

## Studie

Berechnung einer risikoadäquaten Versicherungsprämie zur Deckung  
der Haftpflichtrisiken, die aus dem Betrieb von Kernkraftwerken  
resultieren

Eine Studie im Auftrag des  
**Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE)**

Leipzig, der 01. April 2011

Autoren der Studie:

Dipl.-Wirt.-Inf. Benjamin Günther

Dipl.-Wirtsch.Math. Torsten Karau

Dipl.-Kffr. Eva-Maria Kastner

Dr. Walter Warmuth

Impressum:

**Versicherungsforen Leipzig GmbH**

Querstraße 16, 04103 Leipzig

Tel.: +49 (0) 341 / 1 24 55-0

Fax: +49 (0) 341 / 1 24 55-99

[www.versicherungsforen.net](http://www.versicherungsforen.net)

Geschäftsführer: Dipl.-Kfm. Markus Rosenbaum, Dipl.-Wirt.-Inf. Jens Ringel

Amtsgericht Leipzig HRB 25803

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei der Versicherungsforen Leipzig GmbH.

## Zusammenfassung

Insbesondere aufgrund des nuklearen Unfalls im Kernkraftwerk Fukushima/Japan im März 2011 und der Diskussion um die Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke in Deutschland, ist die Diskussion um die „Restrisiken“, die mit dieser Form der Energiegewinnung einhergehen, neu entfacht. Damit einhergehend stellen sich auch Fragen zur ausreichenden finanziellen Absicherung der Inhaber gegen einen nuklearen Katastrophenfall. Bislang halten die Inhaber<sup>1</sup> entsprechend der gesetzlichen Vorschriften 2,5 Mrd. Euro für mögliche Entschädigungsleistungen, die sich aus Schadenersatzansprüchen aus Stör- und Unfällen eines Kernkraftwerkes ergeben, vor. Zusätzlich stehen ihnen bis 300 Millionen Euro an öffentlichen Mittel der EU zu Verfügung.

Mit der vorliegenden Studie wird die (fiktive) Prämie einer Haftpflichtversicherung für den Schadenfall, der aus einem nuklearen Katastrophenfall auf der Grundlage eines Kernkraftwerk-Stör- oder Unfalls resultiert, ermittelt. Grundlage stellen bereits veröffentlichte Studien zur Eintrittswahrscheinlichkeit und zur möglichen Schadenhöhe dar. Die Autoren beziehen darüber hinaus eigene getroffene Annahmen und daraus resultierende Bewertungen hinsichtlich dieser beiden Faktoren zur Bestimmung eines Risikos in die Berechnungen ein.

Es ergibt sich eine mittlere gesamt zu zahlende Versicherungssumme (Deckungssumme) in Höhe von rund 6.090 Milliarden Euro für einen nuklearen Katastrophenfall. Je nach zugrundgelegter Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Schadenfalls variiert die Höhe der jährlich zu zahlende Prämie zwischen 0,01 Euro und 305,83 Euro. Da eine Bereitstellung der Versicherungssumme nach bspw. 1.000 Jahren aber nicht realistisch wäre, wurden verschiedene Bereitstellungszeiträume angenommen. So wäre bspw. den Berechnungen der Studie zufolge, bei einer Bereitstellung der gesamten Versicherungssumme nach 100 Jahren eine jährliche Versicherungsprämie über den gesamten Zeitraum hinweg in Höhe von 19,5 Mrd. Euro für jedes KKW zu zahlen. Ein solcher Zeitraum ist angesichts der verbleibenden Restlaufzeiten deutscher KKW und normaler Laufzeiten von 25 bis 40 Jahren jedoch nicht als realistisch anzusehen. Kürzere Zeiträume führen allerdings zu einem exponentiellen Anstieg der jährlich zu zahlenden Prämien.

Wären die durch ein solches Schadenereignis verursachten Kosten der Schadenbeseitigung durch die Verbraucher des durch Kernkraft erzeugten Stroms zu zahlen (Internalisierung externer Effekte), ergäbe sich bei Umlage der Kosten bzw. der darauf basierenden Versicherungsprämie für den Bereitstellungszeitraum von 100 Jahren eine Erhöhung der Energiepreise für Atomstrom (netto) für die Dauer von 100 Jahren in einer Spanne von 0,139 Euro je kWh bis zu 2,36 Euro je kWh. Für den Zeitraum einer Bereitstellung innerhalb von zehn Jahren beträgt diese Spanne 3,96 Euro je kWh bis zu 67,3 Euro je kWh.

---

<sup>1</sup> Gesetzlich haftet der Genehmigungsinhaber für Schäden durch nukleare Ereignisse. Daher wird in dieser Studie der Terminus Inhaber und nicht Betreiber verwendet.

Die derzeit zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel zur Absicherung der Risiken eines Kernkraftwerkes reichen, den auf Grundlage vieler Annahmen dargestellten Berechnungen und Szenarien zufolge, in jedem Fall nur für einen kleinen Teil der zu erbringenden Entschädigungszahlungen bei Auftreten eines nuklearen Katastrophenfalls aus. Die darüber hinausgehenden Kosten wären durch den Staat bzw. die Allgemeinheit zu tragen.

# Über die Versicherungsforen Leipzig GmbH

Die Versicherungsforen Leipzig sind eine Ausgründung aus der Universität Leipzig. Seit inzwischen elf Jahren verstehen sich die Versicherungsforen Leipzig als Brücke zwischen Versicherungswissenschaft und Versicherungspraxis, mit dem Ziel, den fachlichen Wissenstransfer insbesondere innerhalb der Versicherungswirtschaft zu fördern und nachhaltig zu unterstützen.

Dabei sind die Versicherungsforen Leipzig der Wissenschaftlichkeit genauso verpflichtet wie dem Anliegen der Praxis, das Wissen anwendungsorientiert zu entwickeln und bereitzustellen. Der Fokus gilt damit Fachthemen,

- die eine hohe Praxisrelevanz für die Assekuranz aufweisen,
- die zukunftsweisend sind und
- die eine hohe Marktbedeutung haben.

Die Mitarbeiter der Versicherungsforen haben eine versicherungswissenschaftliche Ausbildung mit den fachlichen Schwerpunkten Betriebswirtschaft, Recht, Informatik und Mathematik. Sie beschäftigen sich permanent und intensiv mit aktuellen Themen der Branche. Diese wissenschaftliche Interdisziplinarität und der hohe Praxisbezug bilden den Grundstein für die erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Versicherungspraxis. Dies zeigt insbesondere auch das Partnernetzwerk der Versicherungsforen Leipzig mit rund 160 Unternehmen aus der Versicherungsbranche.

Durch die kontinuierliche Forschungs- und Projektarbeit konnten die Versicherungsforen Leipzig besondere Kompetenzen über beinahe alle Wertschöpfungsstufen, z.B. Produktgestaltung und Produktmanagement, Risikomanagement, Vertrieb und Kundenbeziehungsmanagement, Vertrags- und Bestandsmanagement sowie Schaden-/Leistungsmanagement von Versicherungsunternehmen bündeln. Darüber hinaus sind die Versicherungsforen Leipzig spezialisiert auf finanz- und versicherungsmathematische Modelle und deren anwendungsspezifische Realisierung bzw. Simulation. Eine interne Strukturierung in Kompetenzteams „Finanzen und Risikomanagement“, „Prozesse, IT und Organisation“ und „Versicherungsmarketing und Versicherungsvertrieb“ sowie die teamübergreifende Zusammenarbeit innerhalb bestimmter Themenkomplexe erlauben uns, spezialisiertes Fachwissen und Lösungsansätze in jedem Themenfeld zu entwickeln.

Zudem arbeiten nicht nur die Kompetenzteams der Versicherungsforen Leipzig intensiv zusammen. Auch mit den Schwesterunternehmen der Versicherungsforen Leipzig, beispielsweise den Energieforen und den Gesundheitsforen Leipzig, besteht eine themenspezifische intensive Zusammenarbeit, um Lösungen für übergreifende Fragestellungen zu finden. Insbesondere das Team „Analyse und Mathematik“ der Gesundheitsforen Leipzig unter der Leitung von Dr. Walter Warmuth unterstützt durch umfangreiche analytische Verfahren in den Bereichen der Statistik, Ökonometrie, Wahrscheinlichkeitstheorie, Versicherungsmathematik und der stochastischen und prädiktiven Modellierung die unternehmensübergreifenden Projekte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>Gegenstand der Studie</b>	<b>3</b>
<b>1 Begriffsbestimmungen</b>	<b>5</b>
<b>2 Betrieb eines Kernkraftwerkes und sich daraus ergebende Haftungsstrecken</b>	<b>9</b>
<b>3 Dimensionen des Versicherungsschutzes für einen nuklearen Katastrophenfall</b>	<b>17</b>
3.1 Versicherungswissenschaftliche Begriffsbestimmungen des Versicherungsschutzes . . .	18
3.1.1 Versicherung und versichertes Risiko . . . . .	18
3.1.2 Versicherte Gefahren und versicherter Schaden . . . . .	20
3.1.3 Versicherungsprämie . . . . .	21
3.1.4 Kriterien und Grenzen der Versicherbarkeit . . . . .	23
3.2 Anwendung des konzeptionellen Versicherungsschutzes auf einen nuklearen Katastrophenfall . . . . .	26
3.2.1 Katastrophenfall: Versicherung und versicherte Risiken . . . . .	26
3.2.2 Versicherte Gefahren und versicherter Schaden eines nuklearen Katastrophenfalls . . . . .	29
3.2.3 Relevante Annahmen für die Berechnung der Versicherungsprämie . . . . .	33
3.2.4 Abwägung der Kriterien und Grenzen der Versicherbarkeit in Bezug auf einen nuklearen Katastrophenfall . . . . .	36
3.2.5 Zwischenfazit . . . . .	38
<b>4 Existierende Quantifizierungsmethoden für die Abschätzung der Schadenhöhe</b>	<b>39</b>
4.1 Grundlagen der vorhandenen Ansätze . . . . .	39
4.1.1 Grundlagen der Dosis-Wirkungs-Beziehungen radioaktiver Strahlung . . . . .	39

4.1.2	Der Risikokoeffizient zur Beschreibung des Strahlenkrebsrisikos . . . . .	43
4.2	Die frühen Studien . . . . .	44
4.2.1	Olav Hohmeyer 1989 . . . . .	44
4.2.2	Richard Ottinger et. al., Pace-University, New York City, 1990 . . . . .	45
4.2.3	Ewers/Rennings zu den monetären Schäden eines nuklearen Katastrophenfalls in Biblis, 1991 . . . . .	46
4.2.4	Ewers/Rennings zur Abschätzung der Schäden durch einen nuklearen Katastrophenfall, 1992 . . . . .	47
4.3	Aktuelle Quantifizierungsansätze . . . . .	49
4.3.1	Externalities of Energy (ExternE) - A Research Project of the European Commission, 1995 . . . . .	49
4.3.2	Eine Antwort der Bundesregierung auf eine kleine Anfrage zum Thema „Nuklearer Katastrophenfall“, 2010 . . . . .	51
4.3.3	Das Öko-Institut Darmstadt mit einer Analyse des Bedrohungspotenzials „gezielter Flugzeugabsturz“ am Beispiel der Anlage Biblis A, 2007 . . . . .	52
4.3.4	The Other Report on Chernobyl (TORCH), 2006 . . . . .	53
4.3.5	Die Methodenkonvention des Umweltbundesamtes zur ökonomischen Bewertung von Umweltschäden, 2007 . . . . .	53
4.3.6	Abgeleitete eigene Ansätze zur Quantifizierung . . . . .	55
4.4	Eine Übersicht der verwendeten Quantifizierungsansätze . . . . .	57
4.5	Weitere Schadenarten . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Eintrittswahrscheinlichkeit: Bisherige Quantifizierungsmethoden und Einfluss von Szenarien auf einen nuklearen Katastrophenfall</b>	<b>62</b>
5.1	Bisherige Quantifizierungsmethoden der Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls . . . . .	62
5.2	Einbeziehen weiterer Szenarien mit direktem Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls . . . . .	64
5.2.1	Szenario Alterung der KKW . . . . .	64
5.2.2	Szenario eines Terroraktes . . . . .	68
5.2.3	Szenario eines Computervirus . . . . .	73
5.2.4	Szenario menschlichen Versagens . . . . .	74
5.2.5	Szenario eines Erdbebens . . . . .	75
5.3	Zusammenfassung der Schätzungen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten . . . . .	78

---

<b>6 Berechnung der Prämie einer Haftpflichtversicherung für das Risiko „nuklearer Katastrophenfall“</b>	<b>80</b>
6.1 Verwendete Methodik / Beschreibung des Modells . . . . .	80
6.1.1 Aufgabenstellung und Ziele . . . . .	80
6.1.2 Einführung in die Extremwerttheorie . . . . .	81
6.1.3 Wahl der Verteilungsfunktion für das Auftreten von Schadenhöhen . . . . .	83
6.1.4 Ermittlung des Maximalschadens und seiner Erwartung . . . . .	86
6.1.5 Mathematische Grundlagen für die Kalkulation einer Versicherungsprämie .	89
6.2 Anwendung der Methodik . . . . .	90
6.2.1 Schätzung der Verteilung der Schadenhöhen . . . . .	90
6.2.2 Schätzung des erwarteten Maximalschadens und seiner Streuung . . . . .	94
6.2.3 Prämienszenarien . . . . .	95
<b>7 Interpretation der Ergebnisse und Fazit</b>	<b>101</b>
<b>A Zusätzliche Abbildungen Kapitel 1</b>	<b>i</b>
<b>B Zusätzliche Abbildungen Kapitel 4</b>	<b>iv</b>
<b>C Gesichtete Literatur</b>	<b>x</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xxix</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xxxii</b>
<b>Glossar</b>	<b>xxxiii</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	INES-Skala . . . . .	6
2.1	Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung Deutschlands . . . . .	10
2.2	Übersicht über die in Betrieb stehenden KKW in Deutschland . . . . .	11
3.1	Prämien-/Kosten-Modell . . . . .	22
3.2	Schadenverteilung eines nuklearen Katastrophenfalls . . . . .	27
3.3	Schadenarten eines nuklearen Katastrophenfalls . . . . .	31
3.4	Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Veranschaulichung des Sicherheitszuschlags . . . . .	35
4.1	Eingreifrichtwerte für Maßnahmen . . . . .	41
4.2	Mögliche Größen von Umsiedlungsflächen in Folge eines nuklearen Katastrophenfalls . . . . .	51
4.3	Mögliche Schadenhöhen durch Umsiedlungsmaßnahmen in Folge eines nuklearen Katastrophenfalls . . . . .	55
4.4	Sachschäden unter Berücksichtigung von Windrichtungsszenarien für die zwölf KKW-Standorte in Deutschland . . . . .	57
4.5	Für die Berechnung der Versicherungsprämie verwendete Bewertungsgrundlagen . . . . .	58
4.6	Höhen genetischer Schäden . . . . .	59
4.7	Schadenhöhen nicht-tödlicher Krebserkrankungen . . . . .	59
4.8	Schadenhöhen tödlicher Krebserkrankungen . . . . .	60
5.1	In Betrieb stehende KKW in Deutschland und ungefähre Anzahl meldepflichtiger Ereignisse . . . . .	65
5.2	Entwicklung der Anzahl an Bauteileffekten in den KKW Deutschlands . . . . .	66
5.3	Erdbeben in Deutschland in den Jahren 800 - 2010 . . . . .	77
5.4	Übersicht über alle in Kapitel 5 erhobenen Eintrittswahrscheinlichkeiten . . . . .	79

---

6.1	Wahrscheinlichkeiten für Schadenhöhen, wenn ein nuklearer Katastrophenfall eingetreten ist . . . . .	83
6.2	Graph der Dichte einer allgemeinen Betaverteilung . . . . .	86
6.3	verschiedene $n$ -te Potenzen der allgemeinen Betaverteilung . . . . .	88
6.4	Darstellung der Schadenssummen, des Erwartungswertes und der Streuung . . . . .	92
6.5	Kandidaten für den erwarteten Maximalschaden und seine Streuung . . . . .	95
6.6	Darstellung der je KKW und Jahr zu zahlenden Prämienhöhen bei Bereitstellung der Deckungssumme am Ende des Kalkulationszeitraums . . . . .	96
6.7	Jahresprämien in Abhängigkeit der verschiedenen Zeiträume für die Bereitstellung der gesamten Deckungssumme . . . . .	97
6.8	Darstellung der Netto-Aufschläge auf den Strompreis für Atomstrom unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien . . . . .	100
A.1	Beschreibung der INES-Stufen . . . . .	ii
A.2	Regelwerkspyramide: Hierarchie der nationalen Quellen, die Behörde oder Institution, die sie erlässt, sowie ihre Verbindlichkeit . . . . .	iii
B.1	Windhäufigkeit je Hauptwindrichtung . . . . .	v
B.2	Schadenhöhen durch Umsiedlungsmaßnahmen . . . . .	vi
B.3	Gesamte Schadenhöhen je KKW Teil 1 . . . . .	viii
B.4	Gesamte Schadenhöhen je KKW Teil 2 . . . . .	ix

# Einleitung

Am 11. März 2011 bebte die Erde mit einer Magnitude von 9,0 vor der Pazifik-Küste von Japan. Es war damit das größte je gemessene Erdbeben in Japan. Das Epizentrum lag etwa 370 km nordöstlich von Tokio und 130 km östlich von Sendai. Dieses Beben löste an den Küsten vor Sendai und Sanriku einen Tsunami mit bis zu zehn Meter hohen Wellen aus. Am Kernkraftwerk Fukushima war die Flutwelle zwar nur sieben Meter hoch, jedoch waren die dortigen Schutzwälle nur für eine maximale Wellenhöhe von 5,70 m ausgelegt. Die Reaktorblöcke 1 bis 3 wurden unmittelbar nach dem Beben durch das Reaktorschutzsystem schnellabgeschaltet, wegen Wartungsarbeiten waren die Blöcke 4 bis 6 bereits heruntergefahren. Die Stromversorgung wurde auf dieselbetriebene Notstromaggregate umgeschaltet, deren unmittelbar am Meer stehenden Treibstofftanks jedoch vom Tsunami zerstört wurden. Auch die Stromversorgung mittels Batterien fiel durch die Beeinträchtigung der gesamten elektrischen Anlage nach kurzer Zeit aus. Durch die fehlende Kühlung kam es zu einem starken Temperaturanstieg der Reaktorkerne und sämtlicher Abklingbecken sowie zur Beschädigung von Brennelementen. Bei der Aufspaltung des erhitzten Kühlwassers in einer Reaktion mit dem Zirkonium der Brennstabhüllen entstand Wasserstoff, das Auslöser mehrerer Explosionen und Brände war. Dadurch wurden die Reaktorgebäude 1 bis 4 erheblich beschädigt. Radioaktive Partikel und Strahlung wurden freigesetzt.

Es zeichnet sich bereits jetzt [Stand: 01.04.2011] ab, dass für einen Großteil der verursachten Schäden infolge der Freisetzung von Radioaktivität der japanische Staat bzw. der japanische Steuerzahler eintreten muss.<sup>2</sup> Die Kosten sich realisierender Risiken, die sich aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie ergeben und die nach dem Grundsatz der bestmöglichen Gefahrenabwehr und Risikoversorge als praktisch ausgeschlossen und daher als hypothetisch galten, werden somit in großen Teilen sozialisiert.

In Deutschland gilt die Verkettung solcher Umstände, wie sie sich in Japan ereigneten, als ausgeschlossen. Dennoch gab es seit dem Bau der ersten Kernkraftwerke auch in Deutschland eine Vielzahl neuer Erkenntnisse über bestehende und neue Risiken, die nicht oder nur unzureichend in eine gesellschaftliche Debatte zum Umgang mit diesen Entwicklungen mündeten. Vor allem die Anschläge auf das World Trade Center am 11. September 2001 verdeutlichen das bislang für unrea-

---

<sup>2</sup> [Obiko Pearson/Bandel 2011].

listisch betrachtete Terrorrisiko, gegen das etliche der in Deutschland betriebenen Kernkraftwerke nicht oder nur unzureichend gesichert sind.

Mit Beginn der Studiererstellung im Januar 2011 war nicht abzusehen, dass die Diskussion um die Nutzung der Kernenergie durch die Ereignisse des 11. März 2011 in Japan eine völlig neue Dimension erreichen würde. Noch am 28. Oktober 2010 verabschiedete der Bundestag eine Laufzeitverlängerung deutscher Kernkraftwerke in der Form, dass die Betriebszeiten der vor 1980 in Betrieb gegangenen sieben Anlagen um acht Jahre und die der zehn übrigen Kernkraftwerke um 14 Jahre verlängert wurden. Dies wurde mit der Funktion der Kernenergie als Brückentechnologie zum Aufbau einer nachhaltigen Stromversorgung begründet.

In der Vergangenheit gab es bereits etliche Untersuchungen zu möglichen Schadenhöhen, die aus einer Freisetzung großer Mengen von Radioaktivität in Folge eines nuklearen Katastrophenfalls resultieren können. Eine Versicherbarkeit dieser Schadenssummen, die nach einer Schätzung<sup>3</sup> aus dem Jahr 1991 mit bis zu 10 Billionen DM angegeben wurden, durch die private Versicherungswirtschaft wurde immer ausgeschlossen.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, auf der Grundlage einer Analyse bereits bestehender Arbeiten zur Quantifizierung von Höchstschäden eine Spannbreite möglicher Schadenhöhen zu erstellen und daraus eine Versicherungsprämie zu berechnen, die pro Kernkraftwerk für die Deckung möglicher Haftpflichtrisiken eines nuklearen Katastrophenfalls zu zahlen wäre. Vor allem die Öffentlichkeit soll somit über die Größenordnung einer fiktiven Versicherungsprämie für die Nutzung von Kernenergie informiert werden, da Informationen über von der Gesellschaft zu tragende Kosten, die sich nicht in den Preisen für die Nutzung eines Energieträgers widerspiegeln, eine wichtige Grundlage zur Bewertung alternativer Energiequellen darstellen. Nur wenn eine hinreichende Transparenz über mögliche so genannte externe Kosten besteht, kann eine Entscheidung im Sinne der Nachhaltigkeit getroffen werden.

