werden die Standpunkte der internationalen Organisationen in dieser Arbeit kritisch gegenübergestellt.

Gefahren ionisierender Strahlung für Mensch und Umwelt in Bezug auf kerntechnische Anlagen

Felix Hübner • Jennifer Jana Jung • Frank Schultmann

Karlsruhe Institute of Technology (KIT),
Institute for Industrial Production (IIP)
Hertzstraße 16,
D-76187 Karlsruhe, Germany

felix.huebner@kit.edu

Vorbemerkung:

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen der Bachelorarbeit von Frau Jennifer Jana Jung in Zusammenarbeit mit ihrem Betreuer Herrn Felix Hübner im Frühjahr 2016 erarbeitet.

Kurzfassung

Die Stromerzeugung mit Hilfe der Kernspaltung ist weltweit verbreitet. Als Vorteil dieser Technologie wird häufig die Stromerzeugung mit geringem CO₂-Ausstoß genannt. Andererseits wird vor den Gefahren für Mensch und Umwelt durch die Nutzung der Kernenergie gewarnt. Eine Untersuchung der Gefahren der bei der Kernspaltung entstehenden ionisierenden Strahlung ist somit von Bedeutung. Die vorliegende Arbeit gibt daher einen Überblick über die Gefahren ionisierender Strahlung für Menschen sowie Tiere und Umwelt. Sie stellt dabei die gesundheitlichen Folgen für den Menschen in den Vordergrund und nimmt Bezug auf Kernkraftwerke.

In Kernkraftwerken treten sowohl natürliche als auch durch die Kernspaltung künstlich erzeugte Strahlungsarten auf. Diese ionisierende Strahlung kann bei normalem Betrieb in kleinen Mengen in die Umwelt gelangen. Bei einem Nuklearunfall oder durch Fehler beim Rückbau können sich sogar gravierende Folgen ergeben. Je nach Reaktortyp, Betriebsphase und Störfall treten unterschiedliche Leitnuklide in den Vordergrund.

Zu Beginn werden Strahlungsarten mit ihren verschiedenen Eigenschaften und Wirkungen auf den betroffenen Organismus erläutert. Empfindliche Organe werden dabei besonders hervorgehoben. Individuelle Risiken hängen von vielen Faktoren ab und können nicht vorhergesagt werden.

Die Gefahren ionisierender Strahlung werden zunächst anhand von wissenschaftlichen Studien und Veröffentlichungen aus dem medizinischen Bereich zusammengetragen. Die Folgen hoher Dosen ionisierender Strahlung sind gut erforscht. Für einige Erkrankungen, insbesondere nach geringen Strahlungsdosen, herrscht Uneinigkeit über einen Zusammenhang mit ionisierender Strahlung. Aus diesem Grund werden die Standpunkte der internationalen Organisationen in dieser Arbeit kritisch gegenübergestellt.

Abstract

Worldwide, nuclear fission is used to produce electricity. On the one hand, the low emission of CO₂ is often mentioned as an advantage of this technology. On the other hand, warnings about the dangers of nuclear fission are mentioned. Consequently, an overview about the dangers of ionizing radiation to human beings as well as animals and the environment is important. However, the focus will be on possible health effects for humans with regards to nuclear power plants.

In nuclear power plants, both natural types of radiation and artificially produced radiation occur. During normal operation, it is possible that small quantities of this ionizing radiation are released to the environment. In case of nuclear disasters or faults during decommissioning and dismantling processes the consequences of thereby emitted quantities can be even more severe. Reference nuclides vary by reactor type, operating stage and respective incident.

At the beginning, different types of radiation and their characteristics and effects on the affected organism are explained. Sensitive organs are emphasized in this context. The individual risk is determined by numerous factors and therefore cannot be predicted.

Based on scientific studies and medical publications the hazards of ionizing radiation are compiled. Effects of high exposure of ionizing radiation are well-investigated. Scientists are still divided over the connection between several diseases and the exposure to low doses of ionizing radiation. For this reason, the positions of different international organizations are critically contrasted in this study.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Kurzfassung | ii |
| Abstract | iii |
| Inhaltsverzeichnis | iv |
| Abbildungsverzeichnis | vi |
| Tabellenverzeichnis | vii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Hintergrund und Motivation | 1 |
| 1.2 Problemstellung und Zielsetzung | 3 |
| 2 Einführung in die Radioaktivität in Kernkraftwerken | 4 |
| 2.1 Definitionen und Begrifflichkeiten | 4 |
| 2.2 Funktionsweise der Kernspaltung | 6 |
| 2.3 Ionisierende Strahlung | 8 |
| 2.3.1 Natürliche und künstlich erzeugte Strahlungsarten | 8 |
| 2.3.2 α -Strahlung | 9 |
| 2.3.3 β^- -Strahlung | 10 |
| 2.3.4 β^+ -Strahlung | 11 |
| 2.3.5 γ -Strahlung | 12 |
| 2.3.6 Neutronenstrahlung..... | 12 |
| 2.4 Eigenschaften der Strahlungsarten | 13 |
| 3 Gefahren ionisierender Strahlung..... | 15 |
| 3.1 Stochastische und deterministische Strahlenwirkungen | 15 |
| 3.2 Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen | 17 |
| 3.2.1 Deterministische Strahlenschäden | 19 |
| 3.2.2 Stochastische somatische Strahlenschäden | 22 |
| 3.2.3 Genetische Strahlenschäden | 23 |
| 3.3 Spezielle Organtoxizität..... | 24 |
| 3.3.1 Keimdrüsen | 25 |
| 3.3.2 Knochenmark und Blutbild | 25 |
| 3.3.3 Magen-Darm-Trakt..... | 26 |
| 3.3.4 Lunge | 26 |
| 3.3.5 Haut und Haarbildung | 27 |
| 3.3.6 Augen | 27 |
| 3.3.7 Herz und Kreislauf..... | 28 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3.8 | Schwangerschaft..... | 28 |
| 3.4 | Wirkung ionisierender Strahlung auf Umwelt und Tiere..... | 29 |
| 3.5 | Eigenschaften spezieller Nuklide..... | 33 |
| 4 | Fazit | 35 |
| 4.1 | Zusammenfassung..... | 35 |
| 4.2 | Kritische Würdigung und Ausblick | 36 |
| | Literaturverzeichnis | 38 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Auftragung der Neutronen- gegen die Protonenzahl von nicht radioaktiven Atomkernen (Quelle: Mortimer und Müller, 2010, S. 641). | 8 |
| Abbildung 2: α -Zerfall (Quelle: Kiefer, 2012, S.13)..... | 10 |
| Abbildung 3: β^- -Zerfall (Quelle: Kiefer, 2012, S.13)..... | 11 |
| Abbildung 4: β^+ -Zerfall (Quelle: Kiefer, 2012, S.13)..... | 12 |
| Abbildung 5: Deterministische (oben) und Stochastische (unten) Wirkung ionisierender Strahlung (Quelle: Vogt und Schultz, 2011, S.82). | 16 |
| Abbildung 6: Reaktionskette von Wirkungen ionisierender Strahlung im Organismus (Quelle: Vogt und Schultz, 2011) | 17 |
| Abbildung 7: Belastungspfade des Menschen durch radioaktive Elemente im natürlichen Kreislauf (Quelle: Kröger und Chakraborty, 1989, S. 104) | 30 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Klinische Frühsymptome deterministischer Strahlenwirkungen beim Menschen nach kurzzeitiger Ganzkörperexposition mit durchdringender Strahlung in Abhängigkeit von der Energiedosis (in Anlehnung an Vogt und Schultz, 2011, S.83)..... | 21 |
| Tabelle 2: Gewebe-Gewichtungsfaktoren WT (Quelle: StrlSchV, Anlage VI, Teil C.2.) | 24 |

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Nach der Entdeckung der Kernspaltung im Jahr 1938 beschäftigten sich Wissenschaftler intensiv mit der Erforschung dieses Phänomens. Bereits im Jahr 1945 wurden die verheerenden Auswirkungen nuklearer Waffen durch die Atombombenabwürfe über Hiroshima und Nagasaki deutlich. 1953 stellte US-Präsident Eisenhower in seiner „Atoms for Peace“-Rede die friedliche Nutzung der Kernenergie in den Vordergrund. Daraufhin starteten in den 1950er und 1960er Jahren verschiedene Länder trotz der Gefahren voller Euphorie in das Zeitalter der Energieerzeugung durch Kernkraftwerke. Die Energieversorgung schien dadurch gesichert zu sein. (Neles, 2012, S. 1ff) Deutschland stieg im Jahr 1961 mit der Eröffnung des Versuchsatomkraftwerks in Kahl in die zivile Kernenergienutzung ein (Thierfeldt und Schartmann, 2009, Hintergrund). In den folgenden Jahrzehnten wurden viele Kernkraftwerke geplant und gebaut. Ein Ende des Aufschwungs war zunächst nicht in Sicht. Ziel der Länder war die vollständige Energieautarkie sowie der Besitz von atomaren Waffen. (Neles, 2012, S. 1ff)

Im Jahr 1979 sorgte der Reaktorunfall eines Kernkraftwerkes westlicher Bauart in Three Mile Island in Harrisburg (USA) auf internationaler Ebene für Aufsehen. Es war bis zu diesem Zeitpunkt der schwerste Unfall durch einen friedlichen Einsatz der Kernenergie. Durch diesen Vorfall wurde teilweise eine Kernschmelze ausgelöst und radioaktive Nuklide gelangten in die Umwelt. (Laufs, 2013, S. 123ff) Allmählich wuchs die Anti-Atomkraft-Bewegung und kritische Stimmen wurden lauter. Öffentlich gewordene Störfälle in deutschen Kernkraftwerken führten zu Diskussionen, wenn auch das Ausmaß nicht mit den anderen, hier aufgeführten Katastrophen vergleichbar ist (Radkau und Hahn, 2013, S. 335). Bei Helmut Kohls Amtsantritt dominierten in Deutschland überwiegend positive Haltungen gegenüber der Kernenergie die Politik. (Radkau und Hahn, 2013, S. 341ff)

Im Jahr 1983 konnten die Grünen mit einem Anti-Atomkraft-Wahlprogramm in den Bundestag einziehen. (Radkau und Hahn, 2013, S. 341ff) Das Unglück von Tschernobyl im Jahr 1986 führte in Deutschland aufgrund seines Ausmaßes und seiner Nähe zu Diskussionen und zur Verbesserung der Sicherheitsstandards in deutschen Kernkraftwerken (Laufs, 2013, S. 161). Im westlichen Deutschland sprach sich die SPD für einen Richtungswechsel aus. Die regierenden Parteien CDU/CSU und FDP

verharmlosten die Folgen des Reaktorunglücks und hielten an ihrer Politik fest. Eine sichtbare Wende in der deutschen Kernenergiepolitik wurde durch die 1998 gebildete Rot-Grüne Regierung eingeläutet. (Radkau und Hahn, 2013, S. 349ff) Der beschlossene Atomkonsens aus dem Jahre 2000 stellte die Grundlage für einen Kernenergieausstieg dar und mündete 2002 in einer Neuauflage des Atomgesetzes. Darin wurde die Laufzeit der Kernkraftwerke begrenzt und Neubauten nicht gestattet. Die Minderung der Gefahren, die von Kernkraftwerken ausgehen, stellte einen Hauptgrund für diese Vereinbarung dar. Ebenso sollten Diskussionen über die Entsorgung radioaktiver Abfälle angeregt werden. (Neles, 2012, S. 7f) Aufgrund der deutlichen Meinungsunterschiede innerhalb der großen Koalition konnten in der Legislaturperiode 2005-2009 keine Änderung des Atomgesetzes verzeichnet werden.

Vor allem in den USA und in Asien gab es einen neuen Aufschwung der Kernenergienutzung. Auch in Deutschland wurde während der zweiten Amtszeit von Angela Merkel der Betrieb der Kernkraftwerke unter einer Schwarz-Gelben Regierung wieder ausgeweitet. Obwohl die Kernenergie mittlerweile nur als „Brückentechnologie“ bezeichnet wurde und Deutschland im Bereich der erneuerbaren Energien massive Fortschritte aufwies, konnte die Kanzlerin dem Druck der Atom-Befürworter nicht standhalten. (Radkau und Hahn, 2013, S. 355ff)

Drei Monate nach Inkrafttreten des neuen Atomgesetzes ereignete sich am 11. März 2011 eine Katastrophe in dem Kernkraftwerk Fukushima. Dieser Vorfall zeigte auf, dass die Sicherheit von Kernkraftwerken nicht gewährleistet werden kann und dass sich ein solch gravierender Unfall auch in fortschrittlichen Industrienationen vollziehen kann. Im Gegensatz zu vielen anderen Ländern, führten die Ereignisse in Japan, der Schweiz, Belgien und allen voran in Deutschland zu Veränderungen in der Politik (Wolling und Arlt, 2014, S. 11). Übereinstimmend legten die Parteien am 30. Juni den Ausstieg fest. Das *Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)* schreibt in § 7 Abs. 1a ein Abschalten aller kerntechnischen Anlagen in Deutschland, die der Energieerzeugung dienen, bis zum Ende des Jahres 2022 vor. Deutschland kann bei der Stilllegung auf die Erfahrungen aus zahlreichen Rückbauprojekten zugreifen (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 15). Für eine Effizienzsteigerung bei der Durchführung von Stilllegungsprojekten und eine Verbesserung der Sicherheit wurden verschiedene, internationale Erfahrungsaustauschprogramme gegründet (Thierfeldt und Schartmann, 2009, S. 124ff). Sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene wird der Rückbau kerntechnischer Anlagen noch Jahrzehnte andauern. Deshalb sind Kenntnisse auf diesem Gebiet, im Speziellen zur Gefahrenbeurteilung, von großer Bedeutung.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Geschichte der zivilen Kernenergienutzung, die eng mit der jeweiligen Haltung der Regierung gegenüber der Atomkraft verknüpft ist, wurde von vielfältigen Meinungen geprägt. Diese unterscheiden sich insbesondere in der Gefahrenbeurteilung in Bezug auf Kernkraftwerke. Unterschiede werden dabei sowohl auf internationaler Ebene als auch innerhalb eines Landes deutlich. Politiker, Inhaber einflussreicher Ämter sowie internationale Organisationen verfolgen unterschiedliche Interessen und veröffentlichen demnach verschiedene Berichte. Die Vertuschung einzelner Vorfälle und eine Verharmlosung der Folgen verhindern eine lückenlose Aufklärung der Gesellschaft. Es stellt sich die Frage, wodurch das Gefahrenpotenzial kerntechnischer Anlagen begründet ist.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, die ausgelösten Mechanismen im Organismus nach einer Bestrahlung vorzustellen und die gesundheitlichen Folgen durch radioaktive Nuklide und ionisierende Strahlung aufzudecken. Hierzu wurden Berichte internationaler Organisationen, wissenschaftliche Studien sowie Veröffentlichungen aus dem medizinischen Bereich ausgewertet. Daraus wurden Gefahren ionisierender Strahlung für Menschen, Tiere und Umwelt abgeleitet.

Radioaktive Nuklide und ionisierende Strahlung stellen Gefahrenquellen in verschiedenen kerntechnischen Anlagen des Brennstoffkreislaufes dar, die in § 2 Abs. 3a AtG definiert werden. Vor allem Vorfälle in Kernkraftwerken führten zu Debatten über die nukleare Sicherheit und zu Änderungen in der Politik. Deswegen und aufgrund der Aktualität von Stilllegungsprojekten werden die Gefahren ionisierender Strahlung anhand von Kernkraftwerken untersucht. Erkenntnisse lassen sich nach einer kritischen Beurteilung möglicherweise in gewissem Umfang auf andere kerntechnische Anlagen übertragen.