---

<sup>3</sup> Vgl. [Ewers/Rennings 1992 b].

# Gegenstand der Studie

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie e.V. (BEE) eigenständig durch die Versicherungsforen Leipzig GmbH erstellt. Die in der Studie enthaltenen Informationen beruhen auf öffentlich zugänglichen Quellen, die von den Versicherungsforen Leipzig als zuverlässig erachtet wurden. Insbesondere übernehmen die Versicherungsforen Leipzig keine Garantie für die Richtigkeit oder Vollständigkeit der in den Studien enthaltenen Informationen. Die Auswahl der Quellen erfolgte allein durch die Versicherungsforen Leipzig. Die von den Autoren der verwendeten Studien geäußerten Meinungen sind nicht notwendigerweise identisch mit der Meinung der Versicherungsforen Leipzig. Die Versicherungsforen Leipzig sehen sich insbesondere der Wissenschaft verpflichtet; und sind unabhängig von politischen Parteien oder Interessengruppen.

Ziel der Untersuchung ist es, auf der Grundlage vorhandener Abschätzungen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten und Schadenausmaßen nuklearer Katastrophenfälle mit großer Freisetzung, eine adäquate Versicherungsprämie zur Deckung der sich für diesen Fall ergebenden Schäden zu berechnen. Die Einheit der Häufigkeiten ist dabei die Anzahl der Ereignisse pro Zeiteinheit und die Einheit der Schäden der Geldwert der zu zahlenden Versicherungssummen. Da nicht alle Schadenarten wie zum Beispiel Gesundheitsschäden eindeutig quantifiziert werden können, werden eine Reihe von Risikokenngrößen herangezogen, die weniger versicherungsorientiert sind. In der Diskussion um die Kernenergie hat in den zurückliegenden Jahren der Begriff der „externen Kosten“ eine wichtige Rolle als Risikokenngröße gespielt.

Ausgehend von Ausführungen zu generellen Aspekten der Versicherungswissenschaft werden in Kapitel 3 die Anwendbarkeit des Versicherungsgedankens sowie die Kriterien und Grenzen der Versicherbarkeit zunächst allgemein erklärt und dann am Beispiel eines nuklearen Katastrophenfalls erörtert. Anschließend werden in Kapitel 4 nach der Darlegung von Grundlagen vorhandene Quellen zu Quantifizierungsansätzen untersucht sowie deren Limitierungen erläutert. In Ergänzung zu den vorhandenen Ansätzen wurden eigene Abschätzungen vorgenommen, die im Anschluss kurz vorgestellt werden.

In Kapitel 5 wird zu Beginn die Bandbreite von in der Literatur genannten Eintrittswahrscheinlichkeiten dargestellt. Nachfolgend werden Szenarien beschrieben, die nach Auffassung der Verfasser signifikanten Einfluss auf die ursprünglich angenommenen Häufigkeiten katastrophaler Ereignisse

haben. Daraus werden Modifikationen dieser Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeleitet. Kapitel 6 besteht zum Einen aus einer formalen Beschreibung des im Folgenden zur Berechnung der Versicherungsprämie verwendeten Modells und zum Anderen aus der Berechnung selbst, wobei die erhobenen Werte aus Kapitel 3 und 5 in diese Berechnungen einfließen.

Eine abschließende Interpretation der errechneten Werte erfolgt in Kapitel 7.

# Kapitel 1

## Begriffsbestimmungen

In diesem Kapitel werden relevante Begriffe, die im Rahmen der Studie von Bedeutung sind, einführend definiert bzw. erklärt. Dabei handelt es sich um:

- nukleare Ereignisse,
- International Nuclear Event Scale (Kurz: INES),
- Störfall und Unfall,
- GAU und nuklearer Katastrophenfall.

Der Betrieb eines Kernkraftwerkes (KKW) kann durch verschiedene Ereignisse beeinträchtigt werden. Zur Absicherung anzunehmender Ereignisabläufe müssen die Betreiber eines KKW gemäß gesetzlicher und aufsichtsrechtlicher Vorgaben, wie bspw. der Strahlenschutzverordnung, Sicherheitsvorkehrungen treffen und Notfallschutzmaßnahmen planen.<sup>4</sup>

Die Ereignisse können einerseits aus dem allgemeinen Betrieb eines Kraftwerkes und andererseits aus der Verwendung der Kernenergie resultieren. Die aufgrund der Verwendung von Kernenergie auftretenden Ereignisse werden als nukleare Ereignisse bezeichnet. Ein nukleares Ereignis wird definiert als „jedes einen nuklearen Schaden verursachendes Geschehnis oder jede Reihe solcher aufeinanderfolgender Geschehnisse desselben Ursprungs“<sup>5</sup>. Nukleare Schäden umfassen solche an Menschen, der Umwelt und Vermögenswerten.<sup>6</sup>

Um speziell eingetretene nukleare Ereignisse bewerten zu können, entwickelten Experten der International Atomic Energy Agency (IAEA) und Nuclear Energy Agency of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD/NEA) 1989 eine Skala - die „International Nuclear

---

<sup>4</sup> Siehe hierzu [BMU 2008 b].

<sup>5</sup> Siehe hierzu [Europäische Kommission 2003] S. 0032 - 0040.

<sup>6</sup> Siehe hierzu Kapitel 3.1.2.

Event Scale“, kurz INES. Die INES besteht aus sieben Stufen. Laut INES können nukleare Ereignisse in „Störfälle“ und „Unfälle“ eingeteilt werden. Die untersten drei Stufen sind Schweregrade für Ereignisse, die dem Sachverhalt „Störung bzw. Störfall“ zugeordnet werden, während die darüber hinausgehenden Ereignisabläufe in den Stufen vier bis sieben den Sachverhalt „Unfall“ bezeichnen. Ereignisse, die keine oder nur geringe sicherheitstechnische Bedeutung haben, werden in keiner Stufe erfasst bzw. der Stufe Null zugeordnet.<sup>7</sup> Im Leitfaden der INES werden die Bewertungskriterien zur Zuordnung der Ereignisabläufe dargestellt. Dabei dient ein Kriterienkatalog, der radiologische Auswirkungen innerhalb und außerhalb der Anlage des KKW und Beeinträchtigungen der Sicherheitsvorkehrungen abfragt, der Einordnung der Ereignisse.<sup>8</sup>

Die folgende Abbildung veranschaulicht diese INES-Einteilung der Ereignisse in Störfälle und Unfälle.

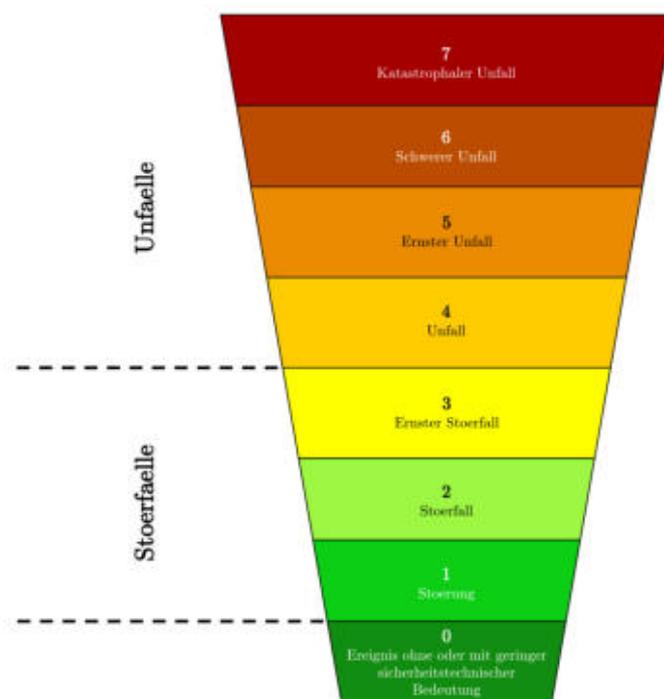


Abbildung 1.1: INES-Skala (Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [IAEA b] S. 1)

Der Strahlenschutzverordnung gemäß ist ein Störfall legaldefiniert als ein „Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Betrieb der Anlage oder die Tätigkeit aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann und für den die Anlage auszulegen ist [bezüglich einzurichtender Sicher-

<sup>7</sup> Auch die Gesellschaft für Reaktorsicherheit greift diese Einteilung der Ereignisse in Störfälle und Unfälle auf. Siehe hierzu: [GRS].

<sup>8</sup> Abbildung A.1 in Anhang A veranschaulicht die gesamte Bewertung.

heitssysteme] oder für den bei der Tätigkeit vorsorglich Schutzvorkehrungen vorzusehen sind.“<sup>9</sup> Als Unfall wird dann ein Störfall bezeichnet, bei dem es zu einer Freisetzung radioaktiver Strahlung von mehr als 50 Millisievert<sup>10</sup> kommt (effektive Dosis).<sup>11</sup>

Das KKW muss gegen den größten anzunehmenden Unfall (GAU) sicherheitstechnisch ausgelegt sein, um seine Betriebsgenehmigung zu erhalten.<sup>12</sup> Der Betreiber muss demnach dafür Sorge tragen, geeignete und funktionstüchtige Sicherheitssysteme und -maßnahmen vorzuhalten, die einem GAU standhalten und nukleare Schäden verhindern. Daher wird dies oft auch als Auslegungsstörfall bzw. -unfall bezeichnet. Der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik, verankert in den Sicherheitskriterien und Leitlinien für Kernkraftwerke<sup>13</sup>, gibt dabei Hinweis darauf, welche Unfälle beherrscht werden müssen.<sup>14</sup>

Ein nukleares Ereignis, das einen nuklearen Katastrophenfall auslöst, ist ein nuklearer Unfall, der das Maß überschreitet, das ein Kernkraftwerk sicherheitstechnisch und mit geeigneten Notfallmaßnahmen gerade noch beherrschen kann. Ein nuklearer Katastrophenfall ist daher ein auslegungsüberschreitender Unfall und damit gleichsam eine Realisation des verbleibenden Restrisikos. Mit Restrisiko wird das Risiko bezeichnet, das die getroffenen Sicherheitsvorkehrungen übersteigt bzw. das bei deren Aufstellung nicht mit berücksichtigt und bewusst oder unbewusst eingegangen wurde.<sup>15</sup> In der Presse wird der nukleare Katastrophenfall oft mit dem Begriff Super-GAU bezeichnet; der Zusatz „Super“ deutet an, dass dieser Unfall über einen GAU hinausgehende Auswirkungen nach sich zieht. Im Rahmen der hier vorliegenden Studie wird jedoch der Begriff nuklearer Katastrophenfall für ein solches Ereignis gewählt, der sich an den vorher erläuterten Begriffen „nukleares Ereignis“ und der Beschreibung der INES-Stufe 7 „katastrophaler Unfall“ orientiert. Zudem verwendet auch die Bundesregierung diese Begrifflichkeit.<sup>16</sup>

Oft wird der nukleare Katastrophenfall auch mit dem Begriff Kernschmelzunfall gleichgesetzt, was damit begründet wird, dass größere Mengen radioaktiver Stoffe erst freigesetzt werden können,

<sup>9</sup> § 3 Abs. 2 Nr. 28 StrlSchV.

<sup>10</sup> Sievert (Sv) ist die spezielle Einheit der Äquivalentdosis und der effektiven Dosis. Diese ergibt sich aus  $Joule/Kg = 1$  Sievert. Ein Sievert entspricht 1.000 Millisievert (mSv). Dabei ist die Äquivalentdosis die Messgröße für die biologische Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen. Die effektive Dosis berücksichtigt die verschiedenen Empfindlichkeiten der Organe und Gewebe bezüglich stochastischer Strahlenwirkungen durch die Multiplikation spezifizierten Organdosen mit einem Gewebe-Wichtungsfaktor.

<sup>11</sup> Siehe hierzu: § 3 Abs. 2 Nr. 35 StrlSchV „Unfall: Ereignisablauf, der für eine oder mehrere Personen eine effektive Dosis von mehr als 50 Millisievert zur Folge haben kann“. Im Vergleich hierzu § 5 Satz 2: „Die Grenzwerte der effektiven Dosis im Kalenderjahr betragen nach § 46 Abs. 1 für den Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung 1 Millisievert und nach § 55 Abs. 1 Satz 1 für den Schutz beruflich strahlenexponierter Personen bei deren Berufsausübung 20 Millisievert.“

<sup>12</sup> Vgl. hierzu § 9 Abs. 1 Nr. 4 und 5 StrlSchV.

<sup>13</sup> Siehe hierzu Abbildung A.2 in Anhang A.

<sup>14</sup> Vgl. [Ewers/Rennings 1992 a].

<sup>15</sup> Vgl. [Ewers/Rennings 1992 a].

<sup>16</sup> Vgl. [Bundesregierung 2010 a] S.1.

wenn der Reaktorkern schmilzt.<sup>17</sup> Dennoch bedingt ein Kernschmelzunfall nicht unbedingt einen nuklearen Katastrophenfall, da es nicht zwangsläufig zu einer mengenmäßig großen Freisetzung an radioaktivem Material kommen muss. Dies lässt sich beispielweise mit dem Unfall im Kernkraftwerk Three Mile Island, Harrisburg, im Jahre 1979 verdeutlichen.<sup>18</sup>

Ein nuklearer Katastrophenfall erfordert „Dringlichkeitsmaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung und somit Maßnahmen des Katastrophenschutzes zur Verhütung oder Reduzierung der Strahlenexposition“<sup>19</sup>.

Ein weiterer Grund, warum sich die vorliegende Studie nicht an der Bezeichnung Kernschmelzunfall orientiert, ist der, dass man damit bereits einen Unfall ab INES-Stufe 5 als nuklearen Katastrophenfall klassifizieren müsste, da es bereits auf dieser Stufe zur Kernschmelze kommt. Weil in diesem Fall aber, wie bereits beschrieben, noch Möglichkeiten bestehen, diesen Unfall durch Notfallmaßnahmen zu beherrschen bzw. die Auswirkungen gegenüber der Umwelt einzugrenzen, wird in der Wissenschaft generell erst ab Stufe 7 von einem nuklearen Katastrophenfall gesprochen. Bei einem Unfall, der dieser Stufe zugeordnet wird, kommt es zu einem katastrophalen Unfall, d.h. in weiten Gebieten zu schweren Schäden der menschlichen Gesundheit und der Umwelt durch eine große Freisetzung radioaktiven Materials, die nicht durch die vorhandenen Notfallmaßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen hätten verhindert werden können.<sup>20</sup>

Verdeutlicht werden kann diese Abgrenzung durch die Ereignisse in den KKW Three Mile Island (Harrisburg) und Tschernobyl. Der Unfall in den USA wurde der Stufe 5 zugeordnet und zählt somit nicht als nuklearer Katastrophenfall, während der in Tschernobyl in Stufe 7 eingeordnet wird.<sup>21</sup>

Die folgenden Kapitel zur Ermittlung der Haftpflichtversicherungsprämie beziehen sich ausschließlich auf das Haftungsrisiko des KKW-Inhabers im Fall eines nuklearen Katastrophenfalls, der einen Höchstschaden auslöst. Dessen Ausmaß bestimmt die Höhe des Schadenersatzes; hinzu kommt eine Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Höchstschadens. Diese Faktoren fließen in die Bestimmung der Höhe der resultierenden Versicherungsprämie für das Haftpflichtrisiko ein.

---

<sup>17</sup> Vgl. [Ewers/Rennings 1992 a] und Definition und Ausführungen von Kernschmelzunfällen in [GRS 1989].

<sup>18</sup> Bei diesem Ereignis schmolz ca. ein Drittel des Reaktorkerns, dennoch konnten die Mitarbeiter durch richtiges Interagieren schlimmere Auswirkungen verhindern. Es kam zur Freisetzung radioaktiver Gase und Kühlliquidität in die Umwelt. Vgl. [Spiegel-Online 2009]. Der Fall im KKW Three Mile Island wurde aber nicht als nuklearer Katastrophenfall eingestuft. Siehe hierzu: [Spiegelberg Planer 2010], S. 16 ff.

<sup>19</sup> [Bundesregierung 2010 a], S. 1.

<sup>20</sup> Vgl. [Weil 2003], S. 35. Auch die Bundesregierung ordnet einen nuklearen Katastrophenfall der INES-Stufe 7 zu. Siehe hierzu [Bundesregierung 2010 b], S. 1.

<sup>21</sup> Vgl. [Spiegelberg Planer 2010], S. 16 ff.

## Kapitel 2

# Betrieb eines Kernkraftwerkes und sich daraus ergebende Haftungsstrecken

Ein Kernkraftwerk ist ein Wärmekraftwerk, das der Erzeugung elektrischen Stroms mittels Kernenergie dient. Vereinfacht beschrieben wird dabei das heiße Wasser oder der Dampf, der für den Antrieb der Turbinen zur Energieerzeugung in der Anlage benötigt wird, durch kontrollierte Spaltung der Atomkerne von angereichertem Uran oder Thorium erzeugt. Dieser Vorgang findet in einem Reaktor statt. Dabei treten im Reaktorkern sowohl eine hohe Energiedichte als auch radioaktive Strahlung auf.

### *Bedeutung der Stromerzeugung durch KKW in Deutschland*

In Deutschland existieren derzeit 17 Kernkraftwerke mit einer Gesamtbruttolistung von 21.517  $MW_e$  (Potenzial) und einer Stromerzeugung i.H.v. rund 140,6 Mrd. kWh (im Jahr 2010, brutto).<sup>22</sup>

Der durch Kernenergie erzeugte Strom macht in Deutschland einen nicht unerheblichen Teil der gesamten in Deutschland verbrauchten Menge an Primärenergie aus. Im Jahr 2010 hatte die Kernenergie einen Anteil am gesamten Energieverbrauch von ca. 22,6 Prozent.<sup>23</sup> In Abbildung 2.1 wird jeweils der Anteil der Energieträger am Primärenergieverbrauch dargestellt.

### *Einteilung der KKW-Typen hinsichtlich der Art der Reaktorkühlung und der Stromerzeugung*

---

<sup>22</sup> Siehe hierzu Abbildung 2.2.  $MW_e$  bedeutet MegaWatt electrical und gibt die Leistung des Kernkraftwerks in Bezug auf dessen Erzeugung elektrischer Energie wieder.

<sup>23</sup> Siehe hierzu [AGEB 2011 a], S. 23.

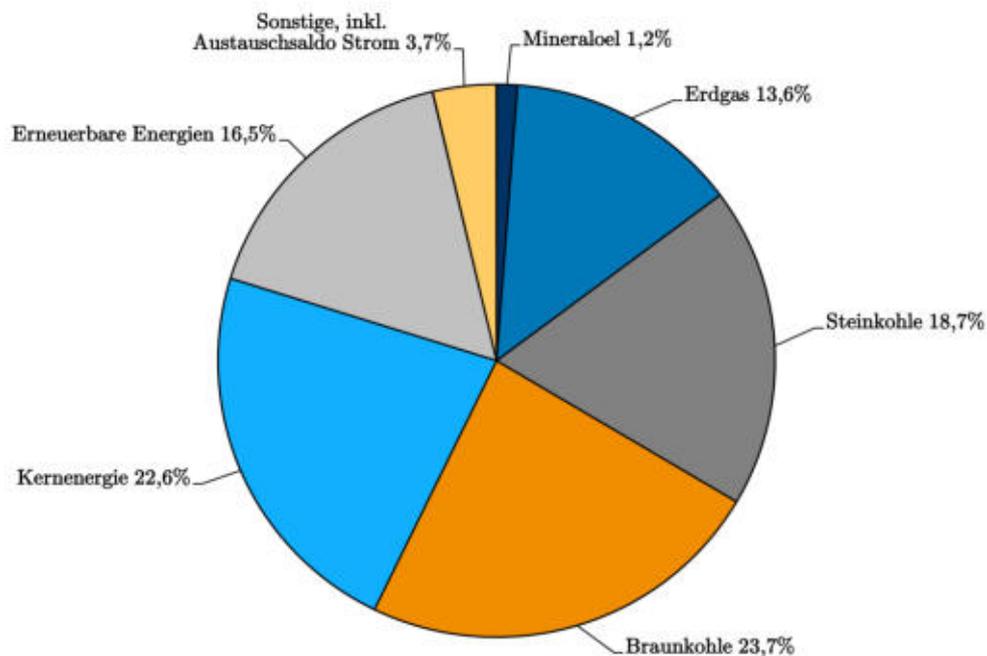


Abbildung 2.1: Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung Deutschlands (Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [AGEB 2011 a] S.24)

Hinsichtlich der eingesetzten Kühlungstechnik handelt es sich bei allen in Deutschland betriebenen Kernkraftwerken um Leichtwasserreaktoren, bei denen die Brennstäbe in den Reaktoren durch Wasser gekühlt werden. Hinsichtlich der Technik der Stromerzeugung sind elf der KKW dem Typ der Druckwasserreaktoren (DWR)<sup>24</sup> zuzuordnen, während die restlichen KKW Siedewasserreaktoren (SWR)<sup>25</sup> sind.<sup>26</sup>

Diese Reaktortypen unterscheiden sich dadurch, dass bei den Siedewasserreaktoren durch Verdunsten des Kühlwassers entstehender Wasserdampf direkt zum Antrieb der Turbinen genutzt wird, während bei den Druckwasserreaktoren das Wasser durch den vorherrschenden Druck nicht verdampft, sondern das im flüssigen Aggregatzustand bleibende Wasser einen weiteren Wasserkreislauf anheizt und der dabei entstehende Dampf die Turbinen antreibt.<sup>27</sup>

Zur Zuordnung der Kernkraftwerke siehe Abbildung 2.2. Diese stellt alle in Deutschland betriebenen

<sup>24</sup> Hierzu zählen die Kernkraftwerke Biblis A und B, Brokdorf, Emsland, Grafenrheinfeld, Grohnde, Isar 2, Neckarwestheim 1 und 2, Philippsburg 2 und Unterweser.