2 Einführung in die Radioaktivität in Kernkraftwerken

2.1 Definitionen und Begrifflichkeiten

Instabile Atome streben nach einem stabilen Zustand. Um diesen zu erreichen, wandeln sie sich in Atome anderer Elemente um oder gehen in einen günstigeren Energiezustand über. Dabei senden sie Strahlung aus. (Vogt und Schultz, 2011, S. 11) Diese Atome werden als *radioaktive Nuklide* bezeichnet, ihr Verhalten als *Radioaktivität* und die Emissionen eines radioaktiven Zerfalls als *ionisierende Strahlung*. Es existieren verschiedene Strahlungsarten, die in Kapitel 2.3 erläutert werden.

Die *Halbwertszeit* gibt den Zeitraum an, nach dem noch die Hälfte der Ausgangsmenge des beobachteten, radioaktiven Nuklids vorhanden ist (Kiefer, 2012, S. 11). Die andere Hälfte ist entweder in ein weiteres radioaktives Nuklid oder in ein stabiles Atom zerfallen. Die Zerfallsvorgänge folgen einem stochastischen Prinzip. Das bedeutet, dass für ein spezielles Nuklid nicht vorhergesagt werden kann, wann es zerfällt. Es kann lediglich eine Wahrscheinlichkeit über die Zerfallsvorgänge einer großen Menge radioaktiver Nuklide aufgestellt werden. Die Halbwertszeit kann für jedes Isotop ermittelt werden. Es existieren Isotope mit Halbwertszeiten, die kleiner als eine Sekunde sind. Ebenso kann diese spezifische Größe im Bereich von Tagen, Jahren, Jahrzehnten und sogar Milliarden von Jahren liegen. (Kiefer, 2012, S. 11)

Als Kernprozesse werden die spontanen Vorgänge in Atomkernen bezeichnet, die für das Aussenden ionisierender Strahlung verantwortlich sind. Zur Messung dieser Kernprozesse in den Strahlungsquellen dient die *Aktivität*. Um sie zu ermitteln, muss die durchschnittliche Anzahl dieser Vorgänge durch die Zeit geteilt werden: 1 Bq (Becquerel) = 1 Kernprozess pro Sekunde. (Vogt und Schultz, 2011, S. 11)

Trifft Strahlung auf Materie, insbesondere auf Organe und Gewebe des Menschen, kommt es zu Wechselwirkungen. Als *Dosis* wird die absorbierte Energiemenge geteilt durch die Masse des Elements bezeichnet: 1 Gy = 1 J/kg. Ihre Einheit ist Gray (Gy). (Kiefer, 2012, S. 201f). Die Begriffe Energiedosis und Dosis sind in dieser Arbeit gleichbedeutend.

Die unterschiedliche, relative biologische Wirksamkeit der Strahlenarten berücksichtigt die *Äquivalentdosis* (Hagen, 1994, S. 630f). Je höher der lineare Energietransfer (LET),

desto größer die biologische Wirksamkeit. Der *lineare Energietransfer* gibt die Ionisationsdichte der Strahlungsart längs der Teilchenbahn an (Hauptmanns et al., 1987, S.61). Um die Äquivalentdosis zu erhalten, wird die Energiedosis mit einem spezifischen Faktor multipliziert. Dieser Wert ist für γ -Strahlen 1, für Neutronenstrahlung 10 und für α -Strahlen 20. Die Einheit ist Sievert (Sv). Auf diese Weise können Wirkungen vergleichbar gemacht werden. (Hagen, 1994, S. 630f) Demnach besitzen α -Teilchen einen hohen linearen Energietransfer, während β - und γ -Strahlen den locker ionisierenden Strahlungsarten zugeordnet werden (Hauptmanns et al., 1987, S. 61f).

Um die *effektive Äquivalentdosis* zu erhalten, müssen Gewichtungsfaktoren berücksichtigt werden. Diese Faktoren beziehen die Strahlenempfindlichkeit der verschiedenen Organe mit ein und sind in Kapitel 3.3 tabellarisch festgehalten. Die Einheit wird ebenfalls in Sievert angegeben. Um das Gesamtrisiko der betroffenen Person zu ermitteln, müssen die Organdosen unter Berücksichtigung ihrer unterschiedlichen Empfindlichkeit aufsummiert werden. (Hagen, 1994, S. 630f)

Die absorbierte Dosis eignet sich für deterministische Effekte mit einem Dosis-Schwellenwert. Für stochastische Effekte bieten sich hingegen die Äquivalentdosis sowie die effektive Dosis an. (WHO, 2013, S. 37) Diese Effekte werden in Kapitel 3.1 erläutert. Eine konsequente Unterscheidung wird in verbreiteter Literatur nicht eingehalten, wodurch die Grundlage für einen Vergleich genommen wird.

Durch Wechselwirkungsvorgänge mit radioaktiven Nukliden können Anlagenteile selbst zu einer Strahlungsquelle werden. Dieser Vorgang wird als *Aktivierung* bezeichnet. Materie, die durch Neutronenbeschuss aktiviert wurde, stellt bei der Stilllegung eines Kernkraftwerkes radioaktiven Abfall dar (Thierfeldt, 1993, S. 62). Kontamination findet durch Kontakt mit aktivierter Materie an der Oberfläche statt und kann durch Dekontaminationsmaßnahmen entfernt werden. Gereinigte Abfälle können leichter entsorgt werden. (Thierfeldt, 1993, S. 62)

Chemische und physikalische Grundkenntnisse sind Voraussetzung für das Verständnis der Arbeit. Zielführende Aspekte werden an geeigneter Stelle kurz erläutert. In einigen Fällen wird auf Nachschlagewerke verwiesen, in denen Details der Thematik aufgeführt sind. Der Aufbau eines Kernkraftwerkes sowie spezifische Unterschiede der Reaktortypen werden im Folgenden nicht erklärt. Für eine Einführung in dieses Themengebiet kann Laufs (2013, S. 13ff) herangezogen werden.

2.2 Funktionsweise der Kernspaltung

Die Kernspaltung wurde im Jahr 1938 von Otto Hahn und Fritz Straßmann unter Beihilfe von Lise Meitner zufällig entdeckt. Der Versuch sollte eigentlich dazu dienen Transurane herzustellen, jedoch wurden die schweren Urankerne durch Neutronenbeschuss gespalten. (Krieger, 2013, S. 320) Nach dieser Entdeckung beschäftigten sich einige bekannte Wissenschaftler mit dem Phänomen der Kernspaltung, den Spaltprodukten und ihren Gefahren aufgrund ionisierender Strahlung (Laufs, 2013, S. 25ff).

Es gibt verschiedene Herangehensweisen für eine Kernspaltung. Neben Uran- und Plutoniumnukliden existieren weitere schwere Atomkerne, welche gespalten werden können. Da mit ^{239}Pu und ^{235}U ¹ ein kostengünstiger Betrieb möglich ist, werden sie bei thermischen Reaktoren², die der Energieerzeugung dienen, üblicherweise eingesetzt (Krieger, 2013, S. 332). Laufs (2013) führt ebenfalls Uran- und Plutonium-Isotope als Brennstoff in Kernkraftwerken an (Laufs, 2013, S. 14). Einige Atomkerne lassen sich nur durch schnelle Neutronen spalten, andere nur durch langsame (Mortimer und Müller, 2010, S. 659). Charakteristisch für diese Eigenschaft ist die gerade bzw. ungerade Anzahl an Neutronen im Atomkern. Damit es zu einer Spaltung kommt, muss eine gewisse Energieschwelle überschritten werden. Bei einer ungeraden Neutronenanzahl liegt ein ungepaartes Neutron vor. Wird der Atomkern mit Neutronen beschossen, so kommt es zu einer Paarung mit dem ungepaarten Neutron. Die freigesetzte Bindungsenergie übersteigt die für eine Spaltung erforderliche Energie. Ein Moderator im Reaktorkern sorgt dafür, dass die Geschwindigkeit der Neutronen bis auf ein thermisches Energieniveau reduziert wird. Dadurch lässt sich die Spaltrate optimieren. Schnelle Neutronen kommen bei einer Spaltung mit einer geraden Neutronenanzahl zum Einsatz. Hierbei fehlt der Bindungsenergieanteil. Die benötigte Energie muss einzig durch die Bewegung der Neutronen bereitgestellt werden. (Krieger, 2013, S. 324)

^{239}Pu und ^{235}U , die bei der Kernspaltung mit thermischen Neutronen eingesetzt werden, da sie eine ungerade Anzahl an Neutronen besitzen, müssen zuvor künstlich erzeugt werden (Pu) bzw. aufgrund ihres geringen Vorkommens in der Natur für einen Einsatz in Kernreaktoren zunächst angereichert werden (U) (Krieger, 2013, S. 321). Krieger (2013) setzt den ^{235}U -Anteil in Leistungsreaktoren, die der Energiegewinnung dienen,

¹ Die hochgestellte Zahl wird als Massezahl bezeichnet. Sie gibt die Anzahl der Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Atomkern an.

² Dazu zählen u.a. der Siedewasserreaktor und der Druckwasserreaktor (Krieger, 2013, S. 333).

zwischen 2-3,5 % fest³ (Krieger, 2013, S. 322). Als Vergleich hierzu liegt die Konzentration des ²³⁵U in Forschungsreaktoren zwischen 20-90 % und bei Atomwaffeneinsätzen sogar bei 95 % (Krieger, 2013, S. 322).

Krieger (2013) merkt an, „dass Kernspaltung auch durch Beschuss mit hochenergetischen Photonen und geladenen Teilchen wie Protonen, Deuteronen und Alphateilchen ausgelöst werden kann“ (Krieger, 2013, S. 320). Jedoch ist die erforderliche Energie hierfür sehr hoch und üblicherweise werden Neutronen bei der Kernspaltung in Kernkraftwerken verwendet. Aufgrund ihrer Ladungsneutralität erfahren sie keine Abstoßung von den Nukliden und sind deshalb für die Atomspaltung geeigneter (Mortimer und Müller, 2010, S. 656).

Die Kernspaltung, die bei Atomen mit einer höheren Massezahl als 230 natürlich und ohne äußere Einwirkungen auftritt, wird als *spontane Kernspaltung* bezeichnet. Hierbei entstehen aus einem schweren Kern zwei leichte Kerne und Neutronen. Dieser Prozess setzt Energie frei, da es durch die Spaltung zu einer Reduktion der Masse kommt. Aus Einsteins Formel $E = m \cdot c^2$ lässt sich folgern, dass der Wert der abgegebenen Energie sehr groß sein muss (etwa 200MeV). (Mortimer und Müller, 2010, S. 645) Bei einer neutroneninduzierten Kernspaltung, die zur Energiegewinnung in Leistungsreaktoren eingesetzt wird, geschieht dies nicht automatisch, sondern wird durch den Menschen künstlich veranlasst.

Um den laufenden Betrieb eines Kernkraftwerks zu gewährleisten, muss der „kritische“ Zustand erreicht werden. Das bedeutet, dass durch eine Kernspaltung Neutronen emittiert werden, von denen im Durchschnitt nur ein einziges in der Lage ist, Atomkerne zu spalten. Weitere ausgesendete Neutronen können von Regelstäben eingefangen werden oder den Reaktor verlassen. Regelstäbe sollen das Erreichen eines „überkritischen“ Zustands verhindern, der durch eine exponentiell steigende Anzahl an Spaltvorgängen gekennzeichnet ist. Beim Abschalten eines Kernkraftwerks wird Reaktorkern in einen „unterkritischen“ Zustand versetzt. Die Spaltrate nimmt solange ab, bis es zu keiner Kernspaltung mehr kommt. (Krieger, 2013, S. 331) Die durchschnittliche Anzahl emittierter Neutronen ist demnach kleiner als 1 (Mortimer und Müller, 2010, S. 659f).

Durch Spaltvorgänge entsteht bei der Kernspaltung in Kernkraftwerken ionisierende Strahlung, die in Kapitel 2.3 genauer analysiert wird.

³ Dieser Wert wird von Laufs (2013) zwischen 1,9-4,8 % (S. 15) und von Mortimer und Müller (2010) zwischen 3-5 % eingegrenzt (S. 659).

2.3 Ionisierende Strahlung

Mensch und Umwelt sind sowohl natürlicher als auch zivilisatorischer Strahlung ausgesetzt (Herrmann et al., 2006, S. 139f). Zu den zivilisatorischen Strahlenquellen zählt u.a. die ionisierende Strahlung, die bei der Kernspaltung in Kernkraftwerken entsteht. Dieses Kapitel befasst sich sowohl mit der Entstehung natürlicher als auch künstlich erzeugter Strahlungsarten, die von radioaktiven Nukliden emittiert werden. Des Weiteren wird auch auf ihre Eigenschaften eingegangen, die für die vorliegende Arbeit relevant sind.

2.3.1 NATÜRLICHE UND KÜNSTLICH ERZEUGTE STRAHLUNGSARTEN

Nuklide sind stabil und damit nicht radioaktiv, wenn sie sich in der sog. „Stabilitätszone“ befinden, die durch die roten Punkte in Abbildung 1 dargestellt wird. Diese Abbildung gibt das Verhältnis zwischen der Protonen- und Neutronenanzahl in einem Atomkern an, welcher nicht radioaktiv ist. Bei leichten Kernen führt ein ausgeglichenes Verhältnis zu einer stabilen Konfiguration. Die Abstoßungskraft zwischen den positiv geladenen Protonen ist bei schweren Kernen aufgrund der gestiegenen Anzahl höher. Um diese Kraft auszugleichen und das Atom zu stabilisieren, ist eine höhere Anzahl an Neutronen notwendig. Dadurch erhöht sich die zusammenhaltende Kraft zwischen den Nukleonen, die die Abstoßungskraft ausgleichen soll. Bei einer geringeren Anzahl an erforderlichen Neutronen sowie bei einer höheren ist der Kern instabil. (Mortimer und Müller, 2010, S. 639ff).

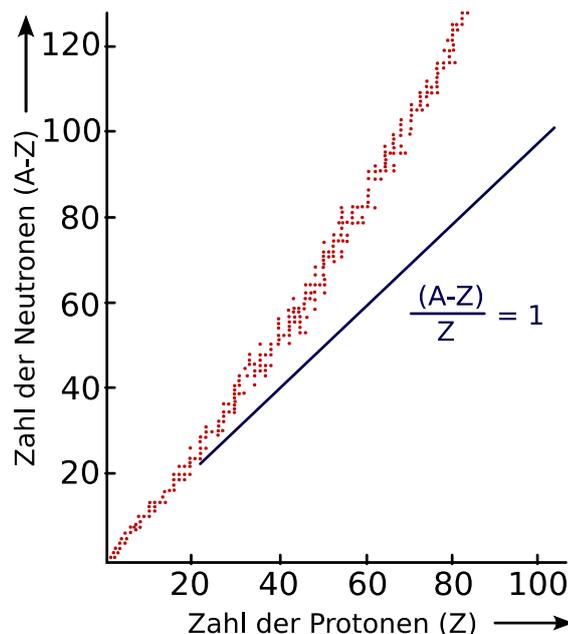


Abbildung 1: Auftragung der Neutronen- gegen die Protonenzahl von nicht radioaktiven Atomkernen (Quelle: Mortimer und Müller, 2010, S. 641).

Eine hohe Anzahl an Protonen im Kern fördert demnach die Instabilität eines Elements (Kiefer, 2012, S. 11). Alle Elemente deren Ordnungszahl größer als 83 ist, sind instabil und deswegen radioaktiv (Schröder und Schröder, 2015, S. 10). Eindeutig nachgewiesen wurde, dass ^{209}Bi (Bismut) mit einer Ordnungszahl von 83 der größte, stabile Atomkern ist. Alle Atome mit einer höheren Ordnungszahl zerfallen aufgrund ihrer Instabilität ohne äußere Einwirkungen. Ein natürlicher, radioaktiver Zerfall tritt auf, da die instabilen Kerne bestrebt sind, einen stabilen Zustand zu erreichen. (Mortimer und Müller, 2010, S. 639ff) Befindet sich ein Atomkern nicht in einem Zustand geringster potenzieller Energie, sondern besitzt überschüssige Energie, so ist er radioaktiv (Schröder und Schröder, 2015, S. 8). Er wandelt sich unter Abgabe von Strahlung und Energie in ein Atom eines anderen Elements um. (Mortimer und Müller, 2010, S. 639ff)

Instabile Atomkerne können mit ihren spezifischen Eigenschaften bereits in der Natur vorkommen oder künstlich erzeugt werden. Natürliche, radioaktive Nuklide lassen sich je nach Zerfallsart in α -, β - und γ -Strahlung unterscheiden. (Mortimer und Müller, 2010, S. 643) Die verschiedenen Arten des radioaktiven Zerfalls werden an dieser Stelle erklärt und illustrativ veranschaulicht. Zusätzlich wird auf die Neutronenstrahlung und die β^+ -Strahlung eingegangen, die durch Kernspaltung durch Neutronenbeschuss künstlich erzeugt werden (Mortimer und Müller, 2010, S. 643ff). Da in den folgenden Kapiteln die Gefahren ionisierender Strahlung allgemein untersucht wird, werden die natürlichen und künstlich erzeugten Strahlungsarten an dieser Stelle nicht separat aufgeführt.

2.3.2 α -STRAHLUNG

Bei einem α -Zerfall werden sogenannte α -Teilchen, auf die eine hohe kinetische Energie wirkt, aus dem Atomkern entfernt. Diese Teilchen sind ähnlich aufgebaut wie Heliumkerne und werden als α -Strahlung bezeichnet. Sie bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen, besitzen jedoch keine Elektronen in der Atomhülle und sind zweifach positiv geladen (vgl. Abbildung 2). Bei einem α -Zerfall wird das Ausgangselement in ein anderes Element umgewandelt. Dabei verringert sich die Massezahl des Atoms um den Wert 4 und die Kernladungszahl um den Wert 2. Es bleibt entweder ein Kern in einem energetischen Grundzustand oder in einem angeregten Zustand zurück. Sofern der Kern sein gewünschtes Energieniveau noch nicht erreicht hat, gibt er durch γ -Strahlung Energie ab. (Mortimer und Müller, 2010, S. 643f)

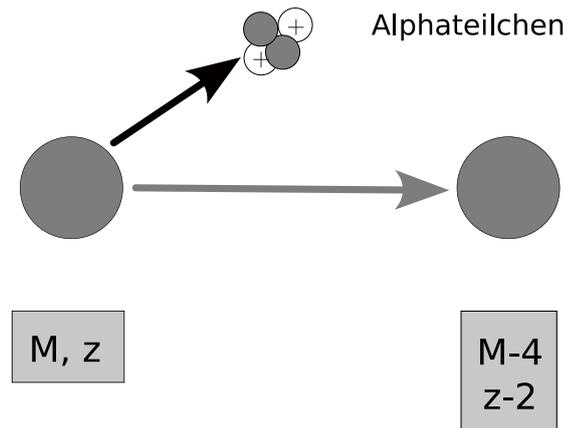


Abbildung 2: α -Zerfall (Quelle: Kiefer, 2012, S.13).

Da ein solcher Zerfall mit einer hohen Reduktion der Neutronen- und Protonenzahl einhergeht, tritt er nur bei sog. schweren Kernen auf (Kiefer, 2012, S. 11). Diese Kerne besitzen eine Massezahl größer als 200 (Vogt und Schultz, 2011, S. 12). Atomkerne mit einer Massezahl größer als 209 und einer Ordnungszahl größer als 82 wurden im vorhergehenden Abschnitt als instabil identifiziert (Mortimer und Müller, 2010, S. 641).

2.3.3 β^- -STRAHLUNG

Bei dem Betazerfall muss zwischen dem β^+ -Zerfall und dem natürlich auftretendem β^- -Zerfall unterschieden werden. Mortimer und Müller (2010) verdeutlichen, dass ein β^- -Zerfall auftritt, wenn die Menge der Neutronen im Atomkern die erforderliche Anzahl zur Stabilisierung des Kerns übersteigen. Diese Zusammensetzung befindet sich links oberhalb der Stabilitätszone, die in Abbildung 1 veranschaulicht wird. Die emittierte β^- -Strahlung existiert sowohl bei natürlichen als auch bei künstlich erzeugten Atomkernen. Um dieses Missverhältnis auszugleichen, wandelt sich ein Neutron in ein Proton um (vgl. Abbildung 3). Die positive Ladung entsteht durch die Emission eines Elektrons, welches für den Energietransport zuständig ist. (Mortimer und Müller, 2010, S. 644) Kiefer (2012) weist darauf hin, dass dieses Elektron aus dem Atomkern und nicht aus der Hülle stammt. Zusätzlich zur Elektronenstrahlung wird ein sog. Antineutrino ausgesandt. (Kiefer, 2012, S. 12) Durch die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, erhöht sich die Anzahl der Protonen und damit die zugehörige Ordnungszahl. Die Massezahl bleibt bei dieser Zerfallsart gleich. Nach diesem Vorgang ist der energetisch günstigste Zustand nicht in jedem Fall erreicht. Die überschüssige Energie wird durch γ -Strahlung abgegeben. (Schröder und Schröder, 2015, S. 9)

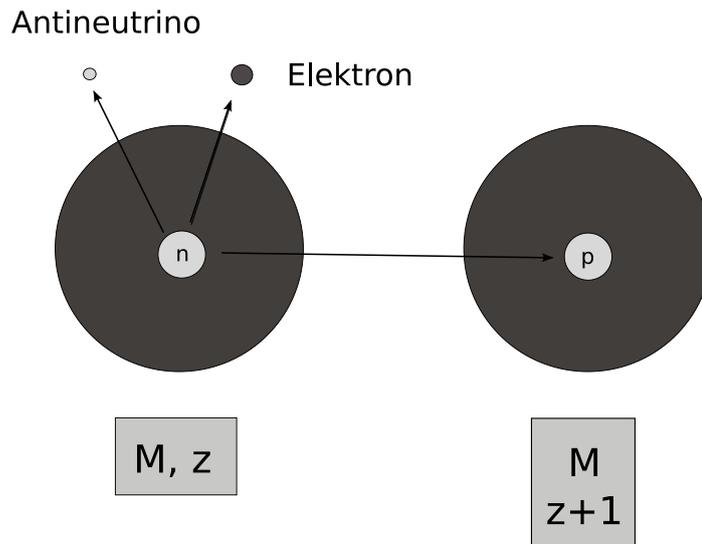


Abbildung 3: β^- -Zerfall (Quelle: Kiefer, 2012, S.13).

2.3.4 β^+ -STRAHLUNG

Der β^+ -Zerfall basiert auf umgekehrter Logik wie der β^- -Zerfall. Das Missverhältnis entsteht durch eine künstlich erzeugte, erhöhte Anzahl an Protonen im Verhältnis zu Neutronen. Natürlicherweise tritt diese Strahlungsart nicht auf. Die Zusammensetzung der Nukleonen befindet sich rechts von der Zone stabiler Atomkerne. Für eine Annäherung an einen stabileren Zustand wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt (vgl. Abbildung 4). Um ein ungeladenes Neutron zu erhalten, wird der positive Ladungsüberschuss des Protons in Form eines Positrons emittiert. Dieses Teilchen ist mit dem Elektron des β^- -Zerfalls vergleichbar und besitzt dieselbe Masse. (Mortimer und Müller, 2010, S. 645) Wie oben bereits erwähnt, wird ein weiteres Teilchen emittiert. In diesem Fall das sogenannte Neutrino. Hierbei bleibt die Massezahl gleich und die Ordnungszahl verringert sich um den Wert 1. (Kiefer, 2012, S. 12f)

Das Missverhältnis kann ebenfalls durch den Einfang eines Elektrons von dem Atomkern ausgeglichen werden. Auf diese Weise wandelt sich ein Proton in ein Neutron um und das Nuklid geht in einen stabileren Zustand über. Dabei wird ein Neutrino sowie Röntgenstrahlung emittiert. (Mortimer und Müller, 2010, S. 645)

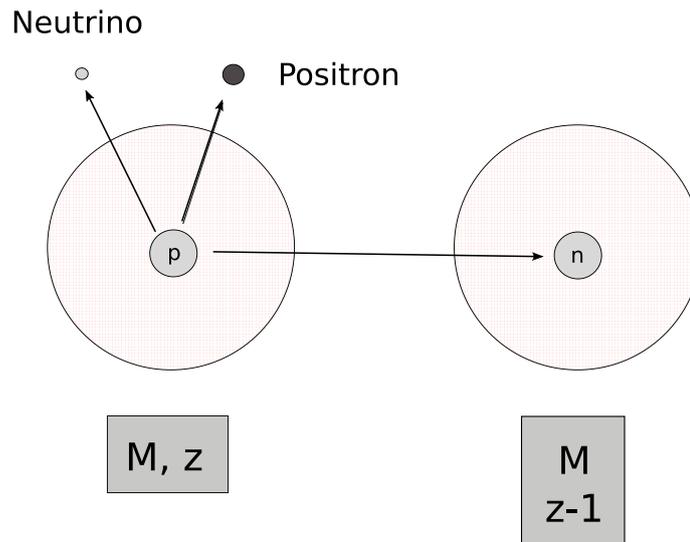


Abbildung 4: β^+ -Zerfall (Quelle: Kiefer, 2012, S.13).

2.3.5 γ -STRAHLUNG

Mortimer und Müller (2010) beschreiben γ -Strahlung als „elektromagnetische Strahlung mit sehr kleiner Wellenlänge“ (Mortimer und Müller, 2010, S. 644). Während Energie bei den oben beschriebenen α - und β -Zerfällen als Teilchenstrom abgegeben wird, erfolgt die Abgabe bei γ -Zerfällen über elektromagnetische Wellen. Diese Strahlungsart tritt häufig bei β -Strahlern und leichten Kernen auf (Kiefer, 2012, S. 16). Nach einem Zerfall verbleibt der Kern möglicherweise zunächst in einem angeregten Zustand. Das ist der Fall, wenn die Summe der kinetischen Energie geringer als die Zerfallsenergie ist (Mortimer und Müller, 2010, S. 644). Bei dieser Strahlungsart werden Photonen ausgesandt, um in einen Zustand geringerer Energie zu gelangen. Dies hat keinen Einfluss auf die Ordnungs- bzw. Massezahl des Atoms. (Schröder und Schröder, 2015, S. 9).

2.3.6 NEUTRONENSTRAHLUNG

Neutronen wirken lediglich auf den Atomkern ein. Je nach Beschaffenheit des Atoms und Geschwindigkeit des Neutrons können unterschiedliche Prozesse beobachtet werden. Bei einer elastischen Streuung gibt der getroffene Atomkern seine Energie durch Ionisierung oder Anregung anderer Atome ab. Ein durch unelastische Streuung und Neutronenabsorption angeregtes Nuklid gibt die überschüssige Energie durch γ -Strahlung ab. Die Spaltung oder Zersplitterung von Atomkernen kann bei schweren Atomen auftreten. Hierbei entstehen radioaktive Nuklide. Neutronen werden für die Kernspaltung in Kernkraftwerken eingesetzt. Die hohen, frei gesetzten Energieanteile werden in Wärme umgewandelt. Vogt und Schultz (2011) befassen sich mit einer genaueren Beschreibung der einzelnen Vorgänge. (Vogt und Schultz, 2011, S. 49ff)

2.4 Eigenschaften der Strahlungsarten

Die Gefahr von Strahlung hängt vor allem mit ihrer Fähigkeit zusammen, von außen in den menschlichen Körper einzudringen. γ -Strahlen besitzen bei einer äußeren Bestrahlung aufgrund ihrer Eindringtiefe die höchste Schadenswirkung im Vergleich zu α - und β -Strahlung (Mortimer und Müller, 2010, S. 650f). Geladene Teilchen dringen nur bis zu einer bestimmten Tiefe in Materie ein, die von der Strahlungsart und der Beschaffenheit des Materials abhängt. β -Strahlen schaffen meist gerade einmal wenige Zentimeter des Gewebes zu durchdringen und das Schützen vor α -Strahlung gelingt bereits durch Kleidung oder ein Blatt Papier. Für die Strahlung elektromagnetischer Wellen lässt sich kein Maß angeben. Sie dringt in Materie nicht bis zu einer bestimmten Tiefe ein, sondern wird zunehmend schwächer. Ähnlich verhält sich die Neutronenstrahlung. (Kiefer, 2012, S. 31)

Entscheidend bei der Gefahrenabschätzung ist zudem der Abstand von der Strahlungsquelle, denn α - und β -Strahlen werden von der Luft absorbiert. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, führen Mortimer und Müller (2010) an, dass α -Strahlen Luft zwischen 2,5 cm und 9 cm durchdringen können, β -Strahlen bis zu 8,5 m. Im Gegensatz dazu beeinflusst das Medium Luft die elektromagnetischen Wellen der γ -Strahlung kaum. (Mortimer und Müller, 2010, S. 651) Dringt ionisierende Strahlung durch die Atmung oder Nahrungszufuhr in den Körper ein, ist der Schutz durch die Absorptionsfähigkeit der Luft nicht vorhanden. Die Strahlung wirkt direkt auf Zellgewebe ein und kann erhebliche Schäden verursachen. In diesem Fall ist α -Strahlung am gefährlichsten (Mortimer und Müller, 2010, S. 651).

Die Strahlungsarten haben auf getroffene Atome und Moleküle unterschiedliche Wirkungen. Die Wirkung von Photonenstrahlen und geladenen Teilchen ist in den meisten Fällen die Ionisation von Atomen durch das Entfernen von Elektronen aus der Atomhülle. Neben der Ionisation kann Energie ebenfalls durch Anregung anderer Atome und Moleküle abgegeben werden. In Folge dessen kommt es zur Bildung schädigender Radikale. (Schneider und Burkart, 1998) Bei direkt ionisierender Strahlung wird Energie abgegeben, indem Elektronen aus der Atomhülle des getroffenen Atoms entfernt werden. Hierzu gehören die Strahlungsarten mit Elektronen, Protonen, Deuteronen⁴ und α -Teilchen. Neutronen- und Photonenstrahlen hingegen geben ihre Energie an geladene Teilchen ab, welche wiederum für die Ionisation anderer Atome verantwortlich sind. Deshalb wird dieser Prozess indirekt ionisierende Strahlung genannt. (Vogt und Schultz, 2011, S. 44ff) Aufgrund der

⁴ Als Deuteron wird der Kern eines Wasserstoffisotopes bezeichnet, der aus einem Proton und einem Neutron besteht (Volkmer, 2013, S. 11).

Ionisationsfähigkeit verdeutlicht Kiefer (2012), dass sich Strahlung durch steigende Dichte und Dicke der Materie sowie durch eine höhere Ordnungszahl der wechselwirkenden Atome schneller schwächen lässt. Zur Schwächung der Neutronenstrahlung bieten sich ähnlich schwere Protonen an. Deshalb eignet sich das Medium Wasser wegen der Wasserstoffkerne sowie Material aus Kunststoff. (Kiefer, 2012, S. 32f)

Da der Wasseranteil in Zellen sehr hoch ist, können im Organismus weitere Wirkungen ionisierender Strahlung beobachtet werden. Neben der Ionisation unter Bildung eines positiv geladenen Wasserions können durch homolytische Spaltung reaktionsfreudige Radikale entstehen (Kiefer, 2012, S. 34). Diese verursachen Schäden an anderen Zellen, die nicht direkt durch die Strahlung getroffen wurden (Vogt und Schultz, 2011, S.80).

Das Gefahrenpotenzial ionisierender Strahlung für den Menschen hängt von vielen Faktoren ab. Je nachdem, ob die Strahlung den Körper von außen trifft oder innerhalb des Körpers wirkt, sind verschiedenen Strahlungsarten gefährlicher als andere. Entscheidend sind zudem die Energie der Strahlung, die Bestrahlungsdauer, ihre biologische Wirkung und die Empfindlichkeit des getroffenen Organs. Welche Gefahren ionisierende Strahlung und bestimmte Nuklide für Mensch und Umwelt darstellen, wird in Kapitel 3 genauer analysiert.