<sup>25</sup> Hierzu zählen die Kernkraftwerke Gundremmingen B und C, Isar 1, Philippsburg 1, Krümmel und Brunsbüttel.

<sup>26</sup> Vgl. [Deutsches Atomforum e.V.].

<sup>27</sup> Vgl. [Informationskreis KernEnergie]. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise eines Druckwasserreaktors siehe [GRS 1989], S. 109 ff. Weitere Ausführungen zur Funktionsweise verschiedener Typen von Kernkraftwerken in [Konstantin 2007], S. 242 ff.

nen KKW dar.<sup>28</sup>

Nr.	Name	Reaktortyp	Betreiber	Standort	Leistung MWe	Stromerzeugung GWh, brutto, 2010	Jahr der Inbetriebnahme (Elektrikalität)	Betriebsjahre (bis einschl. 2009)
1	Neckarwestheim 1	DWR	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Neckarwestheim (BW)	840	2.208	1976	34
2	Neckarwestheim 2	DWR	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Neckarwestheim (BW)	1.400	10.874	1988	22
3	Philippsburg 1	SWR	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Philippsburg (BW)	926	6.791	1979	31
4	Philippsburg 2	DWR	EnBW Kernkraft GmbH (EnKK)	Philippsburg (BW)	1.468	11.797	1984	26
5	Grafenrheinfeld	DWR	E.ON Kernkraft GmbH	Grafenrheinfeld (BY)	1.345	7.938	1981	29
6	Gundremmingen B	SWR	Kernkraftwerk Gundremmingen GmbH	Gundremmingen (BY)	1.344	9.954	1984	26
7	Gundremmingen C	SWR	Kernkraftwerk Gundremmingen GmbH	Gundremmingen (BY)	1.344	10.036	1984	26
8	Isar 1	SWR	E.ON Kernkraft GmbH	Eisenbach (BY)	912	6.543	1977	33
9	Isar 2	DWR	E.ON Kernkraft GmbH	Eisenbach (BY)	1.485	12.007	1988	22
10	Biblis A	DWR	RWE Power AG	Biblis (HE)	1.225	5.042	1974	36
11	Biblis B	DWR	RWE Power AG	Biblis (HE)	1.300	10.306	1976	34
12	Emsländ	DWR	Kernkraftwerk Lippe-Ems GmbH	Lünen (NI)	1.400	11.560	1988	22
13	Grohnde	DWR	E.ON Kernkraft GmbH	Grohnde (NI)	1.430	11.417	1984	26
14	Unterweser	DWR	E.ON Kernkraft GmbH	Eenshaum (NI)	1.410	11.239	1978	32
15	Brokdorf	DWR	E.ON Kernkraft GmbH	Brokdorf (SH)	1.480	11.945	1986	24
16	Brunsbüttel	SWR	Kernkraftwerk Brunsbüttel GmbH & Co. oHG	Brunsbüttel (SH)	806	0	1976	34
17	Krümmeel	SWR	Kernkraftwerk Krümmeel GmbH & Co. oHG	Krümmeel (SH)	1.402	0	1983	27
	Summe				21.517	140.557		

Abbildung 2.2: Übersicht über die in Betrieb stehenden KKW in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [BMU 2010] und [Paulitz 2010])

#### *Wertschöpfungsbereiche eines KKW*

Das Betreiben eines KKW inklusive Zwischen- und Endlagerung der Brennstäbe kann in folgende verschiedene Wertschöpfungsbereiche unterteilt werden.

- Bau der KKW,
- Erschließung und Abbau des Urans/Thoriums,
- Herstellung von Brennelementen,
- Aufnahme und Einlagerung von Brennelementen und Anlagenteilen,
- Betrieb der KKW,
- Zwischenlagerung/Endlagerung zerlegter Brennelemente und endzulagernder Anlagenteile im KKW,

<sup>28</sup> Diese Gesamtzahl bezieht sich auch auf die sieben ältesten KKW (vor 1980 in Betrieb genommen), ungeachtet des zur Zeit der Studiererstellung im März 2011 bestehenden Moratoriums, aufgrund dessen diese KKW ihren Betrieb zunächst temporär einstellen mussten.

- Transport von Brennelementen und endzulagernder Anlagenteile,
- Zwischenlagerung/Endlagerung zerlegter Brennelemente und endzulagernder Anlagenteile außerhalb des KKW,
- Rückbau der KKW.

In jedem dieser einzelnen Wertschöpfungsbereiche besteht das Risiko nuklearer Ereignisse, die bei Eintritt Schäden nicht nur am KKW selber, sondern insbesondere auch an der das KKW umgebenden Umwelt (im Sinne von Menschen, Infrastruktur, Flora und Fauna) verursachen können. Für den finanziellen Schadenersatz sollte eine verantwortliche (juristische) Person identifiziert und haftbar gemacht werden.

#### *Die aktuelle Haftungssituation und Deckungsvorsorge der KKW-Inhaber in Deutschland*

Für alle „nuklearen Schäden“<sup>29</sup> im Rahmen des KKW-Betriebs, d.h. in denen es zur Beschädigung der Um Systeme kommt, haftet allein der Inhaber des KKW.<sup>30</sup> Anlagenbauer oder Zulieferer sind von der Haftung nicht betroffen.<sup>31</sup> Die Haftungspflicht entspricht generell einer strikten Gefährdungshaftung, d.h. es kommt bei einem Schaden nicht auf dessen Widerrechtlichkeit oder Verschulden des Inhabers an.<sup>32</sup> Der Inhaber eines KKW haftet unbegrenzt und unabhängig vom Verschulden gegenüber Schadenersatzforderungen Dritter<sup>33</sup>, d.h. er muss Dritten gegenüber Schadenersatz leisten. Darin eingeschlossen sind auch bspw. Kosten für die kurzfristige Evakuierung und die Umsiedlung der Bevölkerung im Umkreis betroffener KKW.<sup>34</sup> Von den Schadenersatzverpflichtungen ausgenommen sind Schäden an der Kernanlage an sich, an anderen Kernanlagen, die sich auf dem gleichen Gelände befinden sowie an den Vermögenswerten, die sich auch auf dem Gelände befinden und im Zusammenhang mit dem KKW verwendet werden (sollen).<sup>35</sup> Die Inhaber der KKW sind von der Haftung generell ausgeschlossen, wenn der Schaden direkt durch einen bewaffneten Konflikt, Krieg und andere Feindseligkeiten oder einen Aufstand verursacht wird.<sup>36</sup>

Die in der Realität faktische Haftungsleistung der Inhaber wird aber aufgrund der Vorschriften des Atomgesetzes begrenzt. Diesen zufolge muss der Inhaber eines KKW zur Erfüllung seiner gesetzlichen Schadenersatzverpflichtungen eine Deckungsvorsorge in Höhe von 2.500 Mio. Euro pro

---

<sup>29</sup> Der Begriff „nuklearer Schaden“ wird in Art. 1 Abs. a Ziffer (vii) des Protokolls der Änderungen des Pariser Übereinkommens (2004) definiert. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 3.2.2.

<sup>30</sup> Vgl. § 31 Abs. 3 AtG.

<sup>31</sup> Vgl. § 31 Abs. 3 AtG und [Diekmann/Horn 2007], S. 49.

<sup>32</sup> Vgl. § 25 AtG.

<sup>33</sup> Vgl. § 31 AtG.

<sup>34</sup> Vgl. [Bundesregierung 2010 a], S. 7.

<sup>35</sup> Vgl. Art. 3 Abs. a des Protokolls der Änderungen des Pariser Übereinkommens (2004) und § 31 AtG. Für die Versicherung dieser Schäden ist der Betreiber der kerntechnischen Anlage verantwortlich. Vgl. [Bundesregierung 2010 c], S. 6.

<sup>36</sup> Vgl. Art. 9 des Protokolls der Änderungen des Pariser Übereinkommens (2004).

KKW vorhalten.<sup>37</sup> Für über die Deckungsvorsorge hinausgehende Schadenersatzleistungen haftet zwar der Inhaber, aber durch die in § 34 AtG verankerte Freistellungsverpflichtung übernimmt der Staat darüber hinausgehende Schadenersatzleistungen, wenn der Inhaber diese nicht übernehmen kann.<sup>38</sup> Die Bereitstellung dieser gesetzlichen Schadenersatzleistungen und damit in Verbindung stehende Maßnahmen sind in der atomrechtlichen Deckungsvorsorgeverordnung (AtDeckV) festgelegt. Dort ist beispielsweise geregelt, dass die 2.500 Mio. Euro Deckungsvorsorge durch „eine Haftpflichtversicherung oder eine sonstige finanzielle Sicherheit erbracht werden“<sup>39</sup> kann. Es können auch verschiedene oder gleiche Formen der Vorsorgemaßnahmen miteinander verbunden werden.<sup>40</sup>

Derzeit setzt sich die Absicherung der 2.500 Mio. Euro Deckungsvorsorge aus zwei Komponenten zusammen: Zum Einen sichern die Inhaber der KKW in Deutschland derzeit jeden Kernkraftwerksblock mit einer Haftpflichtversicherungsdeckung, bereitgestellt durch den Nuklearversicherungspool Deutsche Kernreaktor-Versicherungsgemeinschaft GbR, bis zu einer Höhe von 255,65 Mio. Euro<sup>41</sup> ab.<sup>42</sup> Zum Anderen besteht ein ergänzender Solidarvertrag der Obergesellschaften der Inhaber der KKW, durch den sich diese gemeinsam gegenseitig zu einer Zahlung bis zu einer Höhe von 2.356,57 Mio. Euro<sup>43</sup> im Schadenfall verpflichten.<sup>44</sup> Grundlage dieses Solidarvertrages stellen testierte finanzielle Sicherheiten der Gesellschaften dar, die innerhalb eines Jahres liquidierbar sind.<sup>45</sup>

Zusätzlich zur Deckungsvorsorge seitens der Inhaber stehen Mittel aus dem Brüsseler Zusatzüberkommen zur Verfügung. Dabei werden bis zu 300 Mio. Euro aus öffentlichen Mitteln durch die EU bereitgestellt. Diese Summe reicht nach Auffassung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aus, um den Höchstschaten eines nuklearen Ereignisses mit Kernschmelze zu decken.<sup>46</sup>

Damit summieren sich die Mittel, die im Haftungsfall dem Inhaber eines Kernkraftwerksblockes

---

<sup>37</sup> Vgl. § 13 Abs. 3 AtG. Diese Begrenzung der Deckungsvorsorge auf 2,5 Mrd. wird als realistische Höhe zur Deckung der Schadenersatzansprüche aufgrund eines nuklearen Ereignisses gesehen.

<sup>38</sup> Vgl. § 34 Abs. 1 AtG und dazu die Ausführungen in [Haubner 2009], S. 41.

<sup>39</sup> § 1 AtDeckV.

<sup>40</sup> Vgl. § 1 AtDeckV.

<sup>41</sup> Dies entsprach bis April 2002 - bis zur Novellierung des Atomgesetzes - der gesetzlichen Deckungsvorsorgepflicht.

<sup>42</sup> Die beiden Reaktorblöcke in Grundremmingen werden beide zusammen bis 255,65 Mio. Euro abgesichert. Vgl. [Irrek 2008], S. 1.

<sup>43</sup> Dieser Betrag ergibt sich aus seiner Haftpflicht-Deckungsvorsorge i.H.v. 2.244,355 Mio. Euro zuzüglich geschätzter Schadensabwicklungskosten (5%) i.H.v. 112,218 Mio. Euro.

<sup>44</sup> [Wuppertal Institut 2007], S. 12.

<sup>45</sup> Vgl. [Bundesregierung 2010 c], S. 1

<sup>46</sup> Vgl. [Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010], S. 2

zur Verfügung stehen, wie folgt:

	255,65 Mio. Euro aus der Haftpflichtversicherung
+	2.356,57 Mio. Euro aus dem Solidarvertrag der Obergesellschaften
+	300,00 Mio. Euro aus dem Brüsseler Zusatzübereinkommen
=	2.912,22 Mio. Euro

Damit sind zunächst die gesetzlichen Anforderungen an die Deckungsvorsorge zur Begleichung von Haftpflichtansprüchen erfüllt.

#### *Hintergründe der gesetzlichen und EU-rechtlichen Regelung des Haftungsrechts von KKW-Inhabern*

Die Haftung bei nuklearen Ereignissen wird sowohl international bzw. auf EU-Ebene als auch auf Grundlage deutscher Haftungsvorschriften geregelt.<sup>47</sup> Grundlegend gilt seit 1960 nach den Regeln des Pariser Übereinkommens<sup>48</sup> und des Gemeinsamen Protokolls<sup>49</sup>, ergänzt durch das Atomgesetz, die sog. „Gefährdungshaftung“.<sup>50</sup> Im Folgenden werden die verschiedenen Grundlagen des Haftungsrechts näher beleuchtet.

Die internationalen Vereinbarungen - Pariser Übereinkommen, Brüsseler Zusatzübereinkommen sowie Wiener Übereinkommen - wurden getroffen, um die industrielle Nutzung der Kernenergie trotz bestehender Risiken ermöglichen zu können. Insbesondere das im Jahr 1960 abgeschlossene Pariser Übereinkommen beschäftigt sich mit dem Haftungsrecht bei Schadenersatzforderungen aufgrund nuklearer Ereignisse und verankerte die strikte Gefährdungshaftung im Rahmen der Nutzung von Atomenergie.

Trotz über die Jahrzehnte offenbar gewordener Lücken im internationalen System des Atomhaftungsrechts und gewandelter Vorstellungen von Nutzen und Risiken der friedlichen Nutzung von Kernenergie blieben die grundlegenden Prinzipien der einschlägigen Übereinkommen zur Atomhaftung weitestgehend unverändert. In einem mehrjährigen Prozess wurde das Pariser Übereinkommen mit dem Protokoll 2004 einer grundlegenden Reform unterzogen. Die Bundesregierung stimmte dem Protokoll 2004 zu, bislang ist es aber noch nicht in Kraft getreten.<sup>51</sup> Die Pariser Konvention von 1960 fordert, dass jeder Betreiber von KKW zwischen 6 und 18 Mio. Euro für die Kompensation von Schäden zur Verfügung hält. Die überholten Protokolle von 2004 fordern mindestens eine Haftung des Betreibers in Höhe von 700 Mio. Euro (Pariser Protokoll) bzw. 1.500 Mio. Euro (Protokoll

<sup>47</sup> Für eine Übersicht über das internationale Atomrecht siehe [BfS b]. Direkt zur Veröffentlichung der Umsetzung in Deutschland siehe BGBl II, Nr. 24, 29. August 2008, S. 902.

<sup>48</sup> Pariser Übereinkommen meint das Übereinkommen vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. Februar 1976 (BGBl. II S. 310, 311) und des Protokolls vom 16. November 1982 (BGBl. 1985 II S. 690).

<sup>49</sup> Gemeinsames Protokoll meint das Gemeinsame Protokoll vom 21. September 1988 über die Anwendung des Wiener Übereinkommens und des Pariser Übereinkommens (BGBl. 2001 II S. 202, 203), siehe [IAEA 1992].

<sup>50</sup> Vgl. § 25 Abs. 1 Satz 1 AtG

<sup>51</sup> Für weiterführende Analyse des Pariser Übereinkommens siehe [Blobel 2005].

---

des Brüsseler Zusatzübereinkommens).<sup>52</sup>

Bezogen auf das EU-Haftungsrecht gibt es folgende Tendenzen: Auf europäischer Ebene wird seit Ende der 1980er Jahre eine Einigung über gemeinschaftliche Maßnahmen in der Umwelthaftung angestrebt. 1993 legte die EU-Kommission ein Grünbuch, 2000 ein Weißbuch zur Umwelthaftung und daraufhin Anfang 2002 einen Richtlinienvorschlag vor. In dem EU-Richtlinienvorschlag zum Umwelthaftungsrecht wurde u.a. von Umweltverbänden gefordert, die Haftung auch auf Kernkraftwerke auszudehnen. In der am 21. April 2004 verabschiedeten Fassung der EU-Richtlinie über Umwelthaftung zur Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden<sup>53</sup> werden nukleare Schäden mit Verweis auf die Regelungen in den internationalen Übereinkommen vom Umwelthaftungsrecht ausgeschlossen - geregelt in Art. 4 Abs. 4 Richtlinie 2004/35/EG:

„Diese Richtlinie gilt nicht für nukleare Risiken oder Umweltschäden oder die unmittelbare Gefahr solcher Schäden, die durch die Ausübung von Tätigkeiten verursacht werden können, die unter den Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft fallen, oder durch einen Vorfall oder eine Tätigkeit verursacht werden, für die die Haftung oder Entschädigung in den Anwendungsbe-  
reich einer der in Anhang V aufgeführten internationalen Übereinkünfte, einschließlich etwaiger  
künftiger Änderungen dieser Übereinkünfte, fällt.“<sup>54</sup>

In Anhang V der Richtlinie 2004/35/EG sind folgende Internationale Übereinkommen aufgeführt:

- Pariser Übereinkommen vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie und Brüsseler Zusatzübereinkommen vom 31. Januar 1963;
- Wiener Übereinkommen vom 21. Mai 1963 über die zivilrechtliche Haftung für nukleare Schäden;
- Übereinkommen vom 12. September 1997 über zusätzliche Entschädigungsleistungen für nuklearen Schaden;
- Gemeinsames Protokoll vom 21. September 1988 über die Anwendung des Wiener Übereinkommens und des Pariser Übereinkommens;
- Brüsseler Übereinkommen vom 17. Dezember 1971 über die zivilrechtliche Haftung bei der Beförderung von Kernmaterial auf See.

Das deutsche Atomgesetz ergänzt und konkretisiert die Haftungsregelungen der internationalen Vereinbarungen. Dabei geht die Haftung weit über die Mindesthaftung des Pariser Übereinkommens hinaus, denn nach § 31 Abs. 3 AtG haftet der Inhaber eines Kernkraftwerkes der Höhe nach unbegrenzt. Neben Deutschland findet eine solche unbegrenzte Haftung nur noch in der Schweiz und in

---

<sup>52</sup> [Schneider et al. 2009], S. 72.

<sup>53</sup> Richtlinie 2004/35/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 über Umwelthaftung zur Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden, EU ABI L 143/56.

<sup>54</sup> Art. 4 Abs. 4 Richtlinie 2004/35/EG.

---

Japan Anwendung. Auch im deutschen Recht entspricht die Haftung einer strikten Gefährdungshaftung.<sup>55</sup>

Seit der Novellierung des Atomgesetzes im Jahr 2002 ist die Deckungsvorsorge der Inhaber der KKW zur Erfüllung ihrer Schadenersatzverpflichtungen auf 2.500 Mio. Euro pro KKW aufgestockt worden.<sup>56</sup> Details zur derzeitigen Haftungssituation von KKW-Inhabern und die Zusammensetzung dieser Deckungsvorsorge wurden im vorangegangenen Abschnitt beschrieben.

#### *Zwischenfazit aus den vorangegangenen Absätzen*

Obwohl die aktuell von den KKW-Inhabern vorgehaltene Deckungsvorsorge den gesetzlichen Anforderungen entspricht, wirft selbst diese - gegenüber den Regelungen vor der Novellierung des Atomgesetzes im Jahr 2002 - bereits erhöhte Deckungsvorsorge Zweifel auf, ob sie ausreichend ist, im Schadenfall den Schadenersatzverpflichtungen gegenüber Dritten nachkommen zu können.

Sollte ein nuklearer Katastrophenfall eintreten, dessen Schaden höher ist als die gesetzliche Deckungsvorsorge, haftet prinzipiell der Inhaber des KKW unbegrenzt für die Schadenteile, die die 2.500 Mio. Euro zzgl. 300 Mio. Euro aus dem EU-Zusatzübereinkommen übersteigen. Sollte der KKW-Inhaber nicht leisten können, läge es in letzter Konsequenz beim Staat, im Schadenfall für einen wesentlichen Anteil der Schadenersatzleistungen aufkommen zu müssen. Dies entspräche letztlich einer erheblichen Belastung der Allgemeinheit.

Die vorliegende Studie soll folgende zentrale Frage beantworten: Wie hoch müsste die Prämie für eine Haftpflichtversicherung sein, mit der innerhalb eines definierten Zeitraums Vorsorge für einen Maximalschaden aus einem nuklearen Katastrophenfall getroffen werden kann? Die Antwort auf diese Frage wird in den Kapiteln 4 bis 6 mittels diversen bestehenden Expertenschätzungen hinsichtlich zu erwartender Schadenhöhen und angenommener Schadeneintrittswahrscheinlichkeiten sowie Methoden der Extremwerttheorie hergeleitet.

---

<sup>55</sup> Vgl. § 25 AtG.

<sup>56</sup> Vgl. § 13 Abs. 3 AtG. Diese Begrenzung der Deckungsvorsorge auf 2,5 Mrd. wird als realistische Höhe zur Deckung der Schadenersatzansprüche aufgrund eines nuklearen Ereignisses gesehen.

## Kapitel 3

# Dimensionen des Versicherungsschutzes für einen nuklearen Katastrophenfall

Die Dimensionen des Versicherungsschutzes für ein definiertes Risiko ergeben sich aus dem im Versicherungsvertrag festgehaltenen Versicherungsfall (versicherte Gefahren) und den daraus resultierenden Schäden an den versicherten Risiken bzw. den damit zusammenhängenden, im Versicherungsvertrag festgelegten Leistungen des Versicherers.<sup>57</sup>

Im folgenden Kapitel 3.1 werden wichtige versicherungswissenschaftliche Begrifflichkeiten definiert und die Dimensionen des Versicherungsschutzes im Einzelnen näher erläutert. Im darauf folgenden Kapitel 3.2 wird die versicherungswissenschaftliche Sichtweise auf den Sachverhalt eines nuklearen Katastrophenfalls angewandt.

Grundsätzlich beziehen sich diese Kapitel auf die Haftpflichtversicherung<sup>58</sup> als Versicherungszweig der Schadenversicherung<sup>59</sup> zur Absicherung der Schäden, die durch einen nuklearen Katastrophenfall verursacht werden bzw. der daraus resultierenden Schadenersatzansprüche Dritter. In den einzelnen Kapiteln wird daher auch die Haftpflichtversicherung näher beleuchtet.

---

<sup>57</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 382ff.

<sup>58</sup> Eine Haftpflichtversicherung ist eine Versicherung, durch die berechtigte Schadenersatzansprüche eines geschädigten Dritten aufgrund eines von einer natürlichen oder juristischen Person verursachten oder verschuldeten Schadens abgesichert werden. Vgl. hierzu [Fürstenwerth/Weiß 2001], S. 306 f.

<sup>59</sup> Eine Schadenversicherung ist eine Versicherung, „deren Versicherungsleistung [direkt] auf einen tatsächlich entstanden und konkret nachweisbaren Schaden am Vermögen der Versicherten begrenzt ist.“ [Fürstenwerth/Weiß 2001], S. 567.

## 3.1 Versicherungswissenschaftliche Begriffsbestimmungen des Versicherungsschutzes

### 3.1.1 Versicherung und versichertes Risiko

Für den Begriff Risiko existieren eine Vielzahl verschiedener Definitionen sowohl in der allgemeinen wirtschaftswissenschaftlichen als auch in der speziellen versicherungswissenschaftlichen Literatur. Übereinstimmend definieren alle Quellen „Risiko“ als den Sachverhalt, dass die Entscheidungen und das damit verknüpfte (wirtschaftliche) Verhalten und Handeln eines Wirtschaftssubjektes nicht zu einem bestimmten genau festlegbaren Ergebnis führen, sondern dass Abweichungen vom erwarteten Ergebnis aufgrund von (Umwelt-)Einflüssen auftreten können.<sup>60</sup> Diese Ergebnismöglichkeiten treten jeweils mit unterschiedlichen - sowohl bekannten als auch unbekannt - Wahrscheinlichkeiten auf, weshalb sich ein Risiko auch durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung möglicher Ergebnisse einer Handlung ausdrückt.

Insgesamt ist ein Risiko also durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einem Erwartungswert - „der mit den Wahrscheinlichkeiten gewichtete Durchschnitt aller Ergebnismöglichkeiten“<sup>61</sup> - und einer gewissen Streuung, die die Abweichungen vom erwarteten Ergebnis angibt, beschrieben.<sup>62</sup> Dabei können die Abweichungen des tatsächlichen Ergebnisses vom Erwartungswert günstiger Art (wie bspw. mehr Gewinn innerhalb einer Periode als erwartet) oder ungünstiger Art (bspw. weniger Gewinn innerhalb einer Periode als erwartet) sein.

Bezogen auf die Versicherungswirtschaft werden nur die ungünstigen Abweichungen vom Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, gemessen an wirtschaftlichen Größen, in die Betrachtung einbezogen. Diese Abweichungen werden als Schäden bezeichnet. Daher wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung (der möglichen negativen Ergebnisse einer Handlung) auch als Schadenverteilung bezeichnet.<sup>63</sup> Wenn die Wirtschaftssubjekte diese ungünstigen Abweichungen bzw. Risiken nicht selbst tragen können oder wollen, besteht - soweit die Grenzen der Versicherbarkeit (s.u.) nicht überschritten sind - die Möglichkeit, diese auf Versicherungsunternehmen zu überwälzen. Dabei übertragen die Wirtschaftssubjekte die geschätzte Schadenverteilung an den Versicherer; als Gegenleistung zahlen die Wirtschaftssubjekte dem Versicherer eine Versicherungsprämie. Der

---

<sup>60</sup> Ursachen für diese Ergebnismöglichkeiten resp. Abweichungen des tatsächlichen Ergebnisses vom erwarteten Ergebnis sind Einflüsse der natürlichen Umwelt (wie Stürme, Erdbeben, etc.), technische Einflüsse (wie Versagen technischer Systeme), die wirtschaftliche Umwelt (wie Maßnahmen des Konzerns oder der Konkurrenten) oder Einflüsse der Gesellschaft (bspw. Gesetzgebung oder Handeln von dritten Personen). Weitere Unsicherheiten über die tatsächliche Ergebnisausprägung ergeben sich dadurch, dass keine vollständige Information über den Zusammenhang einer Handlung mit einem Ergebnis vorhanden ist. Es herrscht bis zu einem gewissen Grad Ungewissheit, weshalb eine Handlung immer unter Unsicherheit in Bezug auf die möglichen Ergebnisausprägungen stattfindet. Vgl. [Farny 2006], S. 27.

<sup>61</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 27.

<sup>62</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 27.

<sup>63</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 30 f.

Versicherer verpflichtet sich, im vereinbarten und definierten Schadenfall eine Entschädigung zu leisten.<sup>64</sup> Dieser Sachverhalt wird als Versicherung i.e.S. bzw. Risikogeschäft<sup>65</sup> bezeichnet.

Ein versichertes Risiko ist dann aus Sicht des Versicherers eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von Versicherungsleistungen (die er im Schadenfall gegenüber dem Versicherungsnehmer zu erfüllen hat) und aus Sicht des Versicherungsnehmers eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von Schäden (die er an den Versicherer überträgt).<sup>66 67</sup>

Der Versicherer übernimmt im Normalfall eine Vielzahl an Risiken und deren Schadenverteilungen in seinen Bestand (welches als Kollektiv bezeichnet wird) und erhält im Gegenzug Prämienzahlungen von allen versicherten Risiken innerhalb dieses Bestandes. Ist der Bestand versicherter Risiken groß genug, wirkt das „Gesetz der großen Zahl“. Dieses besagt vereinfacht, dass innerhalb einer Periode (z.B. ein Jahr) zwar für alle versicherten Risiken eine Prämie gezahlt wird, jedoch nicht bei allen dieser Risiken innerhalb der Periode Schäden auftreten. Damit ist es dem Versicherer möglich, die innerhalb einer Periode entstehenden Schäden an wenigen versicherten Risiken innerhalb des Bestandes durch Prämienzahlung aller Risiken dieses Bestandes zu „finanzieren“. Dieser für die Versicherungstechnik wesentliche Prozess wird als Risikoausgleich im Kollektiv bezeichnet. Sollten innerhalb einer Periode mehr Schäden eintreten als erwartet, wird von „Überschäden“ gesprochen; sind es weniger Schäden als erwartet, von „Unterschäden“.

Das versicherungstechnische Kalkül beruht weiterhin darauf, dass sich über mehrere Perioden hinweg die Unterschäden einzelner Perioden die Überschäden anderer Perioden langfristig ausgleichen. Dieses Prinzip wird als Risikoausgleich in der Zeit bezeichnet. Der Ausgleich über mehrere Perioden hinweg ist möglich, da die meisten Versicherungsverträge innerhalb des Kollektivs Laufzeiten von mehr als einem Jahr aufweisen.<sup>68</sup>

Durch den Risikoausgleich im Kollektiv und in der Zeit ist es dem Versicherer möglich, Risiken in seinen Bestand zu übernehmen und aufgrund der diesen Risiken gegenüberstehenden Prämien im Schadenfall leisten zu können. Der Versicherer legt sein Vermögen, das sich auch aus den Prämienzahlungen ergibt, verzinslich in Kapitalanlagen an, um Rendite zu erzielen. Für die Verpflichtungen, die er gegenüber dem Versicherungsnehmer - durch bspw. aufgrund im Voraus gezahlter Prämien und in Zukunft zu gewährendem Versicherungsschutz oder noch nicht regulierter Scha-

---

<sup>64</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 35.

<sup>65</sup> Der Versicherungsschutz einer Haftpflichtversicherung besteht dabei aus seinem Kerngeschäft, dem Risikogeschäft, und dem Dienstleistungsgeschäft. Zum Dienstleistungsgeschäft gehören Beratungs- und Abwicklungsleistungen. Siehe hierzu: Vgl. [Farny 2006], S. 55 ff.

<sup>66</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 31.

<sup>67</sup> In diesem Zusammenhang ist der Begriff Wagnis vom Risikobegriff abzugrenzen. Als Wagnis wird der vom Versicherungsunternehmen übernommene Teil des bestehenden gesamten Risikos mit all seinen Gefahren und möglichen Schäden bezeichnet. Da Versicherer in den Verträgen meist gewisse Gefahren und Schäden, wie u.a. Schäden aufgrund von Krieg, Atomunfall oder Computerviren ausschließen, sind Wagnis und Risiko oft nicht deckungsgleich.

<sup>68</sup> Siehe hierzu die Ausführungen in [Farny 2006], S. 44 ff.

denfälle - hat, bildet der Versicherer versicherungstechnische Rückstellungen. Diese Rückstellungen spiegeln den Teil des gebundenen Vermögens der Kapitalanlagen (Sicherungsvermögen) wider.

Grundlegend werden zwei Leistungsformen des Versicherers unterschieden: die Summen- und die Schadenversicherung. Bei einer Summenversicherung wird unabhängig von der tatsächlichen Schadenhöhe nur ein vorab festgelegter begrenzter Betrag gezahlt. Dies ist beispielsweise der Fall in der Risikolebensversicherung, wo unabhängig vom „Wert“ des Lebens der versicherten Person eine bestimmte Deckungssumme angenommen wird. Hingegen orientiert sich die Schadenversicherung an der Höhe des tatsächlich eingetretenen Schadens. Sie wird wiederum unterteilt in die unbegrenzte Interessenversicherung, die keinerlei Begrenzung der Versicherungssumme vorsieht und die Erstrisikoversicherung, bei der eine obere Leistungsgrenze für den Schadenersatz festgelegt wird.<sup>69</sup> Ein Beispiel für die Schadenversicherung ist die Kfz-Kasko-Versicherung.

Zivilrechtlich bzw. schuldrechtlich besteht in Deutschland die Pflicht, dass Privatpersonen und Wirtschaftssubjekte für selbst verursachte materielle/finanzielle Schäden an anderen Personen, Wirtschaftssubjekten oder deren Eigentum und/oder der Umwelt haften und zum Schadenersatz verpflichtet sind. Für die Finanzierbarkeit dieser Haftung können i.d.R. Haftpflichtversicherungen erworben werden.<sup>70</sup> Diese sind teilweise freiwillig (private Haftpflichtversicherung) oder Pflichtversicherungen (z.B. Kfz-Haftpflichtversicherung, Pflicht-Haftpflichtversicherungen z.B. für Personenschäden aus Arzneimitteln durch den Arzneimittelhersteller oder Jagdhaftpflichtversicherung für Jäger).<sup>71</sup>

Da sich die Haftpflichtversicherung an der konkreten Höhe eines tatsächlich möglichen bzw. eingetretenen Schadens orientiert, ist sie den Schadenversicherungen zuzuordnen. Die Haftpflichtversicherung, die die KKW-Inhaber derzeit vom bestehenden Nuklearversicherungspool Deutsche Kernreaktor-Versicherungsgemeinschaft GbR erworben haben, stellt eine Erstrisikoversicherung dar, da die Höhe der Versicherungsleistung auf 255,65 Mio. Euro begrenzt ist. Die im Rahmen der hier vorliegenden Studie berechnete fiktive Versicherungsprämie einer Haftpflichtversicherung unterstellt dagegen keine Limitierung der Versicherungssumme. Daher entspricht diese einer unbegrenzten Interessenversicherung.

### 3.1.2 Versicherte Gefahren und versicherter Schaden

Der Versicherungsschutz muss durch den Versicherer im Versicherungsvertrag definiert bzw. beschrieben werden. Dazu wird das zu versichernde Risiko intensiv analysiert. Dabei werden

- sowohl die Ursachen, die das Risiko auslösen kann (Gefahren),
- als auch die möglichen Auswirkungen (Schäden),

<sup>69</sup> Vgl. [Fürstenwerth/Weiß 2001], S. 212 und 654.

<sup>70</sup> Siehe hierzu die Ausführungen in [Fürstenwerth/Weiß 2001], S. 306 f.

<sup>71</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 149.

die durch Eintritt des Ereignisses im Sinne des versicherten Risikos entstehen können, erfasst.<sup>72</sup> In diesem Zusammenhang obliegt es dem Versicherer, alle möglichen Gefahren und Schäden in den Vertrag einzuschließen oder einen Teil explizit auszuschließen. Generell kann eine Gefahr, nämlich die Risikoursache, als das Unheil bzw. Zustand, der durch nicht oder kaum beeinflussbare Gewalten entsteht, beschrieben werden. Gefahren existieren und lösen bei Eintreten einen oder mehrere reale Schäden aus.<sup>73</sup>

Alle in den Vertrag einbezogenen Ursachen/Gefahren werden als versicherte Gefahren bezeichnet und lösen im Schadenfall eine Leistungspflicht des Versicherers aus.<sup>74</sup> Analog werden alle vertraglich einbezogenen Auswirkungen/Schäden als versicherte Schäden bezeichnet.

Die Beschreibung und Gestaltung der versicherten Gefahren und Schäden für ein versichertes Risiko ist meist sehr diffizil und feingliedrig.<sup>75</sup>

### 3.1.3 Versicherungsprämie

Grundsätzlich stellt die Versicherungsprämie den Preis für das Wirtschaftsgut „Versicherungsschutz“ dar. Mit der Einnahme der Versicherungsprämie finanziert der Versicherer die zu erwartenden Auszahlungen für Entschädigungsleistungen im Schadenfall.

Im Rahmen seiner Prämienspolitik kalkuliert der Versicherer die Preise für den angebotenen Versicherungsschutz mit dem Ziel, durch die Prämieneträge aus dem Kollektiv die für Schadenzahlungen dieses Kollektivs entstehenden geschätzten Aufwendungen decken zu können. In die Kalkulation fließen Erfahrungswerte hinsichtlich tatsächlicher Aufwendungen für in der Vergangenheit bereits eingetretene vergleichbare Schadenfälle und geschätzte Aufwendungen für künftige Schadenfälle<sup>76</sup> ein.

Weitere Bestandteile der Versicherungsprämie sind neben der reinen Risikoprämie der Sicherheitszuschlag, der Betriebskostenzuschlag, Deckungsbeitrag für die Versicherungs- und ggf. der Feuerschutzsteuer sowie der Gewinnzuschlag.

Die reine Risikoprämie entspricht dem Deckungsbeitrag für die erwarteten Schadenkosten des Risikos (erwarteter Leistungsbarwert<sup>77</sup>).<sup>78</sup> Für die Berechnung der Risikoprämie wird daher der Schadenerwartungswert zugrunde gelegt.

---

<sup>72</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 32.

<sup>73</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 33 f.

<sup>74</sup> Vgl. § 19 Abs. 1 VVG.

<sup>75</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 383 ff.

<sup>76</sup> Aufwendungen entstehen sowohl für Schadenzahlungen als auch für Verwaltungskosten des Versicherers.

<sup>77</sup> Weitere Ausführungen in Kapitel 6.1

<sup>78</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 60.

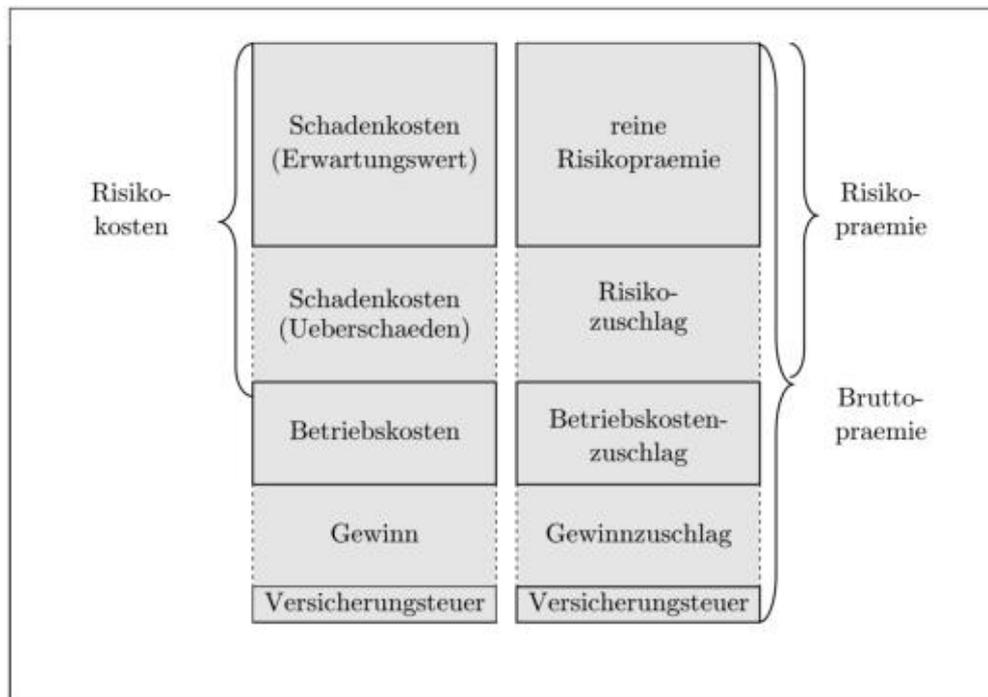


Abbildung 3.1: Prämien-/Kosten-Modell (Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Rosenbaum/Wagner 2006] S. 138)

Ein weiterer Bestandteil der Versicherungsprämie ist der Sicherheitszuschlag, der als Deckungsbeitrag für mögliche Überschäden - aufgrund der Streuung der erwarteten Schäden in der Wahrscheinlichkeitsverteilung - dient. Ist die Streuung hoch (großer Unterschied der Ausprägungen der Schadenhöhen), muss ein entsprechend höherer Sicherheitszuschlag in die Versicherungsprämie eingerechnet werden. Der Sicherheitszuschlag dient daher der Absicherung der Schwankungen der tatsächlichen Schadenzahlungen um den Erwartungswert und stellt einen zusätzlichen Deckungsbeitrag zu Absicherung des Risikos dar.<sup>79</sup>

Die reine Risikoprämie und der Sicherheitszuschlag stehen in einem sehr engen Zusammenhang und werden daher auch oft zusammengefasst als Risikoprämie bezeichnet.

Der Betriebskostenzuschlag dient der Abdeckung der Betriebskosten, die das Dienstleistungsgeschäft (z.B. für Vertragsverwaltung) umfasst.<sup>80</sup> Der Deckungsbeitrag für die Versicherungssteuer dient der Abdeckung der dadurch entstehenden Kosten.

Die gesamte Prämie spiegelt daher die hier genannten Kosten wider, d.h. die Prämie wird in einzelne Teile zerlegt, die dann als Deckungsbeiträge bestimmter Kostenteile interpretiert werden können.

<sup>79</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 60 und [Nguyen 2009], S. 10.

<sup>80</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 60 f.

---

Die Abbildung 3.1 zeigt zur Verdeutlichung des Sachverhaltes ein solches Prämien-/Kostenmodell.

In der Prämienkalkulation wird versucht, für jedes versicherte Risiko bzw. jeden individuellen Schadenerwartungswert die reine Risikoprämie zu ermitteln. Dieser Sachverhalt wird als individuelles versicherungstechnisches Äquivalenzprinzip bezeichnet. Auf das gesamte Kollektiv bezogen, folgt auch dies dann dem sogenannten kollektiven Äquivalenzprinzip, d.h. die Summe aller individuellen Risikoprämien steht dem gesamten Erwartungswert an Schadenkosten aller versicherter Risiken gegenüber.

Durch das individuelle versicherungstechnische Äquivalenzprinzip ergibt sich zwangsläufig eine Prämien differenzierung hinsichtlich der individuellen Schadenerwartungswerte.<sup>81</sup> Dieser Aspekt kann ggf. relevant werden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schadeneintrittswahrscheinlichkeiten und -höhen, z.B. in Abhängigkeit des Standes der verwendeten Technik und der vorhandenen Sicherheitsvorkehrungen. Hintergrund ist, dass für versicherte Risiken mit weniger Schadenpotenzial auch eine diesem geringeren Risiko entsprechende, niedrigere Prämie zu zahlen sein soll, so dass Anreize zur Schadenverhütung gesetzt werden.

Treten innerhalb eines bestehenden Versicherungsvertragsverhältnisses Schäden eher und/oder häufiger und/oder in größerer Höhe als erwartet ein, ist der Versicherer auch dann zur vereinbarten Leistung verpflichtet, wenn er noch keine Gelegenheit hatte, diese Schadenzahlung(en) komplett durch Prämieinnahmen zu unterlegen. Um dies gewährleisten zu können, stehen dem Versicherer, neben dem Risikoausgleich im Kollektiv/in der Zeit und der Kalkulation der Prämie, weitere wichtige Bestandteile der Versicherungstechnik zur Verfügung. Dazu gehören u.a. der Verzinsungsaspekt sowie die oben unter 3.1.1 Versicherung und versichertes Risiko bereits angesprochene Rückstellungsbildung.<sup>82</sup> Der Verzinsungseffekt entsteht durch die verzinsliche Anlage nicht (akut für Schadenzahlungen) benötigter Prämienbestandteile in verschiedene Arten von Kapitalanlagen.