3 Gefahren ionisierender Strahlung

Der Betrieb von Kernkraftwerken sowie der anschließende Rückbau sind mit dem Risiko verbunden, dass radioaktive Stoffe in die Umwelt gelangen. Mitarbeiter der kerntechnischen Anlage sowie die allgemeine Bevölkerung können von den Gefahren ionisierender Strahlung betroffen sein. Nachdem in Kapitel 2 aufgezeigt wurde, wie ionisierende Strahlung entstehen kann und welche Strahlungsarten es gibt, befasst sich dieses Kapitel mit der Zusammenfassung der negativen Auswirkungen durch ionisierende Strahlung. Eine lückenlose Untersuchung der Gefahren kann nicht gewährleistet werden. Die wichtigsten Aspekte werden jedoch hervorgehoben und erklärt.

3.1 Stochastische und deterministische Strahlenwirkungen

Strahlungseffekte werden je nach Beziehung zwischen Dosis und Wirkung in *stochastische* und *deterministische* unterschieden (Herrmann et al., 2006, S. 141f).

Charakteristisch für einen deterministischen Effekt ist die Schwellendosis, die überschritten werden muss, damit eine Wirkung eintritt (vgl. oberes Schaubild in Abbildung 5). Oberhalb der Schwellendosis steigt das Ausmaß der Bestrahlung mit zunehmender Dosis, die auf den Organismus einwirkt. Die Schwellendosis ist variabel und von dem Individuum und seiner Empfindlichkeit abhängig. (Vogt und Schultz, 2011, S. 81ff) Für eine kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung liegt der Schwellenbereich zwischen 0,1 Gy und 1 Gy (SSK, 2006, S. 7). Rodemann (2000) führt als Beispiel einer deterministischen Abhängigkeit Hautveränderungen durch ionisierende Strahlung an (Rodemann, 2000, S. 29).

Bei einer stochastischen Wirkung liegt keine Schwellendosis vor (vgl. unteres Schaubild in Abbildung 5). Bereits eine geringe Menge ionisierender Strahlung kann Schäden verursachen. Mit steigender Dosis nimmt nicht das Ausmaß des Schadens zu, sondern die Wahrscheinlichkeit, dass die Strahlung Schäden verursacht. (Herrmann et al., 2006, S. 142) Bestrahlungen mit geringen Dosen innerhalb einer langen Zeitspanne entsprechen dieser Dosis-Risiko- Beziehung (Rodemann, 2000, S. 27). Dadurch ausgelöste Mutationen und Krebserkrankungen basieren auf dem Zufallsprinzip (Kauffmann et al., 2013, S. 41). Ob zwischen Dosis und Wirkung bei stochastischen Effekten eine lineare Beziehung ohne Schwellendosis vorliegt, konnte

bisher werden bewiesen noch widerlegt werden. Experimente, die eine eindeutige Schlussfolgerung zulassen, sind aufgrund der Existenz natürlicher Strahlungsquellen nicht durchführbar. Eine mögliche positive Wirkung geringer Strahlenexpositionen für den Menschen ist bisher ungeklärt (Vogt und Schultz, 2011, S. 81). Rodemann (2000) bezeichnet dies als Hormesis-Effekt (Rodemann, 2000, S. 29). Die Vermutung, dass ionisierende Strahlung geringer Dosis die Zellfunktionen positiv beeinflussen können, wird ebenfalls bei Kauffmann et al. (2013) angeführt (Kauffmann et al., 2013, S. 41).

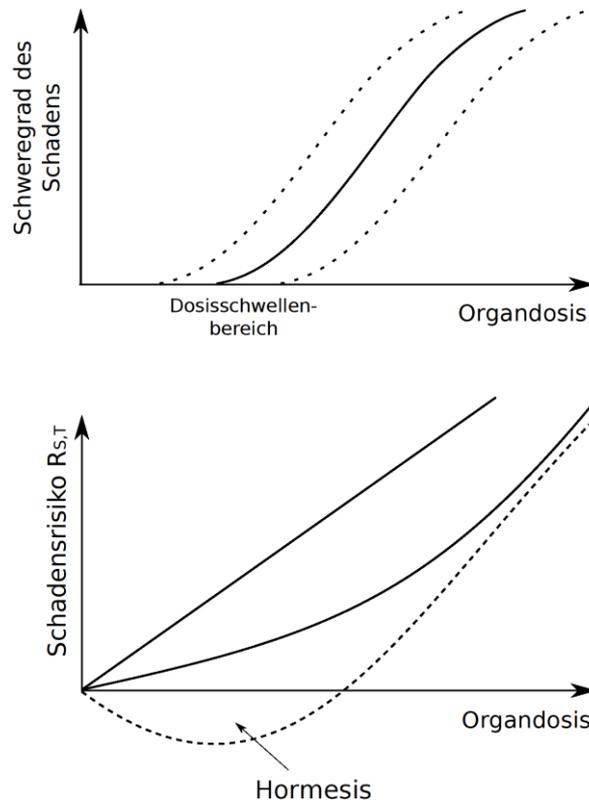


Abbildung 5: Deterministische (oben) und Stochastische (unten) Wirkung ionisierender Strahlung (Quelle: Vogt und Schultz, 2011, S.82).

Die gefundenen Abbildungen dieser Beziehungen in entsprechender Literatur unterscheiden sich nur geringfügig. Dennoch bietet sich die oben aufgeführte Darstellung aufgrund von Feinheiten an. Es ist erkennbar, dass der Dosis-Schwelldbereich variabel ist. Zudem wird der Hormesis-Effekt aufgeführt, sowie eine mögliche nicht lineare Abhängigkeit zwischen Dosis und Risiko bei der stochastischen Strahlenwirkung. Eine linear-quadratische Abhängigkeit wird beispielsweise für eine Leukämie-Erkrankung angenommen (National Research Council of the National Academies, 2006, S. 6).

3.2 Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen

Eine gute Übersicht über die Wirkungsweise, Effekte und Folgen von ionisierender Strahlung bietet Abbildung 6.

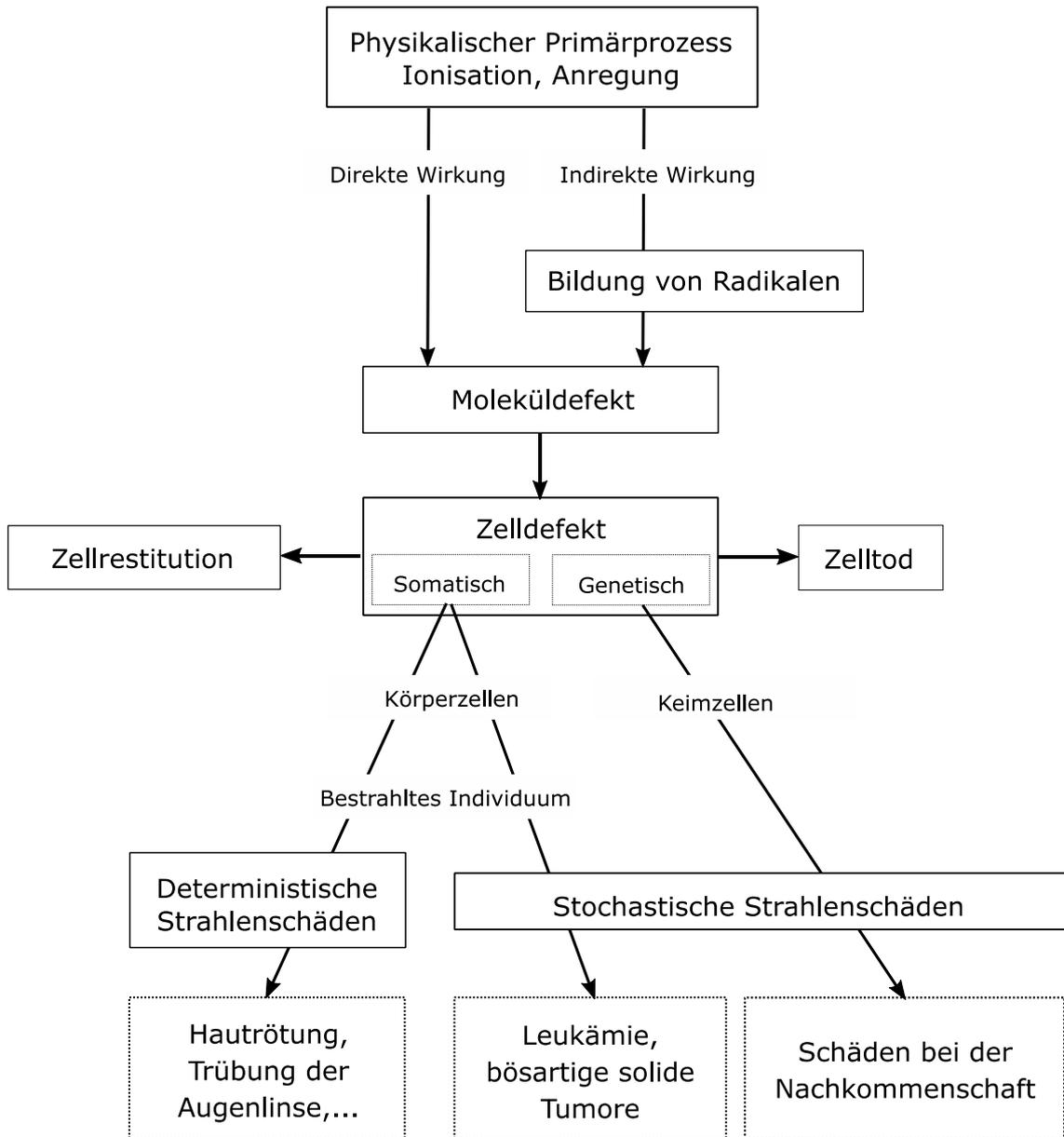


Abbildung 6: Reaktionskette von Wirkungen ionisierender Strahlung im Organismus (Quelle: Vogt und Schultz, 2011)

Dass die verschiedenen Strahlungsarten sowohl direkt als auch indirekt mit den Atomen der Moleküle wechselwirken können, wurde bereits in Kapitel 2.4 beschrieben. Schäden werden deswegen nicht nur an direkt bestrahlten Zellen nachgewiesen, die Strahlung hat auch Auswirkungen auf umliegende Nachbarzellen (Vogt und Schultz,

2011, S. 81). Ionisierende Strahlung kann zu DNA-Schäden im Zellkern⁵ führen, welche teilweise durch innere Vorgänge repariert werden können. Die Bestrahlung hat in diesen Fällen keine Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der Zelle. Veränderungen in der Basenfolge, Gendelektionen, Translokationen sowie Chromosomenaberrationen entstehen, wenn der Reparaturmechanismus eingeschränkt ist. (Blettner et al., 2012) Die beschädigten Zellen können sich teilen und Mutationen entstehen (Kiefer, 2012, S. 180). Dabei wird verändertes Erbgut an die Tochterzellen weitergegeben. Durch unkontrollierte Vermehrung können Tumore entstehen, die sich auch lange Zeit nach der Bestrahlung entwickeln können. Die bestehende Teilungsfähigkeit einer beschädigten Zelle verursacht möglicherweise Spätschäden wie beispielsweise eine Krebserkrankung. Leukämie tritt in einem Zeitfenster von 5 bis 10 Jahren nach der Bestrahlung auf. Solide Tumore besitzen eine Latenzzeit von über 20 Jahren. Neben möglichen Zelldefekten kann es ebenfalls dazu kommen, dass sich die Zelle nicht mehr teilen kann und abstirbt. (Blettner et al., 2012)

Wann die Schadenswirkungen eintreten, hängt maßgeblich von der Anzahl an Zellen sowie dem Zyklus der Zellerneuerung ab (Schneider und Burkart, 1998). Falls die Zelle nicht mehr in der Lage ist, sich zu teilen, treten die Wirkungen bei einem hohen Zellverlust früh ein (Kiefer, 2012, S. 180). Die Zelle ist bestrebt, den Zellverlust auszugleichen und neue Zellen zu produzieren. Dies ist aufgrund der Teilungsunfähigkeit nicht mehr möglich. Schneider und Burkart (1998) und Schröder und Schröder (2015) definieren die Haut, den Dünndarm, das Knochenmark und die Augenlinse sowie die weiblichen und männlichen Geschlechtsorgane als besonders betroffene Organe (Schröder und Schröder, 2015, S. 102).

Vogt und Schultz (2011) unterscheiden Zelldefekte in Abbildung 6 in *somatische* und *genetische* Defekte. Somatische Defekte beziehen sich auf die Körperzellen eines Organismus, genetische Defekte bewirken Veränderungen in den Keimzellen und haben Auswirkungen auf die Nachkommen. Daraus lassen sich deterministische Strahlenschäden ableiten, die in jedem Fall auf somatischen Zelldefekten beruhen. Stochastische Strahlenschäden können sowohl somatischen als auch genetischen Zelldefekten zugeordnet werden. Die verschiedenen Wirkungen werden im Folgenden separat behandelt. Im Anschluss daran findet in Kapitel 3.3 eine differenzierte Betrachtung der Auswirkungen auf ausgewählte Organe statt.

⁵ Mögliche Folgen sind Basen- und Zuckermodifikationen, DNA-Einzel- und Doppelstrangbrüche sowie Protein-Strangvernetzungen (Blettner et al., 2012, S. 720f). Für weitere Details siehe Hagen (1994, S. 632ff).

Es sei angemerkt, dass Kinder auf ionisierende Strahlung sensibler reagieren als Erwachsene. Das liegt zum einen an ihrer durchlässigeren Haut, zum anderen an der Tatsache, dass sich ihr Immun-System noch in der Entwicklungsphase befindet. Durch eine schnellere Atmung können mehr radioaktive Stoffe in den Körper gelangen. Zudem halten sie sich beim Spielen eher auf kontaminierten Böden auf. (Rosen, 2012, S. 8)

3.2.1 DETERMINISTISCHE STRAHLENSCHÄDEN

Wie bereits erwähnt führen Strahlendosen oberhalb eines spezifischen Schwellenbereichs zu deterministischen Schäden. Wann die Schäden auftreten und welche Wirkung sie haben, hängt von der Dosismenge und ihrer Verteilung auf den Organismus ab (Vogt und Schultz, 2011, S. 82). Kauffmann et al. (2013) verdeutlichen, dass für eine Risikobeurteilung die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe auf ionisierende Strahlung von Bedeutung ist. Ebenso muss bekannt sein, um welche Strahlungsart es sich handelt, da γ -Strahlen tiefer in das Gewebe eindringen können als Teilchenstrahlen. (Kaufmann et al., 2013, S. 49) Die betroffenen Stellen und die jeweilige Dosis muss bekannt sein, um die Gefahr abschätzen und geeignete Maßnahmen treffen zu können. Die Bestrahlung von Extremitäten hat unter denselben Bedingungen eine geringere Schadenswirkung als eine Bestrahlung des gesamten Körpers. Trifft ionisierende Strahlung in kurzer Zeit mit einer Dosis von mehr als 1-2 Gy auf den gesamten Körper, treten innerhalb einer kurzen Latenzzeit Folgen ein, die als *Akute Strahlenkrankheit* oder *Akutes Strahlensyndrom (ARS)* bezeichnet werden. (Vogt und Schultz, 2011, S. 82ff).