Es existieren weitere Maßnahmen im Rahmen der versicherungstechnischen Risikopolitik von Versicherern (u.a. die versicherungstechnische Bestandspolitik oder Risikoteilungspolitik). Diese spielen im Rahmen der weiteren Untersuchungen jedoch eine untergeordnete Bedeutung und werden daher hier nicht weiter erläutert.

### 3.1.4 Kriterien und Grenzen der Versicherbarkeit

Viele Risiken mit ihren Gefahren und Schäden gelten als versicherbar; für andere Risiken - so auch für das Haftungsrisiko aus nuklearen Katastrophenfällen - ist die Frage nach ihrer „Versicherbarkeit“ nach weit überwiegender Auffassung jedoch zu verneinen.

---

<sup>81</sup> Vgl. [Rosenbaum/Wagner 2006], S. 137 ff.

<sup>82</sup> Eine weitere Möglichkeit ist die Weitergabe eines Teils der Risiken an sogenannte Rückversicherungsunternehmen.

Es existiert keine fest definierte Grenze, ob und in welcher Form ein Risiko als versicherbar gilt. Dies kann letztendlich nur im Einzelfall entschieden werden. Entscheidend ist jeweils die Nutzenabwägung zwischen dem Versicherungsnehmer und dem Versicherungsunternehmen unter Berücksichtigung der zu zahlenden Versicherungsprämie. Demnach beruht die Versicherbarkeit eines Risikos stets auf subjektiven und individuellen Einschätzungen.<sup>83</sup>

Eine Möglichkeit, die Versicherbarkeit von Risiken ansatzweise zu objektivieren bzw. abzuleiten, bieten die in der Literatur der Versicherungsbetriebslehre beschriebenen folgenden fünf Kriterien der Versicherbarkeit: Schätzbarkeit, Zufälligkeit, Unabhängigkeit und Eindeutigkeit eines Risikos sowie die damit verbundene Schadensgröße.<sup>84</sup>

Das Kriterium der Zufälligkeit bezieht sich auf die Realisation des Schadens und bedeutet, dass die Entstehung des Schadenereignisses, der Zeitpunkt des Schadeneintritts und das Ausmaß des Schadens unsicher sein müssen. Kommt es zu einem Vertragsabschluss, müssen diese Attribute sowohl dem Versicherungsnehmer als auch dem Versicherer unbekannt sein.<sup>85</sup> Des Weiteren sollte der Schadeneintritt idealtypisch auch unabhängig vom Willen oder Verhalten des Versicherungsnehmers sein, also ohne dessen Beeinflussung entstehen.<sup>86</sup> Dieses Kriterium wird in den meisten Versicherungszweigen nicht vollständig erfüllt, da der Versicherer auch bei fahrlässigem bzw. grob fahrlässigem Handeln<sup>87</sup> eines Versicherungsnehmers zahlt. Das Versicherungsvertragsgesetz (VVG) sieht in diesem Fall eine quotale Kürzung der Versicherungsleistungen vor. Führt allerdings ein vorsätzliches Handeln eines Versicherungsnehmers zu einem Schadenfall, leistet der Versicherer in der Regel nicht.<sup>88</sup>

Ein weiterer Aspekt der Versicherbarkeit stellt die Schätzbarkeit der zu versichernden Schadenverteilung dar, d.h. die Möglichkeit, die Ausprägung eines Schadenereignisses hinsichtlich dessen Eintrittswahrscheinlichkeit und dessen Ausmaß im Vorfeld mittels Risikoanalysen o.ä. einzuschätzen.<sup>89</sup> Dieser Aspekt der Versicherbarkeit impliziert, dass Erfahrungswerte und Datenhistorien hinsichtlich des Schadeneintritts bestehen, oder aber das Risiko intuitiv und/oder analytisch beschrieben werden kann.

Als weitere Voraussetzung für die Versicherbarkeit eines Risikos kann dessen Unabhängigkeit von anderen versicherten Risiken - im Sinne einer Unkorreliertheit - verstanden werden. Das heißt, es soll keinen Zusammenhang dahingehend geben, dass bei einem auslösenden Ereignis mehrere versicherte Einheiten/Objekte betroffen sind. Allerdings wird dieses Kriterium vielfach nicht vollständig

---

<sup>83</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 35 ff. und [Goßner 2002], S. 5 f.

<sup>84</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 37 f. und [Nguyen 2009], S. 6 ff.

<sup>85</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 38 und [Nguyen 2009], S. 6 f.

<sup>86</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 38.

<sup>87</sup> Ein klassisches grob fahrlässiges Handeln ist bspw. das kurzfristige Verlassen der Wohnung bei brennenden Kerzen.

<sup>88</sup> Vgl. § 81 VVG

<sup>89</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 38.

---

erfüllt. Zum Beispiel trifft ein Hagelschaden als Schadenereignis gleichzeitig eine Vielzahl an versicherten Kraftfahrzeugen eines Versicherers. Die Höhe der Korrelation sollte nur nicht zu hoch sein.<sup>90</sup>

Zudem muss ein Risiko eindeutig sein, das heißt die Merkmale des Versicherungsfalls - bestehend aus versicherten Gefahren und den entstehenden Schäden - müssen genau bestimmbar und zuordenbar sein.<sup>91</sup>

Die Eindeutigkeit hängt auch eng mit der letzten Voraussetzung der Versicherbarkeit zusammen - der Größe des Schadens bzw. des Schadenausmaßes. Dieses Kriterium besagt, dass die maximal zu zahlende Versicherungsleistung aus einem Schadenereignis - dieser Wert wird als PML oder Probable/Possible Maximum Loss bezeichnet - die Risikotragfähigkeit eines Versicherers nicht übersteigen darf.

Zusätzlich zu den fünf beschriebenen Voraussetzungen für die Versicherbarkeit von Risiken spielt die Risikodynamik eine wesentliche Rolle. Darunter fällt, dass sich die Risiken im Zeitablauf, u.a. durch den technischen Fortschritt bedingt, verändern können, weswegen sich Versicherer immer wieder erneut die Frage der Versicherbarkeit veränderter Risiken stellen müssen. Beispielsweise wurden Terrorrisiken bei bestimmten Versicherungsprodukten in der Vergangenheit häufig mit eingeschlossen, nach den Ereignissen des 11. September 2001 sind diese nun aber in fast allen Versicherungsprodukten ausgeschlossen.<sup>92</sup>

Die Kriterien der Versicherbarkeit sind dem Versicherer dienlich, um ein Risiko einordnen zu können. Darüber hinaus kann eine Versicherung aber auch gesetzlich durch die Verankerung von Pflichtversicherungen im Gesetz bestimmt werden. In diesem Zusammenhang trägt die Versicherbarkeit unter Umständen auch einem politischen Willen Rechnung. Im Hinblick auf bestehende Pflichtversicherungen, wie beispielweise der Haftpflichtversicherung für Personenschäden aus Arzneimitteln durch den Arzneimittelhersteller, ist die Abwägung der Kriterien der Versicherbarkeit nicht mehr ausschlaggebend.

---

<sup>90</sup> Vgl. [Nguyen 2009], S. 8. Für die angesprochenen Kumulereignisse bietet die Rückversicherungswirtschaft allerdings seit vielen Jahrzehnten entsprechende (Rück-)Versicherungslösungen, z.B. im Rahmen der Kumulschadenexzedentenrückversicherung.

<sup>91</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 38.

<sup>92</sup> Vgl. [Goßner 2002], S. 5.

---

## 3.2 Anwendung des konzeptionellen Versicherungsschutzes auf einen nuklearen Katastrophenfall

### 3.2.1 Katastrophenfall: Versicherung und versicherte Risiken

Für jedes in Deutschland betriebene KKW besteht das Risiko, dass es aufgrund von Gefahren (im KKW selbst sowie in der direkten und indirekten Umwelt) zu Abweichungen vom normalen Betrieb kommt, d.h. Störfälle sowie Unfälle auftreten, und dass es durch austretende Radioaktivität zu Schäden an umliegenden Systemen (Infrastruktur, Gesundheit, Lebensräumen, etc.) kommt.

Die Risikolage eines KKW wird beschrieben durch einen Mix an Einflussfaktoren aus Umwelt, Wirtschaft, Technik, Gesetzeslage/Politik sowie individuellen Eigenschaften des KKW wie bspw.:

- KKW(-Typ): Reaktortyp und zusammenhängende Funktionalität, eingesetzte Brennstoffe, Alter des Kraftwerks, etc.
- Ausprägung regionaler und zeitlicher Faktoren: geographische Lage (einschl. Flüsse in der Umgebung), vorherrschende Wetterlagen und Windrichtungen, Bevölkerungsdichte in der Umgebung, etc.

Für alle möglichen Einflussfaktoren sowie mögliche Kombinationen daraus existieren unterschiedliche Ausprägungsmöglichkeiten und Eintrittswahrscheinlichkeiten. Ein Teil der Einflussfaktoren wird den Betrieb des KKW nicht oder sogar in positiver Weise beeinflussen (bspw. Fortentwicklung des Wirkungsgrades und/oder der Sicherheit aufgrund umgesetzten technischen Fortschritts). Andere Ausprägungen sind den Gefahren zuzuordnen. Sie sind in der Lage, den Betrieb eines KKW negativ, d.h. im Sinne einer Erhöhung der Schadeneintrittswahrscheinlichkeit, zu beeinflussen. Dieser Sachverhalt der Unsicherheit des Eintretens von Ereignissen wurde im Kapitel 3.1.1 „Versicherung und versichertes Risiko“ beschrieben.

Jeder mögliche Schadenfall aufgrund des Eintretens einer Gefahr oder mehrerer kombinierter Gefahren kann mit einer individuellen Schadeneintrittswahrscheinlichkeit und einer individuellen Schadenhöhe beschrieben werden.

Aufgrund der individuellen Ausprägungen der Einflussfaktoren kann für jedes KKW ein individueller Höchstschaden mit einer individuellen Schadeneintrittswahrscheinlichkeit entstehen. Das bedeutet, dass das potenzielle Risiko einer nuklearen Katastrophe bei einem KKW in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung von Schäden mit individueller Schadeneintrittswahrscheinlichkeit und Schadenhöhe beschrieben werden kann. Basierend auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung kann einem nuklearen Katastrophenfall ein Schadenerwartungswert ( $\mu$ ) zugeordnet werden. Dieser entspricht dem „mit den Wahrscheinlichkeiten gewichtete[n] Durchschnitt aller Ergebnismöglich-

keiten<sup>93</sup>. Der Schadenerwartungswert selbst wird in der Realität niemals exakt getroffen, d.h. mit einer fünfzigprozentigen Wahrscheinlichkeit wird die reale Schadenhöhe unter und mit einer fünfzigprozentigen Wahrscheinlichkeit über dem Schadenerwartungswert liegen. Entsprechend wird hier von Unter- bzw. Überschäden gesprochen. Die Schwankung um den Schadenerwartungswert wird als Streuung ( $\sigma$ ) bezeichnet. Die Abbildung 3.2 zeigt eine mögliche Schadenverteilung eines nuklearen Katastrophenfalls und verdeutlicht den beschriebenen Zusammenhang zwischen Erwartungswert (EW) sowie Über- und Unterschäden.

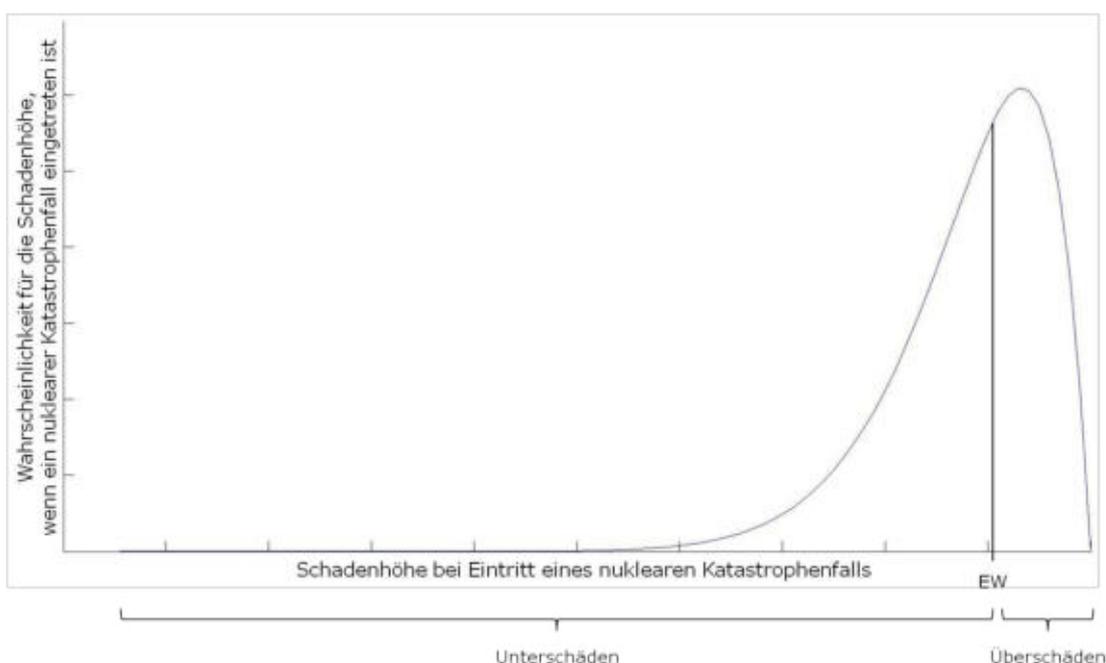


Abbildung 3.2: Schadenverteilung eines nuklearen Katastrophenfalls (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Risiko einer nuklearen Katastrophe ist generell gekennzeichnet durch eine extrem niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit, fehlende Regelmäßigkeit (Kriterium Schätzbarkeit, s. Kapitel 3.1.4 Kriterien und Grenzen der Versicherbarkeit) und ein extrem hohes Schadenpotenzial. Damit ist das Risiko eines nuklearen Katastrophenfalls als Großschaden- bzw. Katastrophenrisiko<sup>94</sup> zu bezeichnen.

Das Risiko eines nuklearen Katastrophenfalls stellt im versicherungstechnischen Zusammenhang kein „normales“ bzw. übliches Risiko dar, da es sich aufgrund genannter Eigenschaften nicht verlässlich mittels versicherungsmathematischer Verfahren schätzen lässt. Vielmehr stellt es eine Art „Entwicklungsrisiko“ dar. Damit ist gemeint, dass sich die Schätzung über die Eintrittswahrscheinlichkeit und den potenziellen Höchstschaden stets mit dem Stand von Wissenschaft und Technik sowie

<sup>93</sup> [Farny 2006], S. 27 f.

<sup>94</sup> Vgl. [Nguyen 2007], S. 6f.

---

der sonstigen Umsysteme (Entwicklung politischer Risiken, Werteakkumulationen in einer Volkswirtschaft, etc.) weiterentwickeln muss.

Ein nuklearer Katastrophenfall in einem KKW verursacht unter anderem Schäden am Leben und der Gesundheit von Menschen, an der Infrastruktur sowie hinsichtlich der wirtschaftlichen Handlungsfähigkeit der Volkswirtschaft. Wie in Kapitel 2 beschrieben, haftet der Inhaber eines KKW für alle Schäden, die durch ein nukleares Ereignis verursacht werden. Er haftet demnach auch im Falle eines Höchstschadens durch einen nuklearen Katastrophenfall. Dieses zu tragende Risiko könnte er mit einer Haftpflichtversicherung auf einen Versicherer transferieren - sofern ein Versicherer (oder ein Konsortium an Versicherern) bereit ist, das damit verbundene Risiko zu tragen.

Die in der vorliegenden Studie beschriebene fiktive Haftpflichtversicherung<sup>95</sup> würde damit dem Inhaber eines KKW zur Begleichung aller Schäden an Dritten, die durch einen nuklearen Katastrophenfall entstehen, (Schäden an Menschen, Vermögenswerten, Realgütern, etc.) dienen. Dies stellt insgesamt das versicherte Risiko dar.<sup>96</sup>

Da sich die Haftpflichtversicherung an einem konkret zu berechnenden Schaden orientiert, aus dem sich die Höhe der Versicherungsleistung (begrenzt durch die Höhe der vereinbarten Deckungssumme) bemisst, ist sie den Schadenversicherungen zuzuordnen. Die Haftpflichtversicherung, welche die KKW-Inhaber derzeit vom bestehenden Nuklearversicherungspool Deutsche Kernreaktor-Versicherungsgemeinschaft GbR erworben haben, stellt eine Erstrisikoversicherung dar, da die Versicherungsleistung auf den Höchstbetrag von 255,65 Mio. Euro begrenzt ist. Die im Rahmen der hier vorliegenden Studie berechnete fiktive Versicherungsprämie einer Haftpflichtversicherung unterstellt keine Limitierung der Versicherungssumme. Daher entspricht die hier angenommene Form der Haftpflichtversicherung einer unbegrenzten Interessenversicherung.<sup>97</sup>

Der Versicherer bildet aus den (jährlich) eingehenden Prämien eine Risikoreserve, aus der er im Schadenfall die benötigte Versicherungsleistung schöpft.

Unter der Annahme, dass ein Versicherer oder auch ein Versicherungspool alle 17 Risiken eines nuklearen Katastrophenfalls (17 KKW in Deutschland, Stand März 2011) in seinen Bestand aufnimmt bzw. ein Kollektiv bildet, wäre ein Risikoausgleich im (relativ kleinen) Kollektiv<sup>98</sup> möglich,

---

<sup>95</sup> Als „fiktiv“ deswegen bezeichnet, weil eine Versicherbarkeit des Haftpflichttrisikos aus einem nuklearen Katastrophenfall in der Realität nicht gegeben ist.

<sup>96</sup> Im Rahmen der vorliegenden Studie werden keine Ausschlüsse hinsichtlich entstehender Schäden durch einen nuklearen Katastrophenfall gemacht, d.h. der Versicherer übernimmt (theoretisch) alle Risiken im Rahmen einer Haftpflichtversicherung, ohne bestimmte Gefahren oder entstehende Schäden von vornherein auszuschließen. Deshalb sind im vorliegenden Fall das reale bestehende Risiko und das Wagnis (im Sinne des versicherten Risikos) gleichzusetzen.

<sup>97</sup> In der Versicherungspraxis wird in diesem Zusammenhang auch von „Illimité-Deckung“ gesprochen.

<sup>98</sup> Zur Beschreibung des Risikoausgleichs im Kollektiv siehe Kapitel 3.1.1 Weitere Ausführungen zum Risikoausgleich im Kollektiv in [Farny 2006], S. 46 ff.

---

da mehrere dieser gleichartigen und voneinander unabhängigen Risiken im Bestand wären bzw. das Kollektiv bilden.

Würde ein Versicherer allerdings nur eines dieser Risiken in seinen Bestand aufnehmen, so könnte kein Risikoausgleich im Kollektiv stattfinden.

Beide dieser Annahmen wurden in der vorliegenden Studie - separat - berücksichtigt.

### 3.2.2 Versicherte Gefahren und versicherter Schaden eines nuklearen Katastrophenfalls

Angelehnt an die oben beschriebenen Zusammenhänge Risiko - Gefahr - Schaden sowie den erläuterten Kriterien der Versicherbarkeit werden im Folgenden nur Gefahren betrachtet, die zum Eintreten des versicherten Schadens durch einen nuklearen Katastrophenfall an einem KKW (als versichertes Risiko) führen können. Die im Rahmen der INES-Skala als kleinerer Störfall oder Unfall charakterisierten Schäden (Stufen 1 bis 6 der Skala) werden hier nicht betrachtet.

Die Gefahren des KKW-Betriebs, die Schadenfälle bis zum (Höchst-)Schadenfall (nuklearer Katastrophenfall) auslösen können, sind sehr komplex und lassen sich nach ihren qualitativen Merkmalen grob einteilen in:

- unbewusste Auslöser
  - technisches Versagen (bspw. fehlerhafte Technik, veraltete Bausubstanz, etc.)
  - menschliches Versagen (bspw. falsche Einschätzung einer Situation, Bedienungsfehler, Müdigkeit, etc.)
  - (Natur-)Katastrophen (bspw. Erdbeben, Überschwemmung, ungewollter Flugzeugabsturz) Müdigkeit, etc.)
- bewusste Auslöser
  - gezielte Sabotage (intern durch eigene Mitarbeiter oder extern durch Dritte)
  - Terrorakte (bspw. durch einen Flugzeugabsturz, Angriff anhand von Lenkwaffen)

In die Ermittlung der Versicherungsprämie für das Haftungsrisiko, das für KKW-Inhaber aus dem KKW-Betrieb resultiert, werden alle möglichen Arten von Gefahren und alle möglichen Arten von Schäden einbezogen, weshalb von dem Versuch einer abschließenden Aufzählung beider Aspekte abgesehen wird.

Die Gefahren beeinflussen, wie später im Kapitel 5 anhand beispielhafter Szenarien dargestellt, insbesondere die Schadeneintrittswahrscheinlichkeit. In diesem Kapitel werden Gefahren, wie u.a. technisches Versagen aufgrund von Alterung, menschliches Versagen, Erdbeben oder gezielter Flugzeugabsturz, beschrieben und Annahmen über deren Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit

getroffen.

Hinsichtlich der quantitativen, räumlichen und zeitlichen Merkmale von Gefahren, die einen nuklearen Katastrophenfall auslösen können, und hinsichtlich Schäden, die entstehen, werden ebenfalls prinzipiell keine Einschränkungen vorgenommen.

Jeder nukleare Katastrophenfall wird eine Vielzahl von Schäden in technischen, sozialen und ökologischen Umsystemen verursachen. Im Protokoll zur Änderung des Pariser Übereinkommens wurden diese möglichen Schäden im Artikel 1 Abs. a Ziffer (vii) wie folgt definiert:

Nr.1 „Tötung oder Verletzung eines Menschen,

Nr.2 Verlust von oder Schaden an Vermögenswerten,

sowie folgender Schaden in dem durch das Recht des zuständigen Gerichts festgelegten Ausmaß:

Nr.3 wirtschaftlicher Verlust auf Grund des unter Nummer 1 oder 2 aufgeführten Verlusts oder Schadens, soweit er unter diesen Nummern nicht erfasst ist, wenn davon jemand betroffen ist, der hinsichtlich eines solchen Verlusts oder Schadens anspruchsberechtigt ist;

Nr.4 die Kosten von Maßnahmen zur Wiederherstellung geschädigter Umwelt, sofern diese Schädigung nicht unbeträchtlich ist, wenn solche Maßnahmen tatsächlich ergriffen werden oder ergriffen werden sollen, und soweit diese Kosten nicht durch Nummer 2 erfasst werden;

Nr.5 Einkommensverlust aus einem unmittelbaren wirtschaftlichen Interesse an der Nutzung oder dem Genuss der Umwelt, der infolge einer beträchtlichen Umweltschädigung eingetreten ist, soweit dieser Einkommensverlust nicht durch Nummer 2 erfasst wird;

Nr.6 die Kosten von Vorsorgemaßnahmen und anderer Verlust oder Schaden infolge solcher Maßnahmen.“<sup>99</sup>

Bedingung für die Anerkennung als Schäden in diesem Sinne ist, dass sie durch ionisierende Strahlung verursacht werden, die von einer Strahlenquelle, Kernbrennstoffen oder radioaktiven Erzeugnissen innerhalb der Anlage eines KKW oder durch eine Kernanlage und deren Betrieb verursacht werden.<sup>100</sup>

Um die Komplexität des Schadens besser erfassbar zu machen, wurde durch Hahn/Sailer (1987) eine Unterteilung der möglichen Schäden in sechs Kategorien von Schadenarten, die jeweils wieder einzelne Unterschadenarten besitzen, vorgenommen. Die Abbildung 3.3 zeigt diese Einteilung möglicher Schadenarten.

<sup>99</sup> Art. 3 Abs. a des Protokolls der Änderungen des Pariser Übereinkommens (2004).

<sup>100</sup> Vgl. Art. 3 Abs. a des Protokolls der Änderungen des Pariser Übereinkommens (2004).

- 1. Auswirkungen auf Leben und Gesundheit der Menschen**
  - Tote durch Unfalleinwirkungen
  - Spaettote, z.B. Krebs durch Unfallfreisetzungen
  - akut Kranke nach Unfall, wieder heilbar
  - chronisch Kranke nach Unfall
  - genetische Schaeden
  - psychische Schaeden
- 2. Auswirkungen auf andere Lebewesen**
  - Verlust von wirtschaftlich genutzten Lebewesen
  - Verlust haeufiger wildlebender Lebewesen
  - Verlust seltener / aussterbensbedrohter Arten
  - Verlust von Biotopen
  - Auswirkungen auf Infrastruktur
  - Trinkwasserverseuchung kurzfristig/langfristig
  - Bodenverseuchung
  - beseitigbare Oberflaechenkontamination
  - nicht beseitigbare Oberflaechenkontamination
  - Unbrauchbarmachung von Nachbaranlagen
  - Unbrauchbarwerden von sonstiger Infrastruktur
- 3. Volkswirtschaftliche Auswirkungen inkl. Katastrophenschutzmassnahmen**
  - Kosten fuer Messungen und Katastrophenschutz
  - Kosten und Folgen der Beseitigung
  - Kosten und Folgen der Evakuierung
  - Kosten der Umsiedlung
  - Produktionsverluste ausserhalb der Unfallanlage
  - Folgekosten von Produktionsverlusten
  - Imageverlust fuer Unternehmen oder Branchen
- 4. Soziale und politische Auswirkungen**
  - Auswirkungen auf das Verhalten einzelner
  - Auswirkungen auf das Verhalten gesellschaftlicher Gruppen
  - Aenderungen des Sozialverhaltens
  - Aenderungen der sozialen und politischen Massstaebe
  - Aenderungen der Gesellschaft und des politischen Systems
  - Beeintraechtigung internationaler Beziehungen
  - Proliferation
- 5. Oekologische Auswirkungen**
  - Auswirkungen auf die Intaktheit der Biosphaere
  - Auswirkungen auf Oekologische Ressourcen
  - Aenderung natuerlicher Bedingungen

Abbildung 3.3: Schadenarten eines nuklearen Katastrophenfalls (Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Hahn/Sailer 1987])

Die quantitative Ermittlung, d.h. monetäre Bewertung der einzelnen Schäden dient u.a. zur Berechnung des gesamten Schadens, der sich aus einem nuklearen Katastrophenfall ergeben kann. Die daraus ermittelte Summe bezieht der Versicherer in die Kalkulation der notwendigen Haftpflichtversicherungsprämie ein.<sup>101</sup> In der vorliegenden Studie wird die Versicherungsprämie auf Grundlage nur eines nuklearen Katastrophenfalls bzw. eines Höchstschadens in einem KKW in Deutschland ermittelt, d.h. es wird das Eintreten eines Schadenkumuls<sup>102</sup> ausgeschlossen.

Das Ausmaß des Schadens hängt von der freigesetzten Menge radioaktiven Materials ab. In diesem Zusammenhang haben das zugrunde liegende versicherte Objekt (KKW) und dessen Eigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf das Schadenausmaß. So birgt beispielsweise ein Kernkraftwerk der älteren Generation andere Gefahren (bspw. hinsichtlich Ursache, Zeitpunkt und Ausmaß möglicher Schäden) als ein Kernkraftwerk, welches nach einem neueren Stand der (Sicherheits-)Technik gebaut wurde.

Generell gestaltet sich die Quantifizierung der Schadenarten, die aus einem nuklearen Katastrophenfall resultieren, als sehr schwierig, da für viele Schadenarten keine Quantifizierungsansätze existieren. Dies ist bspw. für die Schadenarten „Änderung des Sozialverhaltens“ oder „Auswirkungen auf die Intaktheit der Biosphäre“ der Fall. So bestehen etwa in Bezug auf die Schadenart „Aussterben einer Tierart“ zum Einen Unsicherheit darüber, wie man diesen Schaden monetär bewerten sollte, zum anderen sind die langfristigen Folgeschäden ungewiss, z.B. im Hinblick auf die Frage, ob das zukünftige Aussterben von Tierarten als direkte oder indirekte Folge eines nuklearen Katastrophenfalls gewertet werden kann.<sup>103</sup>

Das Schadenausmaß wird durch eine Vielzahl weiterer Parameter beeinflusst. Hierzu zählen insbesondere witterungsbedingte Parameter zur Ausbreitungsberechnung und Parameter zu den Eigenschaften des betroffenen Gebietes, wie bspw.

- Windrichtung und -geschwindigkeit,
- Niederschlag zum Zeitpunkt des Unfalls bzw. während der Freisetzung von Radioaktivität,
- Freisetzungshöhe,
- Thermik,

---

<sup>101</sup> Zur Ermittlung der jeweiligen Teilschäden siehe Kapitel 4.

<sup>102</sup> Schadenkumul bedeutet, dass aufgrund der Realisation einer Gefahr (z.B. eines Erdbebens) Schäden an mehreren voneinander unabhängigen versicherten Risiken im Bestand eines Versicherungsunternehmens (z.B. zwei oder mehr KKW, die bei einem Versicherer versichert sind) entstehen.

<sup>103</sup> Um die Weitläufigkeit und Unmöglichkeit der Auswirkungen zu verdeutlichen sei das Beispiel des Magenbrüter-Frosches *Rheobatrachus Silum* kurz erläutert. Der Frosch starb 2008 aus und erst nach seinem Aussterben wurde bekannt, dass dessen Kaulquappen mittels einer speziellen Substanz eine Schutzfunktion gegenüber der Magensäure des Muttertiers entwickelten. Möglicherweise hätte diese Substanz bei frühzeitigerer Erforschung ein Mittel gegen Magengeschwüre sein können. Der ökonomische Wert des ausgestorbenen Frosches - unbenommen von seinem Wert als Lebewesen und unwiederbringliche Art - ist daher unbestimmbar. Vgl. [Fokken 2008].

- Diffusion des freigesetzten radioaktiven Materials betreffende Parameter (z.B. Temperatur und Strahlungsbilanz),
- Oberfläche des betroffenen Gebietes und
- Nutzung des kontaminierten Gebietes (z.B. Agrarwirtschaft, Forstwirtschaft, ländliches und städtisches Siedlungsgebiet, Industriegebiet).<sup>104</sup>

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden nach einer umfassenden Literaturrecherche und -sichtung<sup>105</sup> die verschiedenen Quantifizierungsansätze bzw. konkret genannten angenommenen Schadenhöhen bereits existierender Expertenstudien für die Quantifizierung der Schadenarten verwendet. Auch die genannten (witterungsbedingten) Parameter wurden bei der Schätzung und Ermittlung der Versicherungsprämie im Rahmen der hier vorliegenden Studie berücksichtigt. Beispielsweise wurden, soweit statistisch vorhersagbar, die Windrichtung und -geschwindigkeit, der Niederschlag sowie die freigesetzte Menge des radioaktiven Materials in die Berechnungen einbezogen. Details hinsichtlich der berücksichtigten Faktoren sind in Kapitel 4 systematisiert.

Grundsätzlich wurden in dieser Studie für die Ermittlung der Schadenhöhe und deren Eintrittswahrscheinlichkeit vorsichtige Annahmen getroffen, da die aus den vorliegenden Studien einbezogenen Werte wie beispielsweise der Risikoeffizient zur Abschätzung der Anzahl der durch radioaktive Strahlung Geschädigten selbst Mittelwerte aus Ergebnissen epidemiologischer Studien darstellen.

### 3.2.3 Relevante Annahmen für die Berechnung der Versicherungsprämie

Der Versicherer finanziert durch die Einnahme der Haftpflichtversicherungsprämien von einem oder mehreren versicherten Risiken innerhalb des Bestandes die erwarteten Auszahlungen für Entschädigungsleistungen eines individuellen nuklearen Katastrophenschadenfalls. Der zu versichernde Schaden eines einzelnen KKW-Unfalls im Sinne des nuklearen Katastrophenschadenfalls ergibt sich aus der Summe der auftretenden Teilschäden in den Umsystemen eines KKW. Zur Ermittlung der zu erwarteten Schadenkosten wurden die Ergebnisse bereits erstellter Untersuchungen über Schadenhöhen<sup>106</sup> und Schadeneintrittswahrscheinlichkeiten<sup>107</sup> sowie Annahmen über die Eintrittswahrscheinlichkeit beeinflussende Szenarien<sup>108</sup> verwendet.

#### *Risikoprämie*

<sup>104</sup> Weitere Ausführungen zu den meteorologischen Parametern in [Strahlenschutzkommission 2003], S. 19 ff.

<sup>105</sup> Eine Liste der Literatur, die über die des Literaturverzeichnis hinaus geht und bei den Betrachtungen mit berücksichtigt wurde, findet sich in Anhang C.

<sup>106</sup> Siehe hierzu Kapitel 4.

<sup>107</sup> Siehe hierzu Kapitel 5.1.

<sup>108</sup> Siehe hierzu Kapitel 5.2.

Die reine Risikoprämie entspricht nach dem versicherungstechnischen Äquivalenzprinzip dem Äquivalent des Schadenerwartungswerts eines nuklearen Katastrophenfalls für ein KKW.<sup>109</sup> Es werden sowohl die Schadenhöhe als auch verschiedene Eintrittswahrscheinlichkeiten anhand dargestellter Szenarien<sup>110</sup> bestimmt.

Für die Berechnung der reinen Risikoprämie wird daher der Erwartungswert der Verteilung des Gesamtrisikos eines nuklearen Katastrophenfalls für ein individuelles KKW zugrunde gelegt. Da allerdings pro KKW nur für wenige einbezogene Teilschäden spezifische Werte vorliegen, unterscheiden sich die Werte im Vergleich der 17 verschiedenen betrachteten KKW nur marginal. Auf Grundlage der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schadenhöhen der 17 KKW wurde in Kapitel 6.2 eine Höchstschadenerwartung (Maximalschaden) eines in Deutschland befindlichen KKW simuliert. Dazu wurden Methoden der Extremwertstatistik angewandt. Die ermittelte Schadenhöhe wird mit allen Schadeneintrittswahrscheinlichkeiten - auf Grundlage der Ergebnisse verschiedener Studien (Kapitel 5.1) und Szenarien (Kapitel 5.2) - kombiniert. Erst zum Ende des Kalkulationszeitraumes ist die vollständige Schadenssumme erreicht.

Bei einer symmetrischen Schadenverteilung deckt die reine Risikoprämie als Äquivalent des Schadenerwartungswerts nur 50 Prozent der Schäden ab; daher wird in die zu zahlende Prämie vom Versicherer ein Sicherheitszuschlag einkalkuliert.

#### *Sicherheitszuschlag auf die Risikoprämie*

Dieser Sicherheitszuschlag wird auch direkt in § 5 Deckungsrückstellungsverordnung (DeckRV) im Rahmen der Kalkulation einer Versicherungsprämie gefordert: „Bei der nach versicherungsmathematischen Methoden vorzunehmenden Ableitung von Rechnungsgrundlagen sind sämtliche Umstände, die Änderungen und Schwankungen der aus den zugrunde liegenden Statistiken gewonnenen Daten bewirken können, zu berücksichtigen und nach versicherungsmathematischen Grundsätzen geeignet zu gewichten. Die Ableitung von Rechnungsgrundlagen auf der Basis eines besten Schätzwertes genügt nicht. Die Abschätzung künftiger Verhältnisse muss eine nachteilige Abweichung der relevanten Faktoren von den getroffenen, aus den Statistiken abgeleiteten Annahmen beinhalten. Dies gilt sowohl für die grundsätzlich auf ein einzelnes Risiko abzustellende Bewertung als auch sinngemäß für die Bewertung bei nicht individualisierbaren Risiken, für die keine ausreichenden Statistiken verfügbar sind.“<sup>111</sup>

Bei einer symmetrischen Schadenverteilung im Sinne einer Normalverteilung entspricht bspw. ein Sicherheitszuschlag in Höhe der Streuung  $\sigma$  auf die Risikoprämie einer Abdeckung von 68,3 Prozent der Schäden unterhalb dieser Schaden(Normal)verteilung. Ein Sicherheitszuschlag i.H.v.  $2\sigma$

---

<sup>109</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 60.

<sup>110</sup> Siehe hierzu Kapitel 5.

<sup>111</sup> § 5 DeckRV.

bewirkt eine Abdeckung von 95,4 Prozent und i.H.v.  $3\sigma$  eine Abdeckung von 99,7 Prozent. Dieser zuletzt genannte Sicherheitszuschlag ist in der Sachversicherung üblich.

Das Risiko eines nuklearen Katastrophenfalls kann aber nicht durch eine Normalverteilung beschrieben werden. Daher entspricht bei Verwendung einer anderen, für das Risiko des nuklearen Katastrophenfalls passenderen Verteilungsform (z.B. hinsichtlich ihrer Schiefe) der Sicherheitszuschlag i.H.v.  $3\sigma$  nicht einer Abdeckung von 99,7 Prozent. Um aber mindestens eine Abdeckung i.H.v. 99,5 Prozent zu erreichen, wie es die Solvabilitätsvorschriften für Versicherer fordern, muss daher ein höherer Sicherheitszuschlag i.H.v.  $6\sigma$  verwendet werden. Dieser Sicherheitszuschlag wird (in der Kreditwirtschaft) für die Kalkulation von Versicherungsprämien für Risiken mit extrem hohen Schadenerwartungswerten und sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten verwendet. Da dies dem Charakter des Risikos eines nuklearen Katastrophenfalls entspricht, eignet ist dieser Sicherheitszuschlag von  $6\sigma$  für die in der Studie durchgeführte Berechnung der Versicherungsprämie. Abbildung 3.4 zeigt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung um den beschriebenen Sachverhalt einer reinen Risikoprämie und des Sicherheitszuschlags zu veranschaulichen.<sup>112</sup>

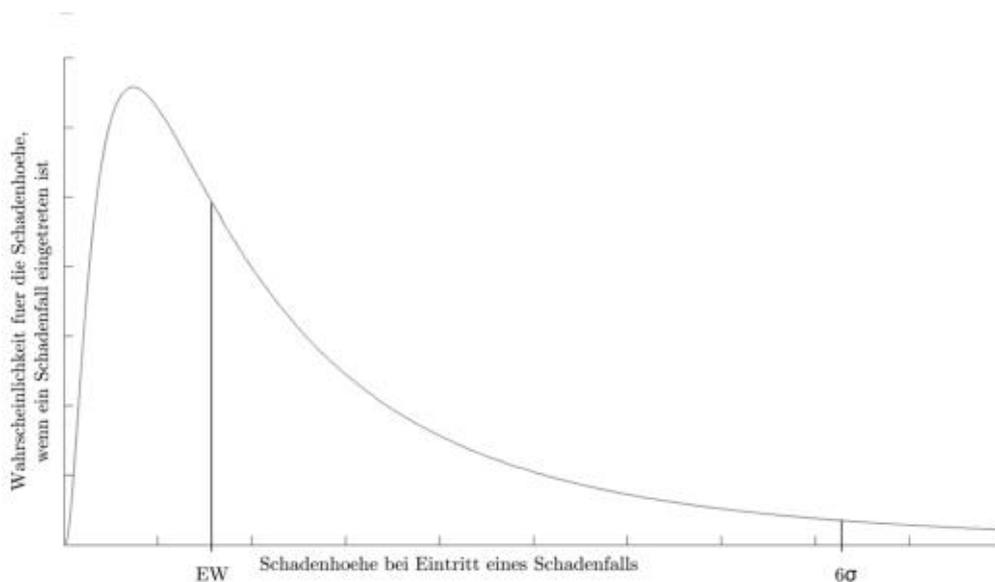


Abbildung 3.4: Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Veranschaulichung des Sicherheitszuschlags (Quelle: Eigene Darstellung)

Prämienbestandteile wie Versicherungsteuer, Gewinn- oder Betriebskostenzuschlag wurden im Rahmen der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt, da sie im Vergleich mit der Risikoprämie und dem Sicherheitszuschlag verschwindend gering sind und zu keiner grundsätzlichen Änderung der

<sup>112</sup> Dies ist eine beliebige Skizze einer Verteilung und entspricht nicht der Verteilung des Höchstschadens eines nuklearen Katastrophenfalls.

---

Methode oder des Ergebnisses geführt hätten.

Die Versicherungsprämie wurde weiterhin unter der Annahme kalkuliert, dass keine Prämienfreistellung erfolgt, d.h. dass die Prämie auch nach dem Wegfall des Risikos - nach Eintritt des Schaden im Sinne eines nuklearen Katastrophenfalls - weiter bezahlt werden muss, da eine Entschädigungsleistung nicht vor dem vollständigen Aufbau der Deckungssumme erfolgen kann.

Auch ein Änderungsrisiko - im Sinne eines sich während des Zeitraums der Vertragslaufzeit ändernden Risikos - wurde im Rahmen der Berechnungen in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Es wurde davon ausgegangen, dass der Versicherer durch die jährlich eingehenden Prämien für den Fall des Eintretens eines nuklearen Katastrophenfalls eine Risikoreserve bildet, das darin enthaltene Vermögen in Kapitalanlagen investiert und die mit diesem bestimmten Schadenfall einhergehenden finanziellen Verpflichtungen in eine (steuerfreie) Rückstellung einstellt.

In der hier vorliegenden Studie wurde der Verzinsungsaspekt eingezahlter Prämien berücksichtigt und von einem Zinssatz i.H.v. 2 Prozent ausgegangen.<sup>113</sup>

### **3.2.4 Abwägung der Kriterien und Grenzen der Versicherbarkeit in Bezug auf einen nuklearen Katastrophenfall**

Die Versicherbarkeit eines Risikos untersteht immer einem Nutzenabwägungskalkül. Das heißt, der Versicherer und der Versicherungsnehmer wägen ihr Nutzen-Missnutzen-Verhältnis ab. Der Nutzen für den Versicherungsnehmer resultiert aus dem Transfer der Schadenverteilung und der damit bestehenden Zusage des Versicherers, für die finanziellen Folgen eines Schadens aufzukommen. Der Missnutzen für den Versicherungsnehmer resultiert aus der zu tragenden Versicherungsprämie. Für den Versicherer stellt sich die Nutzen-Mißnutzen-Überlegung genau invers dar. Der Nutzen wird insbesondere aus der vereinnahmten Prämie bestimmt. Diese wird, wie dargestellt, auf Basis der Schadeneintrittswahrscheinlichkeit, des Schadenerwartungswerts und der Streuung um den Erwartungswert berechnet. Der Missnutzen resultiert aus der Zahlung der vereinbarten Leistung im Schadenfall, von dem der Versicherer nicht mit endgültiger Sicherheit beurteilen kann, ob und wann und in welcher Höhe er eintritt.<sup>114</sup>

Stellt die Versicherung für beide Seiten einen Nutzen dar, der den Missnutzen übersteigt, kommt es zum Vertragsabschluss. Bei dieser Abwägung bezieht sich der Versicherer auch auf die Kriterien der Versicherbarkeit, also Zufälligkeit, Schätzbarkeit, Eindeutigkeit, Unabhängigkeit und Bestimmung der Größe des Schadens (siehe Kapitel 3.1.4 Kriterien und Grenzen der Versicherbarkeit).