Der Schweregrad und Krankheitsverlauf hängt von der Energiedosis und ihrer Leistung ab. Grundlage für das Akute Strahlensyndrom sind durch ionisierende Strahlung zerstörte Zellgruppen. Je nach Dosis treten verschiedene Begleiterscheinungen bei den betroffenen Patienten auf, die im Weiteren aufgeführt werden. (Mettler et al., 2007, S. 462ff)

Die Tabelle 1 verdeutlicht die empfindlichen Organe sowie die auftretenden Symptome nach einer kurzzeitigen Ganzkörperexposition mit durchdringender Strahlung⁶. Da der Faktor für die Berücksichtigung der relativen biologischen Wirksamkeit für γ -Strahlen gleich 1 ist, stimmen Energiedosis und Äquivalentdosis überein (Hagen, 1994, S. 631). Aufgrund ihrer hohen Zellteilungsrate sind das Knochenmark und der Darm besonders anfällig (Kiefer, 2012, S. 64). Dosen bis zu 2 Gy schädigen vor allem die

⁶ Vergleiche hierzu auch Hagen (1994, S. 638), (Gloebel und Graf, 1996, S. 178) sowie IAEA und WHO (1998, S. 14ff).

Funktionsfähigkeit des Knochenmarks und beeinträchtigen somit das blutbildende System. In einem Dosisbereich von 1-6 Gy spricht man deswegen von der *hämatopoetischen Strahlenkrankheit* (Kiefer, 2012, S. 66). Bis eine Wirkung eintritt, vergehen einige Stunden. Die Überlebenschancen sind bei geringen Dosen sehr gut und Therapiemaßnahmen in den meisten Fällen nicht nötig. Eine höhere Dosis führt in kürzester Zeit zu einer lebensbedrohlichen Situation des getroffenen Organismus. Neben schweren Schäden im Blutbild treten Symptome wie Fieber, Durchfall, Erbrechen, innere Blutungen und Elektrolytstörungen innerhalb weniger Stunden auf. Da vor allem eine Schädigung des Dünndarms vorliegt, bezeichnet man diese Form als *intestinale Strahlenkrankheit* (Schröder und Schröder, 2015, S. 105). Trotz empfohlener Therapiemaßnahmen sind die Überlebenschancen sehr schlecht, da meist nicht nur ein einziges Organ betroffen ist. Ein *Multiorganversagen* liegt vor (Kiefer, 2012, S. 66). Nach den Angaben in der Tabelle treten die Wirkungen auf das Nervensystem bei Energiedosen über 50 Gy bereits innerhalb von Minuten ein. Der Wert für diese Form der Strahlenkrankheit wird von Kiefer (2012) auf 20 Gy festgelegt. Er bezeichnet diesen Zustand als *zerebrovaskuläre Form der Strahlenkrankheit*. (Kiefer, 2012, S. 66). Bei Schröder und Schröder (2015) ist von einer *neuralem Strahlenkrankheit* die Rede (Schröder und Schröder, 2015, S. 104). Wie bereits erwähnt, lassen sich die Folgen für ein Individuum nur schwer vorhersagen und hängen von verschiedenen Faktoren ab. Kauffmann et al. (2013) führen neben den oben genannten Ursachen beispielsweise Geschlecht, Alter, Gesundheitszustand, Ernährungszustand und Entzündungen an. Die Wirkung ionisierender Strahlung kann ebenfalls durch die geführte Lebensweise (Konsum von Alkohol und Rauchen) verstärkt werden. (Kaufmann et al., 2013, S. 49)

Somatische Defekte können ebenso aufgrund einer lang andauernden Bestrahlung auftreten. Von einer gleich großen, absoluten Dosismenge ausgehend ist die Wirkung einer über die Zeit verteilten Dosis geringer als bei einer kurzzeitigen Bestrahlung. Oftmals bewirkt eine Dauerbestrahlung des Organismus keine deterministischen sondern lediglich stochastische Schäden, die erst nach einer gewissen Zeit auftreten. (Vogt und Schultz, 2011, S. 82ff) Diese werden im folgenden Kapitel behandelt.

Tabelle 1: Klinische Frühsymptome deterministischer Strahlenwirkungen beim Menschen nach kurzzeitiger Ganzkörperexposition mit durchdringender Strahlung in Abhängigkeit von der Energiedosis (in Anlehnung an Vogt und Schultz, 2011, S.83).

| Energie-Dosis (Gy) | Äquivalent-dosis (Sv) | Latenzzeit | Charakteristische Wirkungen | | | Therapie | Überlebenschance | | Ursache bei Todesfall |
|--------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------|---|--------------------------------|---|----------------------------------|---------------|-------------------------------|
| | | | Besonders betroffenes Organ | Hauptsymptom | Kritische Zeit nach Exposition | | Prognose | Steberisiko % | |
| < 1 | < 1 | > 5 Stunden | Knochen-mark | Geringe Änderung des Blutbildes | | Unnötig | Sehr gut | 0 | - |
| 1-2 | 1-2 | > 3 Stunden | Knochen-mark | Deutliche Abnahme der Anzahl der Leukozyten und Thrombozyten | 2-6 Wochen | Symptomatische Behandlung | Gut | 0-10 | Infektionen, innere Blutungen |
| 2-10 | 2-10 | 0,5-2 Stunden | Knochen-mark | Schwere Schäden im Blutbild, Kopfschmerzen, Schwäche, Fieber, Infektionen, Müdigkeit, Innere Blutungen, Haarausfall, Durchfall, Erbrechen | 2-6 Wochen | Bluttransfusion, Infusion, Antibiotika, Knochenmark-transplantation | Unsicher, je nach Therapieerfolg | 0-90 | Infektionen, innere Blutungen |
| 10-15 | 10-15 | 0,5 Stunden | Darm | Durchfall, Fieber, Elektrolytstörungen | 0,5-2 Wochen | Linderungsmittel | Sehr schlecht | 90-100 | Schwerste Darmschäden |
| 50 | 50 | wenige Minuten | Nerven-system | Krämpfe, Zittern, Bewegungsstörungen, Schlafbedürfnis, Koma | 1 Stunde - 2 Tage | Symptomatische Behandlung | Hoffnungslos | 100 | Hirnoedem |

3.2.2 STOCHASTISCHE SOMATISCHE STRAHLENSCHÄDEN

Kommt es nach einer Bestrahlung mit ionisierender Strahlung zu keinen deterministischen Frühschäden, kann nicht vorhergesagt werden, ob der Organismus dennoch Schädigungen erfahren hat. Die Folgen können sogar nach Jahren oder Jahrzehnten auftreten. Bei stochastisch somatischen Strahlenschäden genügt bereits eine geringe Dosis, um die Zellteilung zu stören. Mögliche Folgen sind Leukämie oder bösartige, solide Tumore. Der Schweregrad der Erkrankung ist unabhängig von der absorbierten Energiedosis. Lediglich die Wahrscheinlichkeit, dass eine Schadenswirkung eintritt, steigt in Abhängigkeit von der Dosis. (Schneider und Burkart, 1998) Vogt und Schultz (2011) legen für eine Risikoabschätzung eine differenzierte Betrachtung der bestrahlten Regionen vor. Sind mehrere Körperregionen betroffen, so summieren sich die einzelnen Risikowerte der Organe zum Gesamtrisiko für die Person auf. Falls eine Schädigung in den Organen vorliegt, so bestimmen die Empfindlichkeit des Organs und die Abwehrkräfte die Auswirkungen auf den Körper. (Vogt und Schultz, 2011, S. 85)

Eine Identifikation von stochastischen Strahlenschäden ist aufgrund fehlender Nachweisbarkeit problematisch. Ursachen für Schädigungen des Organismus und Auslöser von Krankheiten können nicht eindeutig bestimmt werden. Um Werte für stochastische Schäden abschätzen zu können, werden Kohortenstudien durchgeführt. Ziel ist die Dokumentation der Auswirkungen ionisierender Strahlung auf eine große Anzahl an betroffenen Personen. Auf diese Art können Häufigkeiten für stochastische Schäden annähernd ermittelt werden. Vogt und Schultz (2011) erläutern einige Faktoren, die die Berechnungen erschweren. Zum einen ist es schwierig, die genaue Dosis zu bestimmen, zum anderen ist die Anzahl der zusätzlich ausgelösten Erkrankungen vergleichsweise gering. Unter Berücksichtigung der natürlichen Entstehung von Tumoren kann das erhöhte Risiko durch ionisierende Strahlung mit hohen Dosen ermittelt werden. Studien wurden beispielsweise an den Überlebenden der Atombombenabwürfe von Hiroshima und Nagasaki durchgeführt. Personen, die beruflich mit ionisierender Strahlung in Berührung kommen, und Bestrahlungspatienten bieten sich ebenfalls an. (Vogt und Schultz, 2011, S. 85)

Bisher ungeklärt ist die Dosis-Risikobeziehung für geringe Energiedosen, da sie wissenschaftlich nicht gesichert ist. Vogt und Schultz (2011) weisen auf zellulär- und molekularbiologische Untersuchungen hin, um Rückschlüsse für die Auswirkungen auf den Organismus zu ziehen. Dadurch erscheint bei soliden Tumoren eine lineare Abhängigkeit zwischen Dosis und Risiko sinnvoll. (Vogt und Schultz, 2011, S. 86) Die Risikoabschätzung für eine Leukämieerkrankung lässt sich besser durch einen linear

quadratischen Zusammenhang beschreiben (National Research Council of the National Academies, 2006, S. 6). Ob bei stochastischen Strahlenwirkungen ebenfalls ein Dosiswellenbereich existiert, da geringfügige Schäden in den Zellen repariert werden können, ist fraglich (Vogt und Schultz, 2011, S. 86ff). Die Grenzwerte des Strahlenschutzes für geringe Dosen orientieren sich an einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung ohne Existenz eines Schwellenwerts (LNT-Hypothese). Einige Untersuchungen stellen Ergebnisse vor, die auf eine nicht lineare Beziehung hindeuten. (National Research Council of the National Academies, 2006, S. 9f) Die Erkenntnisse sind jedoch nicht eindeutig (Schneider und Burkart, 1998).

3.2.3 GENETISCHE STRAHLENSCHÄDEN

Dass ionisierende Strahlung Schäden an dem bestrahlten Organismus anrichten, wurde bereits erläutert. An dieser Stelle werden die Auswirkungen für die Nachkommen der bestrahlten Bevölkerung untersucht.

Selbst nach den Vorkommnissen in Hiroshima und Nagasaki ist eine Ableitung des Risikos für die nachfolgenden Generationen nicht möglich. Durch Experimente mit bestrahlten Mäusen wurde nachgewiesen, dass erblich bedingte Veränderungen auftreten können. (Kiefer, 2012, S. 69ff) Diese Folgen treten ein, wenn ionisierende Strahlung Schäden in den Keimdrüsen oder Keimzellen hervorrufen. Vogt und Schultz (2011) stellen fest, dass die Wirkung in vielen Fällen nicht bei der bestrahlten Person direkt nachgewiesen werden kann, sondern erst bei ihren Nachkommen. Eine genetisch veränderte Eigenschaft kann entweder *dominant* oder *rezessiv* vererbt werden. Dominante Mutationen treten bereits in der nachfolgenden Generation in Erscheinung, auch wenn der zugehörige Chromosomensatz normal vererbt wurde. Damit eine rezessiv vererbte Veränderung nachgewiesen werden kann, müssen beide Keimzellen von der Mutation betroffen sein. Dies kann unter normalen Umständen erst nach mehreren Generationen der Fall sein, wenn die rezessive Mutation bereits mehrfach vererbt wurde. (Vogt und Schultz, 2011, S. 89ff) Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei geschädigte Keimzellen fortpflanzen, deren Mutationen bisher unbemerkt blieben.

Nach Kiefer (2012) lässt sich das Risiko strahleninduzierter, genetischer Schäden für γ -Strahlen annähernd angeben. Dabei stützt sich der Autor auf eine Untersuchung der *United Nations Commission on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)*. Erblich bedingte Veränderungen mit schwerwiegenden Folgen durch Strahlungsdosen von 1 Gy treten mit einer Wahrscheinlichkeit von maximal 1 % auf. Hervorzuheben ist, dass genetische Strahlenschäden mit einer Häufigkeit von 5-10 % bereits natürlicherweise

vorkommen. Eine signifikante Erhöhung der Betroffenen durch ionisierende Strahlung kann demnach nicht festgestellt werden. (Kiefer, 2012, S. 71)

3.3 Spezielle Organtoxizität

Nachfolgend werden die Auswirkungen ionisierender Strahlung auf einige menschliche Organe sowie die Folgen einer Bestrahlung während der Schwangerschaft genauer betrachtet. Die gefundenen Aussagen stammen überwiegend aus deutscher Fachliteratur, die fundiertes Wissen über Radioaktivität aufweist. Wissenschaftliche Paper wurden herangezogen, um die Einschätzungen zu stützen und mit Daten zu belegen. Viele Erkenntnisse basieren auf Langzeitstudien (Life Span Study (LSS)) der bestrahlten Bevölkerung nach den Atombombenabwürfen über Japan. Die Überlebenden waren kurze Zeit hohen Dosen an γ -Strahlung sowie Neutronenstrahlung ausgesetzt (UNSCEAR, 2011a, S. 6). Diese Wirkungen unterscheiden sich jedoch deutlich von interner Bestrahlung durch α - und β -Strahlen. Ebenso wirkt sich eine lang andauernde Bestrahlung anders als eine kurzzeitige aus. (Straume, 1995) Die Gefahren einer Langzeitbestrahlung mit geringen Dosen werden vor allem anhand der Informationen über den Nuklearunfall in Tschernobyl analysiert (UNSCEAR, 2011a, S. 9).

Gewebe-Gewichtungsfaktoren sind für die Berechnung der effektiven Äquivalentdosis notwendig und weisen auf besonders sensible Organe hin. Einige Gewebe und Organe werden mit ihren zugehörigen Gewichtungsfaktoren in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Gewebe-Gewichtungsfaktoren W_T (Quelle: StrISchV, Anlage VI, Teil C.2.)

| Gewebe oder Organe | Gewebe-Gewichtungsfaktoren W_T |
|---------------------------|--|
| Keimdrüsen | 0,20 |
| Knochenmark (rot) | 0,12 |
| Dickdarm | 0,12 |
| Lunge | 0,12 |
| Magen | 0,12 |
| Blase | 0,05 |
| Brust | 0,05 |
| Leber | 0,05 |
| Speiseröhre | 0,05 |
| Schilddrüse | 0,05 |
| Haut | 0,01 |
| Knochenoberfläche | 0,01 |
| Andere Organe oder Gewebe | 0,05 |

3.3.1 KEIMDRÜSEN

Die Folgen ionisierender Strahlung lassen sich für die Keimdrüsen in drei wesentliche Formen unterteilen. Zum einen können Tumore entstehen zum anderen kann es zu einer Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit kommen. Zudem können durch Vererbung Schäden bei den Nachkommen auftreten. Die Auswirkungen in der Schwangerschaft werden unter einem separaten Stichpunkt behandelt. Die menschlichen Keimdrüsen sind für eine Krebserkrankung relativ unempfindlich. Diese Aussage basiert auf einer Veröffentlichung der International Commission on Radiological Protection (ICRP) aus dem Jahr 1987. Bis zu diesem Zeitpunkt konnten keine strahleninduzierten Krebserkrankungen der Keimdrüsen eindeutig nachgewiesen werden. Das Alter beeinflusst bei den Frauen die Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit, da die Bildung neuer Oozyten in der Kindheit aufhört. Bei Männern besteht durch eine kontinuierliche Produktion der Spermien die Möglichkeit, dass sich die Keimdrüsen von den Strahlenschäden erholen. (ICRP, 1987, S. 9f)