---

<sup>113</sup> Vgl. hierzu Kapitel 6.2.

<sup>114</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 35 ff.

Bezogen auf den nuklearen Katastrophenfall und den damit verbundenen Höchstschaden, ist die Zufälligkeit eingeschränkt, weil gezielte Sabotage oder Terrorakte auch zu den zu versichernden Gefahren zählen<sup>115</sup>. Diese sind von den Terroristen genau mit dem Ziel geplant, den größtmöglichen Schaden zu erzielen.<sup>116</sup> Allerdings bezieht sich das Kriterium insbesondere darauf, dass Zufälligkeit über Entstehung, Zeitpunkt und/oder Größe des Schadens aus Sicht des Versicherers und des Versicherungsnehmers besteht. D.h. es muss eine Unabhängigkeit vom Willen oder Verhalten des Versicherungsnehmers (Fahrlässigkeit), in diesem Fall des Inhabers des KKW, gewährleistet sein.<sup>117</sup> Dieses Kriterium kann als hinreichend erfüllt angesehen werden.

Die Schwierigkeit der Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit oder Schadenhöhe eines nuklearen Katastrophenfalls besteht darin, dass einerseits kaum Schadenstatistiken vorliegen, deren Vergleich eine hinreichend sichere Schätzung ermöglichen könnte. Ausschließlich annähernd vergleichbare Ereignisse, wie in Tschernobyl oder Harrisburg sowie empirische Studien, wie u.a. zur Beschaffenheit der KKW-Anlagen, sind der Schätzung dienlich. Andererseits sind die Risikoursachen für einen nuklearen Katastrophenfall und deren Auswirkungen sehr vielschichtig, so dass eine Schätzung nur mit großer Unsicherheit erfolgen kann.<sup>118</sup> Mit dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik verbessern sich die Simulationsmethoden und -modelle für Katastrophenrisiken, was zum besseren Verständnis des Risikos (im Sinne von Ursache-Wirkungs-Analysen) und damit zur möglichen Ausweitung der Versicherbarkeit führen könnte.<sup>119</sup>

Die Gefahren, die zu einem nuklearen Katastrophenfall führen können und die möglichen resultierenden Schäden bilden, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln angedeutet, ein sehr komplexes System. Daher ist es unmöglich, bereits im Voraus (z.B. zum Zweck der Prämienkalkulation) alle möglichen Gefahren und Schäden in ihrer Gesamtheit exakt zu bestimmen. Ebenso ist es nicht immer möglich, einen einzelnen Krebs- oder Missbildungsfall eindeutig dem nuklearen Katastrophenfall zuzuordnen, gerade wenn es sich um Spätfolgen und Erbschäden handelt. Damit ist das Kriterium der Eindeutigkeit der Zuordnung eines Schadens als Folge eines Ereignisses nicht erfüllt.

Eine weitere Voraussetzung für die Versicherbarkeit eines Risikos ist dessen Unabhängigkeit von anderen versicherten Risiken im gleichen Bestand - im Sinne einer Unkorreliertheit. Das Kriterium der Unabhängigkeit ist dann erfüllt, wenn eine sich realisierende Gefahr (z.B. Erdbeben) nicht zu einem nuklearen Katastrophenfall in mehreren bei einem Versicherer versicherten KKW führt.

Bezogen auf das Kriterium der Größe des Schadens, nimmt das potenzielle Schadenausmaß bei

---

<sup>115</sup> Siehe Kapitel 3.2.2 Versicherte Gefahren und versicherter Schaden eines nuklearen Katastrophenfalls, dort wurde dargelegt, dass im Rahmen der vorliegenden Studie kein Gefahrenausschluss vorgenommen wird.

<sup>116</sup> Ausführungen zur Zufälligkeit von Terrorismusrisiken in [Nguyen 2009], S. 7 und [Benzin 2005], S. 723.

<sup>117</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 38.

<sup>118</sup> Vgl. [Nguyen 2009], S. 7.

<sup>119</sup> Vgl. [Nguyen 2009], S. 8.

---

Katastrophenrisiken - so auch einem nuklearen Katastrophenfall - extreme Höhen an und kann mitunter aufgrund verschiedener Szenarien bis ins „Unendliche“ erwachsen. Dies ist der Grund, warum in der bisherigen Praxis der KKW-Versicherung Haftungsgrenzen mittels Deckungssummen (im Sinne von Erstrisikoversicherungen) vereinbart werden.<sup>120</sup>

### 3.2.5 Zwischenfazit

Der nukleare Katastrophenfall als zu versicherndes Risiko stellt sich als ein dynamisches Risiko dar.<sup>121</sup> Aufgrund dieser gegebenen Dynamik muss das Risiko eines nuklearen Katastrophenfalls auch hinsichtlich seiner Eigenschaften und Versicherbarkeit stets neu überprüft werden.

Der Versicherer muss jedoch den Höchstschaden eines nuklearen Katastrophenfalls genau bestimmen können, um eine Prämie zur Deckung der Auszahlungen im Schadenfall ableiten zu können.<sup>122</sup>

Die Ausführungen in diesem Kapitel machen deutlich, dass das Risiko eines nuklearen Katastrophenfalls die Voraussetzungen der Versicherbarkeit nur in einem sehr eingeschränkten Maße erfüllt bzw. sich deren Anwendung aufgrund der Komplexität der zu versichernden Gefahren und des Schadens im Falle eines nuklearen Katastrophenfalls sehr schwierig gestaltet.

Aufgrund der nur eingeschränkten Erfüllung der Kriterien der Versicherbarkeit stellt die in der vorliegenden Studie berechnete Versicherungsprämie eine fiktive Prämie dar. In die Berechnung dieser fiktiven Prämie sind die Ergebnisse und Annahmen einer Vielzahl bestehender empirischer Studien zu den Gefahren und den Auswirkungen nuklearer Strahlung auf Umssysteme einbezogen worden. Insbesondere wird eine Vielzahl von Annahmen getroffen und über die Schwierigkeiten der Versicherbarkeit eines nuklearen Katastrophenfalls „hinweg“ gesehen.

---

<sup>120</sup> Vgl. [Nguyen 2009], S. 9.

<sup>121</sup> Siehe hierzu die Ausführungen zum nuklearen Katastrophenfall als Entwicklungsrisiko in Kapitel 3.2.1

<sup>122</sup> Vgl. [Farny 2006], S. 39 f. und [Nguyen 2009], S. 9.

# Kapitel 4

## Existierende Quantifizierungsmethoden für die Abschätzung der Schadenhöhe

### 4.1 Grundlagen der vorhandenen Ansätze

#### 4.1.1 Grundlagen der Dosis-Wirkungs-Beziehungen radioaktiver Strahlung

Von allen Schäden, die durch freigesetzte radioaktive Strahlung entstehen, machen die Schäden an der Gesundheit der betroffenen Personen den größten Anteil aus. Daher ist es essentieller Bestandteil aller untersuchten Studien zur Quantifizierung von Schadenausmaßen nach einem Reaktorunfall, die Anzahl der betroffenen Personen und die Art der Auswirkungen abzuschätzen. Das Ausmaß der zu erwartenden strahleninduzierten Schäden hängt dabei von der konkreten Strahlensituation, insbesondere von der Höhe und Dauer der Exposition, ab.<sup>123</sup> Bereits eine sehr geringe Energiedosis<sup>124</sup> - definiert als die Energiemenge einer ionisierenden Strahlung, die ein durchstrahlter Körper bezogen auf seine Masse aufnimmt - kann bereits erhebliche Strahlenschäden verursachen, „denn die Energieabgabe der Strahlung geht in extrem kleinen Bereichen vor sich, wodurch lebenswichtige Moleküle zerstört werden können“<sup>125</sup>.

Allerdings hängt die Art der Schäden von zahlreichen Faktoren ab, insbesondere von der Art der ionisierenden Strahlung. Um die unterschiedliche Wirksamkeit auf den menschlichen Organismus zu berücksichtigen, wird die Energiedosis mit einem Strahlungswichtungsfaktor multipliziert, der

---

<sup>123</sup> Vgl. [GRS 2000], S. 8.

<sup>124</sup> Energiedosis = absorbierte Strahlungsenergie/Masse, Einheit: Gy (Gray) = 1 Joule/kg.

<sup>125</sup> [Umweltlexikon Online a].

die relative biologische Wirksamkeit berücksichtigen soll. So wird beispielsweise Alphastrahlung als zwanzigmal so gefährlich wie die gleiche Menge Gammastrahlung bewertet. Als Ergebnis ergibt sich die Äquivalentdosis für den Menschen, welche durch die Einheit Sv (Sievert)<sup>126</sup> ausgedrückt wird. Ältere Studien verwenden häufig noch die Einheit rem (für engl. roentgen equivalent in man), wobei 1 rem 0,01 Sv entspricht. Anzumerken ist, dass der Strahlungswichtungsfaktor, der von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 1990 in der ICRP 60<sup>127</sup> definiert wurde, grundsätzlich auf der wissenschaftlich ermittelten relativen biologischen Wirksamkeit basiert, jedoch auch Prozessen der politischen Willensbildung unterworfen ist.

Aus der Äquivalentdosis lässt sich durch Berücksichtigung der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeit der einzelnen Organe und Gewebe in Bezug

- auf das Krebsrisiko und
- auf genetische Veränderungen aufgrund der Strahlung

die effektive Dosis berechnen, die das Risiko für das Auftreten stochastischer Wirkungen bei Exposition einzelner Organe und Gewebe oder des ganzen Körpers bewertet. Stochastische Strahlenwirkungen zeichnen sich dadurch aus, dass die Dosis lediglich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmt, nicht jedoch den Schweregrad. Wichtigste stochastische Strahlenwirkungen sind solide Krebserkrankungen, Leukämien und Erbkrankheiten. Zur Berechnung wird die Äquivalentdosis mit Wichtungsfaktoren für die einzelnen Organe multipliziert, die wiederum von der Internationalen Strahlenschutzkommission vorgeschlagen werden. „Eine gleichmäßige Bestrahlung des ganzen Körpers oder eine Bestrahlung einzelner Organe und Gewebe ergibt dasselbe Strahlenrisiko, wenn die effektive Dosis gleich ist.“<sup>128</sup> Die Einheit der effektiven Dosis ist ebenfalls das Sievert (Sv).

Bei Unfallsituationen wird die Dosis durch sogenannte Eingreifrichtwerte begrenzt. Diese dienen einerseits der Planung von Maßnahmen des Katastrophenschutzes und stellen andererseits die Obergrenzen dar, die die Durchführung dieser Maßnahmen in einer Unfallsituation zwingend im Sinne des Katastrophenschutzes begründen.<sup>129</sup> In den betrachteten Studien spielen diese Eingreifrichtwerte eine große Rolle, da sich aus ihnen beispielsweise die zu evakuierenden und langfristig umzuzielnden Gebiete ableiten lassen.

Schwierigkeiten in der Zuordnung von Strahlenwirkungen zu bestimmten Ereignissen (wie beispielsweise Reaktorunfällen) ergeben sich aus dem Umstand, dass die Wirkungen mit einer Latenzzeit von Jahren bis Jahrzehnten auftreten und von spontan auftretenden Krebserkrankungen, die mit einem Anteil von 20 bis 25 Prozent eine der Haupttodesursachen in der westlichen Welt darstellen,

<sup>126</sup> Da 1 Sv eine relativ große Äquivalentdosis darstellt, werden praktisch vorkommende Werte meist mit Hilfe eines SI-Präfixes in Millisievert ( $1mSv = 0,001Sv = 10^{-3}Sv$ ) oder Mikrosievert ( $1\mu Sv = 0,000001Sv = 10^{-6}Sv$ ) angegeben.

<sup>127</sup> [ICRP 1991].

<sup>128</sup> [GRS 2000], S. 8.

<sup>129</sup> Vgl. [BfS c], S. 10.

Massnahme	Eingreifrichtwerte		
	Organdosis (Schilddruese)	effektive Dosis	Integrationszeiten und Expositionspfade
Aufenthalt in Gebaueuden		10 mSv	aeussere Exposition in <b>7 Tagen</b> und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide
Einnahme von Iod-Tabletten	<b>50 mSv</b> Kinder und Jugendliche unter 18 Jahren sowie Schwangere, <b>250 mSv</b> Personen von 18 bis 45 Jahren		Organ-Folgedosis durch im Zeitraum von <b>7 Tagen</b> inhaliertes Radioiod
Evakuierung		100 mSv	aeussere Exposition in <b>7 Tagen</b> und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide
langfristige Umsiedlung		100 mSv	aeussere Exposition in <b>1 Jahr</b> durch abgelagerte Radionuklide
temporaere Umsiedlung		30 mSv	aeussere Exposition in <b>1 Monat</b>

Abbildung 4.1: Eingreifrichtwerte für Maßnahmen (Quelle: [BMU 2008 a])

nicht unterschieden werden können.

Um Risikowerte bei den im Strahlenschutz wichtigen, wesentlich kleineren Dosen von einigen mSv und darunter zu erhalten, ist man auf Extrapolationen vom höheren in den niedrigeren Dosisbereich angewiesen. Allgemein geht man dabei von einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis aus. Letzteres bedeutet die Annahme, dass es keine Dosis gibt, unterhalb der ein Risiko auszuschließen ist. Als „linear“ wird eine Dosis-Wirkungs-Beziehung bezeichnet, wenn die Wirkung im gleichen Verhältnis zu- oder abnimmt wie die applizierte Dosis. Es wird also davon ausgegangen, dass auch kleinste Strahlendosen, z.B. in der Größenordnung der natürlichen Strahlenexposition, ein gewisses, wenn auch sehr kleines Risiko mit sich bringen, Krebserkrankungen und Leukämie auszulösen. Dies ist eine theoretische Annahme; eine direkte epidemiologische Ermittlung des Risikoeffizienten ist in diesem Dosisbereich infolge der zufälligen Schwankungen der spontanen Erkrankungsrate prinzipiell nicht möglich. Die Übertragung der bei höheren Dosen beobachteten Risikowerte in den für epidemiologische Beobachtungen unzugänglichen niedrigen Dosisbereich mit Hilfe einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis wird durch molekularbiologische, zellbiologische und tierexperimentelle Untersuchungen gestützt.<sup>130</sup>

Unter Wissenschaftlern werden vielfältige Diskussionen im Zusammenhang mit der Annahme einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert - englisch: Linear-no-Threshold (LNT) - geführt. Selbst die ICRP führt in ihrer Empfehlung 103 aus, dass sich im Zuge aktueller wissenschaftlichen Diskussionen und Prüfungen mittlerweile ein internationaler Maßstab durchgesetzt hat, „wonach es für Situationen mit sehr kleinen Dosen die viele Personen betreffen sinnvoll ist, eine Grenze für die Individualdosis zu definieren, unterhalb derer die Angabe einer Kollektivdosis als

<sup>130</sup> Vgl. [Strahlenschutzkommission 1994], S. 5.

Maß für das Kollektivrisiko nicht mehr aufrechterhalten werden kann ('Unerheblichkeitsschwelle'). Diese Schwelle wurde für den Bereich von 10 Mikrosievert im Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung festgelegt. Die ICRP 103 empfiehlt wegen der bestehenden Unkenntnis des Krebsrisikos bei niedrigen Dosen und Dosisleistungen<sup>131</sup>, Todesfallberechnungen im Bereich kleiner Dosen grundsätzlich zu unterlassen.<sup>132</sup>

Die deutsche Strahlenschutzkommission hingegen bewertet die Evidenz für möglicherweise geringere Krebsrisikokoeffizienten bei niedrigen Dosen/Dosisleistungen im Vergleich zu akuten Strahlenexpositionen mit hohen Dosen als gering. Sie hält es deshalb nicht für angebracht, für Strahlenschutzbetrachtungen in diesen Expositionsbereichen von niedrigeren Koeffizienten auszugehen.<sup>133</sup>

Das strahleninduzierte Krebsrisiko ist zudem altersabhängig, sein Wert ändert sich also mit dem Alter der betroffenen Person zum Zeitpunkt der Exposition. Die Risikokoeffizienten für die Krebsinduktion unterschätzen die Auswirkungen in der Jugend und überschätzen sie im Alter.

Neben den bisher berücksichtigten stochastischen Strahlenwirkungen sind darüber hinaus weitere stochastische Effekte bekannt geworden, wie bspw. der strahlenbedingte Katarakt ohne Dosischwelle und der stochastische IQ-Verlust bei der Exposition von Föten im dritten und vierten Schwangerschaftsmonat. Beide Effekte werden zurzeit nicht bei der Berechnung der Effektiven Dosis berücksichtigt.<sup>134</sup>

Den Annahmen eines linearen Zusammenhangs folgend, nach denen es gleichbedeutend ist, ob eine kleine Zahl von Personen eine hohe Dosis erhält oder eine große Zahl eine sehr kleine, lässt sich aus der Summe der Individualdosen die Kollektivdosis einer Bevölkerungsgruppe berechnen, indem das Produkt aus dem Mittelwert der effektiven Äquivalentdosis in dieser Bevölkerungsgruppe und der Anzahl der Personen dieser Gruppe gebildet wird. Die Kollektivdosis in einer Bevölkerung ist die Summe der Kollektivdosen der einzelnen Bevölkerungsgruppen und wird in Personen-Sievert angegeben. Allerdings führt die Aggregation von extrem geringen individuellen Dosen für eine große Population zu einer signifikanten Kollektivdosis, wodurch der geringe Grad des individuellen Risikos verschleiert wird.<sup>135</sup>

Diese Dosis wird in den meisten im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Studien als Grundlage für die Abschätzung der zu erwartenden zusätzlichen Krebserkrankungen und genetischen Schäden genutzt, da nach einem Reaktorunfall große Bevölkerungsgruppen über lange Zeiträume relativ geringen individuellen Strahlendosen ausgesetzt sind. In der Zusammenfassung wird deutlich, dass

---

<sup>131</sup> Dosisleistung ist die Dosis pro Zeiteinheit (Sekunde, Minute).

<sup>132</sup> [DSF 2009], S. 3.

<sup>133</sup> Krebsrisiko durch mehrjährige Expositionen mit Dosen im Bereich des Grenzwertes für die Berufslebensdosis nach § 56 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) - Empfehlung der Strahlenschutzkommission.

<sup>134</sup> Vgl. [Krieger 2009], S. 305.

<sup>135</sup> Vgl. [OECD 2003], S. 42.

das Konzept der Kollektivdosis, welches von den meisten übergreifenden Studien zur Abschätzung der ökonomischen Folgen eines schweren Reaktorunfalls genutzt wird, einer Vielzahl von Annahmen unterliegt und etliche Sachverhalte nur stark vereinfacht wiedergibt. Eine genaue Berechnung der einzelnen effektiven Dosen ist auf Grund der Vielzahl an zu treffenden Annahmen für einen Reaktorunfall (z.B. Art und Umfang der freigesetzten Nuklide und der Expositionspfade) als ebenso vereinfachend anzusehen. Da solche neuen und genaueren Studien zur Unfallfolgenabschätzung in Kernkraftwerken in Deutschland nicht vorliegen, werden im Folgenden die einzelnen bisher veröffentlichten Ansätze<sup>136</sup> zur Quantifizierung analysiert. Die Untersuchungsergebnisse dieser Ansätze bilden auch die Basis für die Ableitung einer mathematischen Verteilung aus der Bandbreite der darin vorgestellten Schadahöhen.

#### 4.1.2 Der Risikoeffizient zur Beschreibung des Strahlenkrebsrisikos

„Als Strahlenrisiko bezeichnet man die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer durch eine Strahlenexposition bewirkten nachteiligen Wirkung bei einem Individuum in einem bestimmten Zeitraum.“<sup>137</sup>

Wird eine lineare Abhängigkeit zwischen Dosis und Mortalität angenommen, ergibt sich je eine Gerade für Leukämie und Krebs. Die Steigung der Geraden in der Dosis-Wirkungs-Beziehung entspricht dem Risikoeffizienten, das Risiko (mit der Einheit Tote pro Jahr) ist also Koeffizient mal Dosis.

Die Abschätzung des Risikoeffizienten für alle Altersstufen der exponierten Personen beruht hauptsächlich auf epidemiologischen Studien an den Überlebenden der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki.

Die Internationale Strahlenschutzkommission gibt für den Risikoeffizienten Schätzungen ab, die jeweils auf der Grundlage aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse beruhen. In ihrer Empfehlung von 1990 schätzt die ICRP beispielsweise das zusätzliche individuelle Lebenszeit-Krebsmortalitätsrisiko durch ionisierende Strahlung bei Ganzkörperexposition mit niedriger Einzeldosis auf insgesamt 5 Prozent pro Sievert. Ein Beispiel zur Verdeutlichung dieses Risikos lässt sich mit der Aussage geben, dass bei einer Exposition von 100 Personen mit einer Dosis von einem Sievert fünf dieser Personen im Laufe ihres Lebens wahrscheinlich an Krebs erkranken. Ein Großteil der betrachteten Studien verwendet diesen Risikoeffizienten, um aus der Kollektivdosis die stochastisch zu erwartende Anzahl von Todesfällen auf Grund von Krebserkrankungen abzuleiten.

Da Erfahrungen mit großflächigen und langfristigen Expositionen nur aus dem Reaktorunglück

---

<sup>136</sup> Einen Überblick über existierende Studien in dieser Thematik bietet das Literaturverzeichnis im Anhang C. Darin sind sowohl direkt zitierte Veröffentlichungen enthalten als auch solche, die lediglich einer Lektüre unterzogen wurden und den fachlichen Grundbau der hier vorliegenden Studie stützen.