3.3.2 KNOCHENMARK UND BLUTBILD

Dass das Knochenmark durch ionisierende Strahlung besonders betroffen ist, zeigt die Tabelle 1. Die Strahlungsschäden verhindern den Teilungsvorgang der Stammzellen im Knochenmark und somit die Erneuerung der Blutbestandteile. Eine Änderung des Blutbildes ist die Folge. Die Lymphozyten sind nicht erst durch die fehlende Teilungsfähigkeit der Stammzellen betroffen, sondern bereits direkt durch die Bestrahlung. (Kiefer, 2012, S. 64) Kauffmann et al. (2013) legen die Dosis für das Absterben der Lymphozyten zwischen 2-4 Gy fest. Durch Untersuchung ihrer Anzahl und Funktionsfähigkeit, können Rückschlüsse auf die exponierte Strahlendosis gezogen werden. (Kauffmann et al., 2013, S. 52) Die Anzahl der Granulozyten und Thrombozyten fallen ebenfalls relativ früh ab. Bei den längerlebigen Erythrozyten können die Folgen erst nach einer gewissen Zeit nachgewiesen werden. Mit der Veränderung des Blutbildes verschlechtert sich das Immunsystem und die Fähigkeit, Verletzungen zu heilen. (Kiefer, 2012, S. 64f) Kauffmann et al. (2013) verdeutlichen die Folgen für das blutbildende System folgendermaßen: Falls geringe Dosen ionisierender Strahlung auf Teilbereiche des Organismus treffen, besteht die Möglichkeit, dass sich das Knochenmark nach einigen Wochen von den Schäden erholt. Nicht beschädigte Stammzellen sorgen in der Erholungsphase für den Nachschub der Blutbestandteile, bis sich das System regeneriert hat. Ganzkörperbestrahlung mit höheren Dosen verursachen bleibende Beeinträchtigungen des Knochenmarks. (Kauffmann et al., 2013, S. 52)

3.3.3 MAGEN-DARM-TRAKT

Aus der Tabelle 1 folgt die Annahme, dass Schäden des Verdauungstraktes erst nach einer Bestrahlung mit relativ hohen Dosen vorkommen. Der Grund hierfür liegt ebenfalls in der eingeschränkten Teilungsfähigkeit der Zellen. Dies hat vor allem Auswirkungen auf den Dünndarm, der viele Zellen innerhalb weniger Tage erneuern muss. Es kommt zu schweren Verdauungsstörungen und Durchfall. (Kiefer, 2012, S. 65) Unter den überlebenden Bewohnern von Hiroshima und Nagasaki konnten erhöhte Erkrankungs- und Sterberaten durch Magen- und Darmkrebs aufgezeichnet werden. Der Zusammenhang zwischen einer Exposition ionisierender Strahlung und einer Krebserkrankung am Rektum ist nicht signifikant. (Thompson et al., 1994) In einer Studie über das Auftreten gutartiger Tumore des Magen-Darm-Trakts konnte ein erhöhtes Erkrankungsrisiko für Krebs abgeleitet werden, wenn das Organ bereits durch gutartige Tumore betroffen war. (Ron et al., 1995, S. 68)

3.3.4 LUNGE

Ionisierende Strahlung kann zu akuter und chronischer Strahlenpneumopathie führen (Kauffmann et al., 2013, S. 53). Die Elastizität der Lunge nimmt ab, weswegen die betroffenen Personen an Kurzatmigkeit leiden (Gloebel und Graf, 1996, S. 175). Die genauen Abläufe bei einer akuten Erkrankung fassen Kauffmann et al. (2013) in einem Radiologie-Lehrbuch zusammen. An eine akute Erkrankung schließt sich oftmals eine chronische Strahlenpneumopathie an. Eine Fibrose entsteht durch eine Zunahme der Fasern in der Lunge und schränkt ihre Funktionsfähigkeit ein. Diese Prozesse breiten sich auch auf nicht bestrahlte Bereiche der Lunge aus und erhöhen die Schadenswirkung. (Kauffmann et al., 2013, S. 53)

Die Lunge ist bereits durch die α -Strahlung von Radon, einem Zerfallsprodukt des natürlich vorkommenden Radiums, belastet. Diese Tatsache belegen u.a. Herrmann et al. (2006, S. 140) und UNSCEAR (2011a, S. 6). Ein erhöhtes Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken, konnte aus diesem Grund bei Arbeitern in Uranerz-Minen festgestellt werden (Schneider und Burkart, 1998). Die Ergebnisse lassen sich jedoch nicht auf die allgemeine Bevölkerung übertragen, da die Strahlenbelastung im Bergbau deutlich höher ist als in der normalen Umwelt. Herrmann et al. (2006) schätzen den Wert der inneren Strahlung durch die Inhalation von Radon auf 1,3 mSv pro Jahr. Das entspricht in etwa der Hälfte der gesamten natürlichen Strahlung, der der Mensch in einem Jahr ausgesetzt ist. (Herrmann et al., 2006, S. 140) Möglicherweise verursachte ionisierende Strahlung bei den Überlebenden der Atombombenabwürfe Lungenkrebs. Aufgrund von Störfaktoren (z.B. Rauchen) ist ein eindeutiger Nachweis schwierig.

(Ozasa et al., 2012, S. 240) Furukawa et al. (2010) untersuchen diese abhängige Beziehung von Strahlung, Rauchen und der Entstehung von Lungenkrebs (Furukawa et al., 2010).

3.3.5 HAUT UND HAARBILDUNG

Schäden an der Haut können nicht nur tief eindringende γ -Strahlen verursachen, sondern auch α - und β -Strahlen (Kiefer, 2012, S. 64). Je nach Höhe der Bestrahlungsdosis werden die Auswirkungen früher oder später sichtbar. Gottlöber et al. (2000) befassen sich mit den verschiedenen Phasen des *kutanen Strahlensyndroms* und den unterschiedlichen Wirkungen der verschiedenen Strahlungsarten. Die Stadien werden hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs und den Symptomen in Prodromalstadium, Manifestationsstadium, subakutes Stadium, chronisches Stadium und Spätstadium gegliedert. (Gottlöber et al., 2000) An den betroffenen Stellen bilden sich *Erytheme*, Hautrötungen, aus. Weitere Folgen variieren je nach Strahlendosis und reichen von trockener Haut und Haarausfall bis zu Pigmentverschiebungen und Blutungen. (Kauffmann et al., 2013, S. 52) Im Spätstadium können die Folgen mit einer Latenzzeit von über 10 Jahren auftreten (Gottlöber et al., 2000, S. 570). Falls tiefer liegendes Gewebe betroffen ist, muss dieses chirurgisch entfernt werden. Betroffene Stellen an der Oberfläche können abgetragen werden. (Kiefer, 2012, S. 64). Die Schädigungen basieren auf einer deterministischen Dosis-Wirkung-Beziehung (Rodemann, 2000, S. 29). Die Schwellendosis für die Haut wird von Kiefer (2012) auf 2 Gy angesetzt (Kiefer, 2012, S. 69).

Bei einem Strahlenunfall in der Nähe von Moskau im Jahr 1971 waren vier Personen hohen Dosen ^{137}Cs ausgesetzt. Die zwei Überlebenden wiesen nach unterschiedlichen Latenzzeiten Symptome des Basalzellenkrebs (rote Hautflecken und Geschwüre) auf. Obwohl diese Erkrankung nach einer derartigen Exposition ungewöhnlich ist, kann ein Zusammenhang bestehen. Ein Einfluss der Sonnenstrahlung wird in diesem speziellen Fall ausgeschlossen. (Gottlöber et al., 1999)

3.3.6 AUGEN

Die Folgen für das Auge durch sehr hohe Strahlendosen (50 Gy) sind vielfältig (Kauffmann et al., 2013, S. 55). Von besonderem Interesse sind jedoch die Schäden, die bereits durch geringere Dosen entstehen. Lange Zeit wurde die Schwellendosis für die Entwicklung von Augenkatarakten (Linsentrübungen) bei etwa 1 Gy angesetzt (Kiefer, 2012, S. 68). Heutzutage bestehen Zweifel an einer deterministischen Strahlenabhängigkeit für das Auge (UNSCEAR, 2011a, S. 14). Eventuell lassen sich

die Folgen besser durch das stochastische Zufallsprinzip beschreiben. Der Nachweis eines durch ionisierende Strahlung ausgelösten Augenkataraktes ist sehr schwer. Grund dafür ist das häufige, natürliche Auftreten dieser Krankheit bei älteren Menschen. (Kiefer, 2012, S. 68) Bei mehreren potentiellen, krankheitsauslösenden Faktoren kann nicht eindeutig nachgewiesen werden, was zu einer Erkrankung geführt hat. In diesem Fall ist lediglich eine Wahrscheinlichkeit bestimmbar, die angibt, in welchem Maße ionisierende Strahlung der Grund ist (UNSCEAR, 2011b, S. 56). Die zwei Überlebenden des oben genannten Strahlenunfalls in der Nähe von Moskau litten an strahleninduzierten Katarakten. (Gottlöber et al., 1999)

3.3.7 HERZ UND KREISLAUF

Shimizu et al. (2010) führten Studien an den Überlebenden der Atombombenabwürfe in Hiroshima und Nagasaki durch. Sie konnten durch ionisierende Strahlung bedingte kardiovaskuläre und zerebrovaskuläre Erkrankungen nachweisen. Die Betroffenen waren Dosen von 0 Gy bis über 3 Gy exponiert, wobei der größte Teil in die Gruppe mit Dosen kleiner als 0,2 Gy fällt. Von 86.611 Betroffenen starben etwa 9.600 an einem Schlaganfall und 8.400 an Herzerkrankungen. Bei Dosen über 0,5 Gy stieg das Risiko für eine Erkrankung. Schätzungen nach erhöht sich das zusätzliche Risiko für Schlaganfälle um 9% pro Gray, für Herzerkrankungen sogar um 14%. In beiden Fällen bietet sich ein lineares Dosis-Wirkungs-Modell an. Damit ist die Untersuchung von strahleninduzierten Herz-Kreislauf-Erkrankungen genauso wichtig wie die Analyse von Krebsentstehungen. Die Wirkung geringer Energiedosen bedarf weiterer Untersuchungen. (Shimizu et al., 2010, S. 1)

3.3.8 SCHWANGERSCHAFT

Vor ionisierender Strahlung müssen insbesondere schwangere Frauen geschützt werden. In den verschiedenen Stufen der Schwangerschaft kann es zu Schädigungen kommen, die Fehlbildungen auslösen. Solche Schäden, die den Embryo, Fetus oder das Kind betreffen, werden als teratogene Strahlenschäden definiert. (Vogt und Schultz, 2011, S. 81).

Die Folgen einer Bestrahlung im Mutterleib können im Einzelfall nicht vorhergesagt werden, da sowohl somatische als auch genetische Defekte mit einem stochastischen und deterministischen Wirkungsprinzip auftreten können (Kauffmann et al., 2013, S. 43). In dem Buch „Strahlen und Gesundheit“ von Kiefer (2012) werden besonders empfindliche Zeitfenster während der Schwangerschaft identifiziert. Innerhalb der Präimplantationsphase führt eine Exposition mit hochdosierter Strahlung zu einem Schwangerschaftsabbruch. Von der 2. bis zur 8. Schwangerschaftswoche findet die

Ausbildung der Organe statt, in der viele neue Zellen entstehen. Bei einer gestörten Zellteilungsfähigkeit erleiden die Organe schwerwiegende Schäden. Es treten Fehlbildungen oder Todesfälle auf. Besonders betroffene Organe sind in diesem Zeitfenster das zentrale Nervensystem, das Auge, das Skelett, das Herz sowie das blutbildende System. Kiefer (2012) geht davon aus, dass eine Schwellendosis von 50-100 mGy überschritten werden muss, damit eine Gefährdung für den Embryo vorliegt. Bis zur 16. Wochen ist das Risiko weiterhin erhöht. Strahlendosen über 300 mGy führen in dieser Phase nicht zu anatomischen Fehlbildungen sondern zu Funktionsstörungen im Gehirn. Auf diese Tatsache wiesen Analysen nach den Bombenexplosionen in Japan hin. Sie konnten mit Hilfe von Tierversuchen gestützt werden. Des Weiteren besteht über die gesamte Schwangerschaft hinweg das Risiko einer Krebsinduktion des Kindes. (Kiefer, 2012, S. 81ff) Wakeford et al. (1997) veröffentlichten 1997 eine Studie über das Risiko einer Krebserkrankung im Kindesalter nach einer Bestrahlung mit geringen Dosen ionisierender Strahlung im Mutterleib. Sie folgerten aus ihren Untersuchungen, dass nach einer Dosis von mehr als 10 mGy das Risiko einer Krebserkrankung vor dem 15. Lebensjahr zwischen 6-12% pro Gy steigt. (Wakeford et al., 1997) Es existieren Hinweise, die auf einen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der perinatalen Sterblichkeit in Deutschland im Jahr 1987 und dem Unglück in Tschernobyl hindeuten (Körblein und Küchenhoff, 1997).

3.4 Wirkung ionisierender Strahlung auf Umwelt und Tiere

Radioaktive Elemente belasten den Menschen nicht nur direkt durch Inhalation der gefährlichen Substanzen, sondern auch durch Zufuhr strahlenbelasteter Nahrung und indirekte Strahlung von Boden und Pflanzen. Die Abbildung 7 kennzeichnet die verschiedenen Belastungspfade des Menschen. Dabei wird deutlich, dass auch Tiere und Umwelt von der ionisierenden Strahlung betroffen sind. Die Auswirkungen werden an dieser Stelle behandelt. Dabei werden ebenfalls Rückschlüsse auf die Folgen für den Menschen getroffen.

Gasförmige Elemente können über weitere Strecken in der Atmosphäre transportiert werden als radioaktive Partikel. (Penkaitis, 1988, S. 32) Durch eine große Oberfläche der Pflanzen steigt die Aufnahme radioaktiver Nuklide. Sie gelangen entweder durch Diffusion oder über die Wurzeln in das Pflanzengewebe. (Ratschinski, 1979, S. 381ff). Zudem beeinflusst die Bodenbeschaffenheit (Humusgehalt, Mineralstoffanteil, pH-Wert, Bodenklima) die Fähigkeit radioaktiver Elemente, in den Boden einzudringen und von den Wurzeln aufgenommen zu werden. Sind im Boden viele Organismen vorhanden, so nehmen diese strahlende Nuklide auf. Die radioaktiven Elemente werden mit unbelasteten Nährstoffen verwechselt. Damit verringert sich die Menge, die von den Wurzeln der Pflanzen aufgenommen werden können, Feuchtigkeit hingegen fördert die Aufnahme strahlender Nuklide. (Penkaitis, 1988, S. 32ff)

Strahlung wirkt entweder extern oder durch Ingestion intern auf Pflanzen, Tiere und den menschlichen Körper ein. Aus einem kontaminierten Boden wachsen in einigen Fällen strahlenbelastete Pflanzen. Somit besteht für den Menschen eine Gefahr beim Verzehr von Pflanzen, sowie von Tieren, denen belastetes Futter gegeben wurde. Es ist nicht ausreichend, lediglich die Belastung auf dem Festland zu betrachten. Radioaktive Elemente können ebenfalls in Meere, Seen und Flüsse niederregnen. Folglich sind sowohl das Wasser als auch darin lebende Tiere belastet. Da sich Radionuklide in Plankton ansammeln, sind Fische in schwach durchströmten Seen einer höheren Belastung ausgesetzt. Hier steht ihnen Plankton vermehrt als Nahrungsmittel zur Verfügung. (Kröger und Chakraborty, 1989, S. 103ff) Eine Aufnahme gefährlicher Stoffe in den menschlichen Körper ist wiederum über die Nahrungskette möglich. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass radioaktive Nuklide ins Grundwasser gelangen und das Trinkwasser verseuchen (Penkaitis, 1988, S. 32). Die Absorptionsfähigkeit des Bodens dient der Verringerung der Konzentration gefährlicher Stoffe im Grundwasser. Es gibt verschiedene Maßnahmen, um die Bodenbeschaffenheit dementsprechend zu präparieren (Penkaitis, 1988, S. 32ff).

Fendrik und Bors (1991) setzen den Wassergehalt in vegetativen Zellen auf 80-85% und für Samen auf etwa 12% fest (Fendrik und Bors, 1991, S. 35). Die Energie ionisierender Strahlung wird demnach wie beim Menschen durch Ionisation und Anregung der Moleküle abgegeben. Die entstehenden reaktionsfreudigen Radikale schädigen umliegende Moleküle. Höhere Sauerstoffkonzentrationen und steigender Luftdruck führen bei Pflanzen und Samen zu einer gestiegenen Strahlenschädigung. Die Sauerstoffkonzentration in der Luft reicht aus, damit maximale Strahlenfolgen entstehen. Zudem werden die Strahlenwirkungen von der Art der Pflanzengesellschaft (Monokulturen oder natürliche Pflanzengesellschaften), vom Wachstumsstadium und

Zeitpunkt der Bestrahlung sowie von der Strahlungsart beeinflusst. Strahlung kann, wie beim Menschen, sowohl kurzfristige als auch langfristige Folgen haben und somatische sowie genetische Schäden hervorrufen. Chronische Bestrahlungen sind ungefährlicher als akute. Für Strahlenschäden an Samen sind höhere Energiedosen nötig als bei wachsenden Pflanzen. Für denselben Strahleneffekt können sich die Dosiswerte je nach Pflanzenart stark unterscheiden. (Fendrik und Bors, 1991, S. 94ff)

Kenntnisse über Strahlenwirkungen auf Tiere basieren vor allem auf experimentellen Versuchen mit dem Ziel, die Folgen für das betroffene Lebewesen zu identifizieren sowie Auswirkungen auf den Menschen abzuleiten. Hill (1978) verdeutlicht, dass sich die Ergebnisse kleiner Tiere nicht auf den Menschen übertragen lassen, Wirkungen an Haustieren hingegen vergleichbar sind. Eine Bestrahlung findet sowohl extern als auch intern statt. (Hill, 1978, S. 739f) Radioaktive Elemente gelangen vor allem durch das Futter in den Körper. Eine Inhalation gefährlicher Stoffe spielt bei Tieren eine untergeordnete Rolle. (Ratschinski, 1979, S. 376) Aufgrund eines dicken Fells dringen ionisierende Strahlen über die Haut schwerer ein als beim Menschen. Die Eigenschaften der Strahlung, die in Kapitel 2.4 behandelt wurden, lassen sich auf Haustiere übertragen. Vögel und kleine Laboratoriumstiere können für dieselbe Wirkung mit einer doppelten oder dreifachen Dosis bestrahlt werden. Bakterien sind nahezu unempfindlich gegenüber ionisierender Strahlung. Werte sind aufgrund verschiedener Versuchsbedingungen schwer zu vergleichen. Die geringere Belastung fraktionierter Bestrahlung im Vergleich zu einmaliger ist genau wie bei Menschen und Pflanzen eindeutig nachgewiesen. Die Organe der Säugetiere sind ebenfalls unterschiedlich strahlenempfindlich und ihre Reaktionen auf ionisierende Strahlung ist mit denen aus Kapitel 3.3 vergleichbar. Falls Nutztiere Strahlungen ausgesetzt sind, ist das Ausmaß der Schäden und die Menge inkorporierter radioaktiver Nuklide festzustellen. Auf diese Weise wird überprüft, ob entstehende tierische Produkte für den Menschen unbedenklich sind. Erfüllen die betroffenen Nutztiere bestimmte Richtlinien, so besteht keine Gefahr beim Verzehr tierischer Produkte. Genetische Strahlenschäden bei den Nachkommen können unter diesen Bedingungen ebenfalls ausgeschlossen werden. (Hill, 1978, S. 739ff)

Die Wechselwirkung radioaktiver Elemente im Boden sollen an dieser Stelle nicht spezifiziert werden. Details werden bei Ratschinski (1979, S. 376ff) und Steffens et al. (1988) beschrieben. Ebenso sind die biologischen Abläufe in tierischen Organismen und Pflanzen nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Weitere Informationen über Bestrahlungen von Samen und Pflanzen sind in Fendrik und Bors (1991, Kapitel 7)

zusammengefasst. Die Wirkungen einzelner Nuklide in der Umwelt und in Lebewesen werden im folgenden Kapitel kurz erläutert.

3.5 Eigenschaften spezieller Nuklide

Nach dem Unglück in Tschernobyl führten vor allem die radioaktiven Nuklide ^{131}I , ^{137}Cs und ^{90}Sr zu Belastungen in der Umwelt und beim Menschen (Gloebe und Graf, 1996, S. 11). Trotz der geringen Halbwertszeit des Jods von 8 Tagen können die Folgen gravierend sein. Nach einer Ablagerung auf Pflanzen kann es von Tieren aufgenommen werden. In den menschlichen Organismus gelangt es beispielsweise über den Konsum von Milch. (Penkaitis, 1988, S. 22) Sowohl beim Menschen als auch bei Tieren ist besonders die Schilddrüse gefährdet. Im menschlichen Organismus werden darin etwa 55% des radioaktiven Jods eingebaut. Das Nuklid verbleibt in diesem Organ mit einer biologischen Halbwertszeit⁷ von 80 Tagen und sendet β - und γ -Strahlen aus, die umliegende Moleküle beschädigen. Die biologische Halbwertszeit von radioaktivem ^{131}I , das sich nicht in der Schilddrüse angelagert hat, liegt zwischen 4 und 8 Stunden. (Gloebe und Graf, 1996, S. 15f) Radioaktives Jod kann beispielsweise über Kuhmilch oder Eidotter ausgeschieden werden (Hill, 1978, S. 747). Um dieses Risiko zu vermindern wird nach einer erhöhten Freisetzung von radioaktiven Stoffen die Einnahme von stabilem Jod in geregelten Mengen empfohlen (Gloebe und Graf, 1996, S. 16).

^{137}Cs und ^{90}Sr haben Halbwertszeiten von 30 bzw. 28 Jahren, weswegen sie noch lange Zeit nach der Freisetzung eine Gefahr darstellen (Penkaitis, 1988, S. 23). Im Gegensatz zu Jod dringen sie besser in tiefere Bodenschichten ein und können über die Wurzeln in Pflanzen aufgenommen werden. Wurzeln können aufgrund der ähnlichen Eigenschaften ^{90}Sr nicht von dem ungefährlichen Nährstoff Kalzium unterscheiden. (Penkaitis, 1988, S. 34ff) Auch im menschlichen Organismus verhalten sich die Stoffe gleich, weswegen Strontium in die Knochen eingebaut wird. Es dauert 36 Jahre bis die Hälfte des ^{90}Sr durch biologische Prozesse aus dem Körper gelangt. Allerdings wird eine größere Menge bereits kurz nach der Aufnahme des Stoffes ausgeschieden. (Gloebe und Graf, 1996, S. 15) Hill (1978) weist darauf hin, dass die Strahlung bei Tieren über Milch oder Eierschalen ausgeschieden werden kann. Der Autor empfiehlt die Einnahme von Kalzium für eine Erhöhung der Ausscheidung über die Niere. Die Wirkung wurde durch Tierversuche belegt. (Hill, 1978, S. 748) Um diesen Prozess zu beschleunigen kann ebenfalls stabiles Strontium verabreicht

⁷ Die biologische Halbwertszeit gibt an, nach welcher Zeitspanne nur noch die Hälfte des inkorporierten radioaktiven Nuklids im Organismus vorhanden ist (Hill, 1978, S. 747).

werden. Als Alternative können ebenso größere Mengen Kalzium eingenommen werden. (Gloebel und Graf, 1996, S. 15)

Radioaktives Cäsium besitzt ähnliche chemische Eigenschaften wie Kalium und emittiert β - und γ -Strahlen (Gloebel und Graf, 1996, S. 12ff). Über den Darmtrakt gelangt es leicht ins Blut und kann sich im Organismus verteilen. Aufgrund der Wasserlöslichkeit werden 80-90% des verabreichten radioaktiven Stoffes in die Zellen aufgenommen. Für Cäsium existieren keine besonders anfälligen Organe, da die biologische Halbwertszeit deutlich geringer ist als bei Strontium. Nach etwa 100 Tagen ist nur noch die Hälfte des ^{137}Cs im Körper vorhanden (Gloebel und Graf, 1996, S. 16). Niere, Muskulatur und Leber weisen nach einer Inkorporation von ^{137}Cs die höchste Aktivität auf. (Hill, 1978, S. 747f)

Bei der Stilllegung eines Kernkraftwerkes ist das radioaktive Nuklid ^{60}Co von Bedeutung (Thierfeldt, 1993, S. 61f). Es stellt eine hochenergetische Gammastrahlenquelle dar (Kiefer, 2012, S. 15). Der Gewichtungsfaktor für die γ -Strahlung des ^{60}Co ist 1 (Herrmann et al., 2006, S. 8). Das Radionuklid ^{60}Co entsteht in Kernkraftwerken, indem das stabile Nuklid ^{59}Co ein freies Neutron aufnimmt. Es wandelt sich mit einer Halbwertszeit von etwa 5,3 Jahren unter Aussenden von β - und γ -Strahlung in ^{60}Ni um. (Volkmer, 2013, S. 56) Ebenso gelangt es beim Betrieb von Kernkraftwerken über die Abluft und das Abwasser in die Umwelt. Über die Nahrung oder durch Inhalation gelangt es in den menschlichen Körper. Die Leber, Bauchspeicheldrüse und Nebenniere nehmen geringe Mengen von diesem Nuklid auf. (Herrmann, 1983, S. 62) Ratschinski (1979) verdeutlicht, dass Kenntnisse über chemische Eigenschaften und Verbindungen der Radionuklide und Isotope vorliegen müssen, um deren Verhalten in Umwelt und Organismen vorhersagen zu können (Ratschinski, 1979, S. 377).

4 Fazit

4.1 Zusammenfassung

Die gesundheitlichen Auswirkungen auf Menschen und Tiere sowie die Folgen für die Umwelt stellen ein großes Gefahrenpotenzial ionisierender Strahlung dar. Um das Risiko zu mindern, muss die zusätzlich zur natürlichen Strahlung auftretende Strahlendosis so weit wie möglich reduziert werden.

Die radioaktiven Nuklide, die ionisierende Strahlung aussenden, verhalten sich in der Natur und in Organismen unterschiedlich. In manchen Fällen kann der Organismus die schädigenden Stoffe nicht von stabilen und ungefährlichen Isotopen unterscheiden. Sie werden demnach auf die gleiche Art und Weise in den menschlichen Körper eingebaut. Deswegen ist für eine Risikobeurteilung sowohl eine externe als auch eine interne Bestrahlung von Bedeutung.

Die verschiedenen Strahlungsarten, die natürlich vorkommen oder bspw. in Kernkraftwerken künstlich erzeugt werden, haben unterschiedliche biologische Wirkungen auf den betroffenen Organismus. Die Folgen für ein Individuum lassen sich schwer vorhersagen und hängen von vielen Einflussfaktoren ab. Im Allgemeinen sind hohe Dosen ionisierender Strahlung schädigender als niedrige. Ebenso sind bei einer gleichen Gesamtdosis die Auswirkungen einer kurzzeitigen Bestrahlung gravierender als bei einer fraktionierten Bestrahlung. Deterministischen Strahlenwirkungen liegt ein Dosis-Schwellenbereich zugrunde. Wird dieser überschritten, so steigt das Ausmaß der Bestrahlung mit zunehmender Dosis. Für diese Wirkung muss der betroffene Organismus mit erhöhten Dosen bestrahlt werden, die unter normalen Umständen nicht auftreten. In der Vergangenheit konnten deterministische Strahleneffekte wie z.B. das Akute Strahlensyndrom bei Überlebenden der Atombombenabwürfe oder nach den nuklearen Katastrophen von Tschernobyl und Fukushima bei Menschen nachgewiesen werden. Neben den deterministischen Effekten existieren stochastische Strahlenwirkungen. Diese können bereits durch geringe Strahlendosen Schäden verursachen. Falls die DNA betroffen ist, können Mutationen, Tumore und Krebs entstehen. Aus diesem Gefahrenpotenzial lässt sich das ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable) des Strahlenschutzes ableiten. Auch wenn Grenzwerte durch Gesetze etc. eingehalten werden, bedeutet dies nicht, dass kein Risiko durch ionisierende Bestrahlung besteht. Die Folgen können bei stochastischen

Strahlenwirkungen jedoch erst Jahre oder Jahrzehnte nach der Bestrahlung auftreten und ihre Ursache kann aus diesem Grund nicht eindeutig angegeben werden.

Die Belastung durch radioaktive Nuklide und ionisierende Strahlung sollen nicht nur für die allgemeine Bevölkerung, Tiere und die Umwelt minimiert werden. Vor allem müssen beruflich exponierte Personen vor erhöhten Dosen geschützt werden.

Aufgrund der Anwesenheit radioaktiver Nuklide ist bis zum Zustand der grünen Wiese ein Gefahrenpotenzial durch ionisierende Strahlung vorhanden. Deshalb kann ein Kernkraftwerk, unabhängig vom Reaktortyp, nicht stillgelegt und nach gewöhnlichen Vorschriften abgerissen werden. Dieser Vorgang unterliegt strengen Überwachungen. Jedoch hat Deutschland bereits viele Stilllegungsprojekte erfolgreich durchgeführt und besitzt Erfahrungen, die auf internationaler Ebene ausgetauscht werden. Dadurch können die Projekte zum einen wirtschaftlicher und schneller abgeschlossen werden, zum anderen findet eine umfangreiche Diskussion zu Sicherheitsaspekten statt.

Deutschland hat sich aufgrund der Gefahr ionisierender Strahlung für einen Atomausstieg entschieden und nimmt dabei eine Vorreiterrolle ein. Ein Gesetz zur Stilllegung der Kernkraftwerke in Deutschland wird jedoch nicht ausreichen, um sich vor den Gefahren zu schützen. Altkanzler Kohl merkte im März 2011 zu Recht an, dass ein deutscher Ausstieg keine internationale Aufgabe dieser Technologie bedeutet (Radkau und Hahn, 2013, S. 362f). Da sich die Folgen einer nuklearen Katastrophe weltweit ausbreiten, gewährleistet ein nationaler Ausstieg nicht die Sicherheit dieses Landes. Die Minderung der Gefahr durch Kernkraftwerke ist demnach eine internationale Aufgabe. Des Weiteren bergen die Arbeiten während des Rückbaus, insbesondere für die Arbeiter, eine noch lang andauernde Gefahr. Um die Gefahren ionisierender Strahlung weltweit zu minimieren, müssen Länder, Politiker und Organisationen zusammen arbeiten. Eine unabhängige und aufschlussreiche Untersuchung scheint wegen der verschiedenen Interessen äußerst schwierig zu sein.

4.2 Kritische Würdigung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit bietet einen Gesamtüberblick über die gesundheitlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung und nimmt unter diesem Gesichtspunkt Bezug auf Kernkraftwerke. Dieses Themengebiet ist sehr umfangreich und wurde daher im Rahmen dieser Arbeit in einigen Aspekten nur oberflächlich betrachtet. Für Details muss weitere Literatur herangezogen werden, auf die im Text verwiesen wurde. Es liegen viele Untersuchungen vor, die die Gefahren ionisierender Strahlung auf Tiere und Umwelt betrachten. Diese werden in Berichten von UNSCEAR, WHO und IAEA

vernachlässigt. Das Hauptaugenmerk liegt auf den Folgen für die Menschen. Für einen Gesamtüberblick wäre eine übergreifende Darstellung wünschenswert. Die verschiedenen Organisationen beziehen sich in ihren Veröffentlichungen auf geeignete, wissenschaftliche Paper. Bei Untersuchungen detaillierter Studien muss insbesondere die unterschiedliche Herangehensweise, die Verfügbarkeit von Vergleichsdaten sowie die Interessen der Verfasser beachtet werden. Diese Problematik wurde vor allem bei Literaturrecherchen über Nuklearunfälle deutlich. Für diese Arbeit wurden Veröffentlichungen verschiedener Organisationen herangezogen. Eine kritische Gegenüberstellung soll den Leser für die unterschiedlichen Interessen und Standpunkte sensibilisieren. Die Einschätzungen weichen vor allem bei Dosisabschätzungen sowie dadurch verursachten potenziellen Auswirkungen für Menschen, Tiere und Umwelt voneinander ab. Vertuschungen und Verharmlosungen nach Störfällen oder Katastrophen erschwerten die Untersuchungen und führten zu ungenauen Schätzungen. Trotz dieser Beeinträchtigung für eine lückenlose Aufklärung, kann das Gefahrenpotenzial durch radioaktive Nuklide und ionisierende Strahlung bestätigt werden.

Bisher ungeklärt ist die Dosis-Risikobeziehung für geringe Strahlendosen, da bisherige Ergebnisse in epidemiologischen Studien wissenschaftlich nicht gesichert sind. Wissenschaftler versuchen Kenntnisse bei hohen Dosen auf niedrige zu übertragen und durch zellulär- und molekularbiologische Untersuchungen zu ergänzen. Dennoch liegen im Bereich geringer Strahlendosen abweichende Ergebnisse vor. In aufwendigen und lang andauernden Untersuchungen muss geklärt werden, ob eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert für niedrige Strahlendosen vorliegt. Die Verordnungen des Strahlenschutzes beruhen auf dieser Annahme. Zur Ursachenfindung müssen Forschungsarbeiten über stochastische Strahlenschäden vorangetrieben werden.

Obwohl sich diese Arbeit nur mit den negativen Auswirkungen und gesundheitlichen Gefahren ionisierender Strahlung befasst, existieren durchaus positiven Wirkungen, die bereits in der Medizin genutzt werden. Kauffmann et al. (2013) bieten eine Einführung in die Thematik der Strahlentherapie. Kiefer (2012) weist insbesondere daraufhin, dass Nutzen und Risiko vor einer Behandlung abgewogen werden müssen, um die beste Entscheidung für einen Patienten zu treffen und Krieger (2013) führt einige Radionuklide aus der Medizin auf. Diese überschneiden sich zum Teil mit den Nukliden, von denen in dieser Arbeit die größten Gefahrenpotenziale ausgingen. Um das Risiko abschätzen zu können, müssen neben individuellen Faktoren auch die Möglichkeiten eines nutzbringenden Einsatzes berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- Blettner, Maria; Wicke, Henryk; Schlehofer, Brigitte (2012): Strahlenepidemiologie. In: Public Health Forum (2012), Nr. 76 Bd. 20, S. 13.e1–13.e3. – URL www.journals.elsevier.de/pubhef.
- Fendrik, István; Bors, Jenő (1991): Die nichtparasitären Krankheiten: Strahlenschäden an Pflanzen. In: Rademacher, Bernhard (Hrsg.): Handbuch der Pflanzenkrankheiten Bd. 1. Berlin, Hamburg: Paul Parey, 1991. – ISBN 3-489-76926-0.
- Furukawa, Kyoji; Preston, Dale L.; Lönn, Stefan; Funamoto, Sachiyo; Yonehara, Shuji; Matsuo, Takeshi; Egawa, Hiromi; Tokuoka, Shoji; Ozasa, Kotaro; Kasagi, Fumiyoshi; Kodama, Kazunori; Mabuchi, Kiyohiko (2010): Radiation and Smoking Effects on Lung Cancer Incidence among Atomic Bomb Survivors. In: Radiation Research 174 (2010), Nr. 1, S. 72–82.
- Gloebel, Beowulf; Graf, Christiane (1996): Inkorporationsverminderung für radioaktive Stoffe im Katastrophenfall. In: Bundesamt für Zivilschutz (Hrsg.): Zivilschutzforschung Bd. 22. 1996.
- Gottlöber, P.; Krähn, G.; Bezold, G.; Peter, R. U. (1999): Basal cell carcinomas occurring after accidental exposure to ionizing radiation. In: British Journal of Dermatology 141 (1999), Nr. 2, S. 383–385.
- Gottlöber, P.; Krähn, G.; Peter, R. U. (2000): Das kutane Strahlensyndrom: Klinik, Diagnostik und Therapie. In: Der Hautarzt 51 (2000), Nr. 8, S. 567–574.
- Hagen, Ulrich (1994): Strahlungen. In: Marquardt, Hans (Hrsg.); Schäfer, Siegfried G. (Hrsg.): Lehrbuch der Toxikologie. Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: BI-Wiss.-Verl., 1994, S. 630–649. – ISBN 3-411-16321-6.
- Hauptmanns, Ulrich; Herttrich, Michael; Werner, Wolfgang (1987): Technische Risiken: Ermittlung und Beurteilung: Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1987. – ISBN 3-540-18185-7.
- Herrmann, Albert G. (1983): Radioaktive Abfälle: Probleme und Verantwortung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1983. – ISBN 3-540-12028-9.

- Herrmann, Thomas; Baumann, Michael; Dörr, Wolfgang (2006): *Klinische Strahlenbiologie: Kurz und bündig*. 4., völlig überarb. Aufl. München: Elsevier Urban & Fischer, 2006. – ISBN 978-3-437-23960-1.
- Hill, Hans (1978): *Strahlenschäden an Tieren*. In: Olschowy, Gerhard (Hrsg.): *Natur- und Umweltschutz in der Bundesrepublik Deutschland*. Hamburg, Berlin: Paul Parey, 1978, S. 739–749. – ISBN 3-490-21118-9.
- IAEA - International Atomic Energy Agency; WHO - World Health Organization (1998): *Safety reports series. Bd. 2: Diagnosis and treatment of radiation injuries*. Vienna, 1998. – URL http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P040_scr.pdf. – Zugriffsdatum: 27.03.2016. – ISBN 92-0-100498-2.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection (1987): *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 26*. 1987. – URL http://ani.sagepub.com/content/suppl/2013/06/25/1.3.DC1/P_026_JAICRP_1_3_Recommendations_of_the_ICRP_Alt_Cover_X.pdf.
- Kauffmann, Günter; Sauer, Rolf; Weber, Wolfgang (2013): *Radiologie: Bildgebende Verfahren, Strahlentherapie, Nuklearmedizin und Strahlenschutz*. 4., völlig überarb. Aufl. München: Urban & Fischer Verlag - Lehrbücher, 2013. – ISBN 978-3-437-41417-6
- Kiefer, Jürgen (2012): *Strahlen und Gesundheit: Nutzen und Risiken*. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. – ISBN 978-3-527-41099-6.
- Körblein, A.; Küchenhoff, H. (1997): *Perinatal mortality in Germany following the Chernobyl accident*. In: *Radiation and environmental biophysics* 36 (1997), Nr. 1, S. 3–7.
- Krieger, Hanno (2013): *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*. 2., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer, 2013. – ISBN 978-3-658-00589-4.
- Kröger, Wolfgang; Chakraborty, Sabyasachi (1989): *Tschernobyl und weltweite Konsequenzen*. Köln: Verl. TÜV Rheinland, 1989. – ISBN 3-88585-423-6.
- Laufs, Paul (2013): *Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke: Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. – ISBN 978-3-642-30654-9.

- Mettler, Fred A.; Gus'kova, Angelina K. ; Gusev, Igor (2007): Health effects in those with acute radiation sickness from the Chernobyl accident. In: Health physics 93 (2007), Nr. 5, S. 462–469.
- Mortimer, Charles E. ; Müller, Ulrich (2010): Chemie: Das Basiswissen der Chemie; 128 Tabellen. 10., überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2010. – ISBN 978-3-13-484310-1.
- National Research Council of the National Academies (2006): Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII, Phase 2: Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Board on Radiation Effects Research, Division on Earth and Life Studies. 2006. – URL <http://www.nap.edu/read/11340/chapter/1>.
- Neles, Julia M. (2012): Rückblick – Von den Anfängen bis heute. In: Neles, Julia M. (Hrsg.); Pistner, Christoph (Hrsg.): Kernenergie. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012 (Technik im Fokus), S. 1–19. – ISBN 978-3-642-24328-8.
- Ozasa, Kotaro; Shimizu, Yukiko; Suyama, Akihiko; Kasagi, Fumiyoshi; Soda, Midori; Grant, Eric J. ; Sakata, Ritsu; Sugiyama, Hiromi; Kodama, Kazunori (2012): Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases. In: Radiation Research 177 (2012), Nr. 3, S. 229–243.
- Penkaitis, Norbert (1988): Tschernobyl und Folgen für die sowjetische Landwirtschaft. In: Zentrum für kontinentale Agrar- und Wirtschaftsforschung der Justus-Liebig-Universität Gießen in Verbindung mit der Kommission für Erforschung der Agrar- und Wirtschaftsverhältnisse des europäischen Ostens e.V. (Hrsg.): Giessener Abhandlungen zur Agrar- und Wirtschaftsforschung des europäischen Ostens Bd. 161. Berlin: Duncker & Humblot, 1988. – ISBN 3-428-064-98-4.
- Radkau, Joachim ; Hahn, Lothar (2013): Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft. München: Oekom Verlag, 2013 (Energie & Ressourcen). – ISBN 978-3-86581-315-2.
- Ratschinski, W. (1979): Isotope und Strahlenquellen in der Landwirtschaft. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1979.
- Rodemann, Hans P. (2000): Umweltstrahlung: Grundlagen, biologische Fakten, potentielle Risiken. 1. Aufl. Stuttgart: Klett, 2000 (Naturwissenschaftliche Reihe). – ISBN 3-12-984450-3.

- Ron, Elaine; Wong, F. L.; Mabuchi, Kiyohiko (1995): Incidence of Benign Gastrointestinal Tumors among Atomic Bomb Survivors. In: American Journal of Epidemiology 142 (1995), Nr. 1, S. 68–75. – URL <http://aje.oxfordjournals.org/content/142/1/68.full.pdf>. – Zugriffsdatum: 19.04.2016.
- Rosen, Alex (2012): Effects of the Fukushima nuclear meltdowns on environment and health. 2012. – URL <http://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/FukushimaBackgroundPaper.pdf>.
- Schneider, G.; Burkart, W. (1998): Gesundheitliche Risiken ionisierender Strahlung. In: Der Radiologe (1998), Nr. 38, S. 719–725.
- Schröder, Uwe G.; Schröder, Beate S. (2015): Strahlenschutzkurs für Mediziner. 3., unveränderte Auflage. Stuttgart: Thieme, 2015. – ISBN 978-3-13-139113-1.
- Shimizu, Y.; Kodama, K.; Nishi, N.; Kasagi, F.; Suyama, A.; Soda, M.; Grant, E. J.; Sugiyama, H.; Sakata, R.; Moriwaki, H.; Hayashi, M.; Konda, M.; Shore, R. E. (2010): Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003. In: BMJ 340, b5349 (2010).
- SSK - Strahlenschutzkommission (Hrsg.) (2006): 20 Jahre nach Tschernobyl - Eine Bilanz aus Sicht des Strahlenschutzes: Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. 2006. – URL http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/20Jahre_Tschernobyl.pdf?__blob=publicationFile.
- Steffens, W.; Führ, F.; Mittelstaedt W.; Klaes J.; Förstel H. (1988): Untersuchung des Transfers von 90-Sr, 137-Cs, 60-Co und 54-Mn vom Boden in die Pflanze und der wichtigsten, den Transfer beeinflussenden Bodenparameter: Abschlussbericht des vom BMI geförderten Forschungsvorhabens St. Sch. 702a. 1988
- Straume, T. (1995): High-energy gamma rays in Hiroshima and Nagasaki: implications for risk and WR. In: Health physics 69 (1995), Nr. 6, S. 954–956.
- Thierfeldt, Stefan (1993): Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen: Erfahrungen und Perspektiven. Düsseldorf : Gebr. Tönnies, 1993.
- Thierfeldt, Stefan; Schartmann, Frank (2009): Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen: Erfahrungen und Perspektiven: Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. 3. neu bearb. Aufl. Aachen, 2009.

- Thompson, Desmond E.; Mabuchi, Kiyohiko; Ron, Elaine; Soda, Midori; Tokunaga, Masayoshi; Ochikubo, Sachio; Sugimoto, Sumio; Ikeda, Takayoshi; Terasaki, Masayuki; Izumi, Shizue; Preston, Dale L. (1994): Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumors, 1958-1987. In: Radiation Research 137 (1994), Nr. 2 Suppl, S. 17–67.
- UNSCEAR - United Nations Commission on the Effects of Atomic Radiation (2011a): Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010: Fifty-seventh session, includes scientific report, Summary of low-dose radiation effects on health. 2011.
- UNSCEAR - United Nations Commission on the Effects of Atomic Radiation (2011b): Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes: Volume II: Effects. 2011. – URL http://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076_Report_2008_Annex_D.pdf.
- Vogt, Hans-Gerrit; Schultz, Heinrich (2011): Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. 6., überarb. Aufl. München: Hanser, 2011. – ISBN 978-3-446-42593-4 .
- Volkmer, Martin (2013); Deutsches Atomforum e.V. (Hrsg.): Kernenergie: Basiswissen. 2013.
- Wakeford, R.; Doll, R.; Bithell J. F. (1997): The risk of childhood cancer from low doses of ionizing radiation received in utero. 1997. – URL http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/017/29017388.pdf.
- WHO - World Health Organization (2013): Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami: Based on a preliminary dose estimation. Geneva: WHO, 2013. – ISBN 978-92-4-150513-0.
- Wolling, Jens; Arlt, Dorothee (2014) (Hrsg.): Nachhaltigkeits-, Energie- und Umweltkommunikation. Bd. 2: Fukushima und die Folgen: Medienberichterstattung, Öffentliche Meinung, Politische Konsequenzen. Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2014. – ISBN 978-3-86360-100-3.

Working Paper Series in Production and Energy

recent issues

- No. 7** Tobias Jäger, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Onshore wind energy in Baden-Württemberg: a bottom-up economic assessment of the socio-technical potential
- No. 8** Axel Ensslen, Alexandra-Gwyn Paetz, Sonja Babrowski, Patrick Jochem, Wolf Fichtner:
On the road to an electric mobility mass market - How can early adopters be characterized?
- No. 9** Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im Wettbewerb Energieeffiziente Stadt
- No. 10** Hannes Schwarz, Valentin Bertsch, Wolf Fichtner:
Two-stage stochastic, large-scale optimization of a decentralized energy system – a residential quarter as case study
- No. 11** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:
Development of a multi-energy residential service demand model for evaluation of prosumers' effects on current and future residential load profiles for heat and electricity
- No. 12** Russell McKenna, Erik Merkel, Wolf Fichtner:
Energy autonomy in residential buildings: a techno-economic model-based analysis of the scale effects
- No. 13** Johannes Schäuble, Silvia Balaban, Peter Krasselt, Patrick Jochem, Mahmut Özkan, Friederike Schellhas-Mende, Wolf Fichtner, Thomas Leibfried, Oliver Raabe:
Vergleichsstudie von Systemansätzen für das Schnellladen von Elektrofahrzeugen
- No. 14** Marian Hayn, Valentin Bertsch, Anne Zander, Stefan Nickel, Wolf Fichtner:
The impact of electricity tariffs on residential demand side flexibility
- No. 15** Erik Merkel, Robert Kunze, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Modellgestützte Bewertung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes 2016 anhand ausgewählter Anwendungsfälle in Wohngebäuden
- No. 16** Russell McKenna, Valentin Bertsch, Kai Mainzer, Wolf Fichtner:
Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimisation to develop feasible energy concepts in small communities
- No. 17** Tilman Apitzsch, Christian Klöffler, Patrick Jochem, Martin Doppelbauer, Wolf Fichtner:
Metaheuristics for online drive train efficiency optimization in electric vehicles
- No. 18** Felix Hübner, Georg von Grone, Frank Schultmann: Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU)

Hertzstr. 16
D-76187 Karlsruhe

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Working Paper Series in Production and Energy
No. 19, März 2017

ISSN 2196-7296