<sup>137</sup> [Krieger 2009], S. 305.

---

in Tschernobyl gewonnen werden konnten, wird in der Studie von Hohmeyer<sup>138</sup>, die sich mit den theoretischen Auswirkungen eines Kernschmelzunfalls in Deutschland beschäftigt, ein weiterer Faktor eingeführt, welcher der höheren Bevölkerungsdichte in Deutschland Rechnung tragen soll. Als Argument wird angeführt, dass in einem dicht besiedelten Land wie Deutschland bei einem Kernschmelzunfall wesentlich mehr Personen der freigesetzten Strahlung ausgesetzt wären, als dies im betroffenen Raum um Tschernobyl der Fall war. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass im Unglücksfall eine sofortige Evakuierung von Millionen von Menschen zu bewältigen wäre, scheint der Ansatz eines solchen Faktors angemessen. Er orientiert sich an dem Verhältnis der Bevölkerungsdichte der vom Tschernobyl-Unfall betroffenen Regionen und der durchschnittlichen Dichte der Bundesrepublik Deutschland.

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über die verschiedenen Quantifizierungsansätze gegeben, deren Ergebnisse ganz oder teilweise in die Berechnung einer Versicherungsprämie in Kapitel 6 eingeflossen sind.

## 4.2 Die frühen Studien

### 4.2.1 Olav Hohmeyer 1989

Die erste betrachtete Studie, die sich mit der Quantifizierung der Folgen eines Reaktorunfalls in der Bundesrepublik Deutschland beschäftigte, stammt von Olav Hohmeyer aus dem Jahr 1989.<sup>139</sup> Sie nimmt einen hypothetischen nuklearen Katastrophenfall in Biblis zur Grundlage, um die Höhe des volkswirtschaftlichen Schadens in Form von Produktionsausfällen infolge von Krebserkrankungen zu ermitteln. Weitere Schadenarten werden nicht berücksichtigt.

Die Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass die Bevölkerung durch den Unfall einer Strahlendosis von 2,4 Millionen Personen-Sievert ausgesetzt wurde. Diese Annahme sowie der vermutete Freisetzunganteil von vier Prozent des radioaktiven Inventars beruht auf sowjetischen Veröffentlichungen, die zum Zeitpunkt der Studiererstellung zur Verfügung standen. Der Risikoeffizient für die Beschreibung des zusätzlichen Risikos, an Strahlenkrebs zu erkranken, schwankte nach damaligen Schätzungen zwischen zwei und 74 Prozent pro Sievert.<sup>140</sup> Hohmeyer legte den damaligen Wert der Internationalen Strahlenschutzkommission von 10 Prozent pro Sievert für seine weiterführenden Berechnungen zu Grunde.

Das Konzept der Kollektivdosis beruht zum großen Teil auf den Erfahrungen aus der Tschernobyl-Katastrophe. Zur Berücksichtigung der signifikanten Unterschiede in der Bevölkerungsdichte zwischen einer relativ dünn besiedelten Region wie um Tschernobyl (ca. 100.000 Personen) und einem

---

<sup>138</sup> Siehe hierzu [Hohmeyer 1989].

<sup>139</sup> Siehe [Hohmeyer 1989].

<sup>140</sup> Vgl. [Ewers/Rennings 1992 b], S. 386.

---

Ballungsgebiet wie rund um Biblis, in dessen direkter Umgebung mehr als drei Millionen Menschen wohnen, führt Hohmeyer einen Faktor von zehn ein. Damit soll - wie oben bereits angesprochen - dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Anzahl von Personen, die in Folge eines Unfalls sehr wahrscheinlich radioaktiver Strahlung ausgesetzt sind, wesentlich höher ist.

Durch Multiplikation der freigesetzten Radioaktivität mit dem Risikoeffizienten und dem Faktor zur Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte ergeben sich rein rechnerisch 2,4 Millionen zu erwartender zusätzlicher Krebserkrankungen. Diese werden von Hohmeyer im weiteren Verlauf der Studie mittels der Humankapitalmethode bewertet. Dabei setzt er Produktionsverluste für die Volkswirtschaft für einen Krebstoten in Höhe von 20 Erwerbsjahren zu je 50.000 DM, also insgesamt eine Million DM je Krebstoten, und für eine nicht tödlich verlaufende Krebserkrankung zehn ausgefallene Erwerbsjahre, also insgesamt eine 500.000 DM an. Bei einer angenommenen Sterblichkeitsrate von 50 Prozent ergibt sich hieraus ein Durchschnittswert von 750.000 DM, mit dem ein Krebsfall bewertet wird.

In Summe errechnet Hohmeyer volkswirtschaftliche Gesamtschäden in Folge von Produktionsausfällen von Personen mit Krebserkrankungen in Höhe von 1,8 Billionen DM (rund 1,37 Billionen Euro<sub>2011</sub>)<sup>141</sup>.

Kurz nach der Veröffentlichung dieser Studie konnte Hohmeyer auf die Ergebnisse der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, zurückgreifen. Dort wurden, im Vergleich zu der gemeldeten Freisetzungsrates von Tschernobyl in Höhe von vier Prozent, um bis zu fünfmal höhere mögliche Freisetzungsrates genannt. Unter Annahme einer Freisetzung von 12 Millionen Personen-Sievert ( $2,4 \times 5$ ), ergeben die Berechnungen 12 Millionen Krebserkrankungen und ein Gesamtschaden von 9 Billionen DM. Dazu muss angemerkt werden, dass die genaue Freisetzungsrates der Katastrophe von Tschernobyl bis heute nicht genau bekannt ist.

#### 4.2.2 Richard Ottinger et. al., Pace-University, New York City, 1990

Eine weitere Analyse wurde 1990 an der Pace-University, New York City, unter Leitung von Richard Ottinger durchgeführt.<sup>142</sup> Das Vorgehen zur Berechnung der Folgen eines Reaktorunfalles in den Vereinigten Staaten von Amerika ist ähnlich zu der von Hohmeyer. Zusätzlich zur Bewertung von Gesundheitsschäden werden Vermögensverluste aus landwirtschaftlichen Produktionsausfällen berücksichtigt.

Ausgangspunkt ist auch hier der Wert der Kollektivdosis von 2,4 Millionen Personen-Sievert, der im Bericht der UdSSR von 1986 aufgeführt ist. Als Risikofaktor setzt Ottinger einen Wert von 7,7

---

<sup>141</sup> Für diese und alle folgenden Umrechnungen in Euro-Beträge des Jahres 2011 wurde der Ursprungsbetrag in Euro umgerechnet mit einer Inflationsrate von 2 Prozent pro Jahr multipliziert.

<sup>142</sup> Siehe [Ottinger et al. 1990].

---

Prozent pro Sievert ein, womit er sich an damaligen Schätzungen der US-amerikanischen Akademie der Wissenschaften orientiert. Es werden keine weiteren Faktoren für die Bevölkerungsdichte berücksichtigt, was aber wegen der im Vergleich zu Deutschland (2010: 229 EW/km<sup>2</sup>) siebenfach geringeren Dichte in den USA (2010: 32 EW/km<sup>2</sup>) nachvollziehbar ist.

Die sich aus diesen Zahlen ergebenden Fälle zusätzlicher Krebserkrankungen belaufen sich bei einer angenommenen ungefähren Mortalitätsrate von 75 Prozent auf 140.000 tödliche Fälle und 45.000 nicht-tödliche Fälle. Eine Bewertung erfolgt auf der Grundlage einer Auswertung von acht empirischen Studien nach dem „Verfahren der hedonistischen Preisanalyse“. Diese ergibt für einen tödlichen Krebsfall einen Wert von vier Millionen US-Dollar und für nicht-tödliche Krebsfälle einen Wert von 400.000 US-Dollar. Zahlen aus einem Report des US-amerikanischen Energie-Ministeriums bezüglich zu erwartender geistiger Behinderungen (700 Fälle) und genetischer Schäden bei Neugeborenen (1.900 Fälle) werden ebenfalls berücksichtigt, wobei diese Fälle wie nicht-tödliche Krebserkrankungen bewertet werden. Somit ergeben sich gesamte Gesundheitsschäden in Höhe von 579 Milliarden US-Dollar (rund 629 Milliarden Euro<sub>2011</sub>).

Für die Berechnung der landwirtschaftlichen Produktionsausfälle werden Annahmen von Agrarexperten herangezogen, die von einem 10-prozentigen Verlust der Getreideernte pro Jahr in der UdSSR als Folge des Unfalls in Tschernobyl ausgehen. Ottinger berechnet hier Gesamtwerte von 34 bis 73 Milliarden US-Dollar, wobei die Unterschiede aus der Verwendung unterschiedlicher Diskontraten resultieren.

### **4.2.3 Ewers/Rennings zu den monetären Schäden eines nuklearen Katastrophenfalls in Biblis, 1991**

Die Studie von Ewers/Rennings aus dem Jahr 1991<sup>143</sup> berechnet den Umweltschaden infolge eines nuklearen Katastrophenfalles in Biblis anhand der Gesundheitsschäden sowie der Produktions- und Vermögensverluste, die sich durch den Ausfall von Arbeitskräften, Produktionsstandorten und Wohnraum ergeben.

Auch hier wird der Ansatz von Hohmeyer als Grundlage der Berechnung der Gesundheitsschäden genutzt. Modifikationen werden lediglich hinsichtlich der radioaktiven Freisetzung vorgenommen, die als doppelt so hoch wie der aus dem Tschernobyl-Bericht bekannte Wert angenommen wird (4,8 Millionen Personen-Sievert). Begründet wird dies mit einem Vergleich der Freisetzungsraten der biologisch gefährlichsten radioaktiven Substanzen der Tschernobyl-Katastrophe mit den erwarteten Raten bei einer ähnlichen Katastrophe in Biblis. Der Risikofaktor von 10 Prozent pro Sievert und der Faktor zur Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte von zehn werden ebenfalls aus der Hohmeyer-Studie übernommen. Die gesamten Gesundheitsschäden belaufen sich somit auf 3,6 Billionen DM (rund 2,74 Billionen Euro<sub>2011</sub>).

---

<sup>143</sup> Siehe [Ewers/Rennings 1991].

In dieser Studie werden darüber hinaus Schäden berücksichtigt, die sich aus der Sperrung von Gebieten, der Umsiedlung von Bevölkerung sowie dem Verlust an Agrarproduktion auch über diese Gebiete hinaus ergeben. Hierfür wurden Berechnungen des Öko-Instituts Darmstadt zur Ausbreitung der radioaktiven Belastung verwendet. Zu evakuieren wären nach diesen Berechnungen etwa 4,3 Millionen Menschen, von Umsiedlungsmaßnahmen könnten bis zu zehn Millionen Menschen betroffen sein. Für das Sperrgebiet wurde die Annahme getroffen, dass das Gebiet mindestens fünf Jahre für jegliche Nutzung gesperrt bleibt, was mittels des Ausfalls des gesamten Netto-Inlandsproduktes für diese Zeit in die Berechnungen einfließt. Aus der Statistik des Landes Hessen aus dem Jahr 1987 wird für diesen Ausfall eine Höhe von 420 Milliarden DM berechnet. Für die angenommenen Umsiedlungsgebiete ergeben sich weitere Kosten von 670 Milliarden DM, die sich aus der Hochrechnung der Bevölkerungszahl von 7,2 Millionen und dem Wert des Nettoinlandsproduktes ergeben. Damit belaufen sich die Sachschäden durch Evakuierung und Umsiedlung auf insgesamt 1,09 Billionen DM (rund 828 Milliarden Euro<sub>2011</sub>).

Für den Verlust an Agrarproduktion wird die Schätzung von Ottinger übernommen, der von 34 bis 73 Milliarden US-Dollar ausgegangen war. Mit dem damaligen Umrechnungskurs von US-Dollar zu DM von 1,5 ergeben sich Schäden in der Spannbreite von 51 bis 109 Milliarden DM, die von den Autoren konservativ auf 50 Milliarden DM (rund 38 Milliarden Euro<sub>2011</sub>) angesetzt werden.

Die Autoren kommen nach Addition aller Einzelwerte zu einem Gesamtschaden in Höhe von 4,74 Billionen DM (rund 3,67 Billionen Euro<sub>2011</sub>).

#### **4.2.4 Ewers/Rennings zur Abschätzung der Schäden durch einen nuklearen Katastrophenfall, 1992**

In einer Nachfolgestudie im Rahmen der PROGNO-Schriftenreihe „Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung“ untersuchten die Autoren ausgehend von einer Betrachtung von ähnlichen Studien zu diesem Thema die Übertragbarkeit der Annahmen auf die Situation eines nuklearen Katastrophenfalls in der Bundesrepublik Deutschland.<sup>144</sup>

Im Kern der Berechnungen von Personenschäden stützen sie sich ebenfalls auf die Methode von Hohmeyer. Die Freisetzung wird aus der vorangegangenen Biblis-Studie mit dem doppelten des angenommenen Tschernobyl-Wertes (also den bereits angegebenen insgesamt 4,8 Millionen Personen-Sievert) beziffert. Als weitere Modifikation wird der Risikoeffizient der ICRP verwendet, welcher nach der damals verfügbaren Schätzung<sup>145</sup> 5 Prozent pro Sievert für tödliche Krebserkrankungen, 1 Prozent pro Sievert für nicht-tödliche Krebserkrankungen und 1,3 Prozent pro Sievert für schwere Erbschäden trägt.

---

<sup>144</sup> Siehe hierzu [Ewers/Rennings 1992 b].

<sup>145</sup> Siehe hierzu [Ewers/Rennings 1992 b].

---

Eine weitere Modifikation nehmen die Autoren an dem Faktor zur Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte vor. Den Wert von zehn, den Hohmeyer für die Umgebung des Kraftwerkes Biblis angesetzt hatte, wird von den Autoren als nicht repräsentativ für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland angesehen. Stattdessen verwenden sie einen Faktor von sieben, was mit der Übereinstimmung des Verhältnisses der Bevölkerungsdichte mit den von Tschernobyl am schwersten betroffenen Regionen in Weißrussland mit der Bevölkerungsdichte von Gesamtdeutschland begründet wird. Weiterhin wird festgestellt, dass die Bevölkerungsdichte in einem 50-km-Radius um die deutschen Kernkraftwerke herum dem Durchschnitt der Bevölkerungsdichte der alten Bundesländer Deutschlands entspricht, was diesen Faktor ebenfalls adäquat erscheinen lässt.

Insgesamt ergeben sich für die zusätzlichen Krebserkrankungen Zahlen von 1,68 Millionen Fällen tödlicher Krebserkrankungen, 336.000 Fälle nicht-tödlicher Krebserkrankungen und 436.800 Fälle schwerer Erbschäden.

Bei der Bewertung der tödlichen Fälle greifen die Autoren auf das „Verfahren der hedonistischen Preisanalyse“ zurück, den bereits Ottinger in seiner Studie verwendete. Die dort angesetzten vier Millionen US-Dollar entsprachen zum Zeitpunkt der Studiererstellung umgerechnet sechs Millionen DM, so dass sich als Gesamtschaden der tödlichen Krebserkrankungen ein Wert von 10,08 Billionen DM ergibt. Für Morbiditätsrisiken wird auf Grund fehlender empirischer Studien zur Ermittlung besser geeigneter Bewertungsmethoden die bisher verwendete Humankapitalmethode verwendet, die für nicht tödlich verlaufende Unfallschäden einen Wert von 500.000 DM vorsieht. Dieser Wert beruhte auf der Annahme, dass ein Einkommensausfall von 50.000 DM pro Jahr für die Dauer von zehn Jahren erfolgt. Für die nicht-tödlichen Krebserkrankungen, zu denen auch die Fälle schwerer Erbschäden gerechnet werden, ergeben sich damit Gesamtkosten von 386,4 Milliarden DM.

Die Sachschäden werden in Relation zu den berechneten Werten für die Sperrzone aus der Biblis-Studie gesetzt, da für eine genauere Berechnung Szenarien für alle anderen Standorte berechnet werden müssten. Der Sachschaden in der Region um Biblis wird auf Grund der hohen Bevölkerungsdichte als Spitzenwert angenommen, so dass die Autoren eine Reduktion um 45 Prozent vornehmen, um einen repräsentativen Wert für das gesamte Bundesgebiet zu erhalten. Dadurch kommen sie auf eine Summe der zu erwartenden Sachschäden von 231 Milliarden DM.

In Summe ermittelt diese Studie einen Gesamtschaden in Höhe von 10,679 Billionen DM (rund 8,28 Billionen Euro<sub>2011</sub>).

## 4.3 Aktuelle Quantifizierungsansätze

### 4.3.1 Externalities of Energy (ExternE) - A Research Project of the European Commission, 1995

Bereits seit 1991 fördert die Europäische Kommission ein Forschungsnetzwerk, um die externen Kosten von Energieträgern mittels akzeptierter Methoden und Vorgehensweisen zu quantifizieren. Als externe Kosten werden in diesem Zusammenhang Kosten verstanden, welche durch die (potenzielle) Schädigung der Umwelt und der Gesundheit durch die Nutzung einer Technologie entstehen, die aber keinen Eingang in die regulären Preise für diese Technologien finden. So werden beispielsweise die Kosten für Gesundheitsschäden aufgrund von Schadstoffen, die durch den normalen Autoverkehr in Deutschland verursacht werden, nicht in die Preise für Kraftfahrzeuge oder Treibstoffe eingerechnet. Um vor allem staatlichen Institutionen eine Entscheidungsgrundlage zu liefern, welche Technologien tatsächlich nachhaltig sind, wurden im Rahmen des Projektes Anstrengungen unternommen, diese Schäden abzuschätzen und in Geldeinheiten zu bewerten. Dazu wurde der Wirkungspfadansatz entwickelt, welcher ausgehend von den Emissionen von Schadstoffen zunächst deren Ausbreitung sowie die chemische Umwandlung und ggf. die Umwandlung durch Strahlung in Luft, Boden und Wasser berechnet. Ausgehend von Stoffkonzentrationen werden dann mit Hilfe von Expositions-Wirkungs-Beziehungen Schäden an menschlicher Gesundheit, Ökosystemen, Nutzpflanzen, und Materialien berechnet, die abschließend in Geldeinheiten bewertet werden.<sup>146</sup> Die Abschätzung der Effekte ist äußerst komplex und beinhaltet häufig große bis unlösbare Unsicherheiten, nicht berechenbare Teilaspekte und eine große Bandbreite an unterschiedlichen Annahmen (auf der Grundlage von Meinungen).<sup>147</sup>

Relevant für die hier vorgenommene Betrachtung ist Band 5 der Forschungsergebnisse<sup>148</sup>, welcher die externen Kosten des nuklearen Brennstoffkreislaufes analysiert.<sup>149</sup> Im Rahmen der Ergebnisse werden die methodischen Ansätze sowie Anwendungsfälle am Beispiel des Brennstoffkreislaufes in Frankreich dargestellt. In Kapitel 9 des angegebenen Bands erfolgt die Analyse von Unfallszenarien, die aus einer Kernschmelze in einem Kernkraftwerk resultieren.

Schätzungen werden bezüglich

- der Dosis, der die Bevölkerung ausgesetzt ist,
- des Risikos von Auswirkungen auf die Gesundheit,
- der Kosten von Gegenmaßnahmen und
- dem Verlust an Land und landwirtschaftlichen Produkten

<sup>146</sup> Vgl. [Friedrich 2009].

<sup>147</sup> Vgl. [Roos 2010].

<sup>148</sup> Siehe [Europäische Kommission 1995].

<sup>149</sup> Vgl. [Europäische Kommission 1995].

vorgenommen. Die Autoren betonen an dieser Stelle, dass eine vollständige Untersuchung möglicher Unfallszenarien umfassende probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) voraussetzen würde, die jedoch nicht in den Rahmen des Projektes fallen.<sup>150</sup> Spezifische Daten zu potenziellen Quelltermen<sup>151</sup> und Unfallwahrscheinlichkeiten für französische Kraftwerke lagen dem Projekt ebenfalls nicht vor, so dass auf vier hypothetische Szenarien zurückgegriffen wurde. Diese hatten vor allem das Ziel, die Methoden zur Risikobewertung in der Anwendung zu demonstrieren und erste beispielhafte Ergebnisse zu liefern. Aspekte wie die Berücksichtigung eines Faktors, welcher die Risikoaversion berücksichtigt, wurden auf Grund fehlender wissenschaftlich fundierter Methoden nicht einbezogen.

Die Berechnungsmethode für die Gesundheitsschäden entspricht denen, die auch in den hier vorgestellten früheren Studien genutzt wurden. Darüber hinaus werden - ausgehend von einer Kollektivdosis in Höhe von 291.200 Personen-Sievert, die sich an Schätzungen der UNSCEAR von 1988<sup>152</sup> in Folge der Tschernobyl-Katastrophe orientiert - die Risikofaktoren der ICRP von 1991 von 5 Prozent pro Sievert für tödliche Krebserkrankungen, 12 Prozent pro Sievert für nicht-tödliche Krebserkrankungen und 1 Prozent pro Sievert für genetische Schäden angewendet. Allerdings werden hierbei die globalen Auswirkungen der Kontamination nicht berücksichtigt. Als Bewertungsmethode für tödliche Krebserkrankungen wird ein Value of a statistical Life (VSL)<sup>153</sup> von 2,6 Millionen European Currency Unit (ECU) verwendet, der auf einem Willingness-to-Pay-Ansatz (WTP)<sup>154</sup> beruht, welcher in Band 2 der ExternE-Studie zu den verwendeten Methoden näher erläutert wird. Für nicht tödliche Krebserkrankungen wurde auf eine US-amerikanische Studie des Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA aus dem Jahr 1993<sup>155</sup> zurückgegriffen, welche die durchschnittlichen Krebsbehandlungskosten für einzelne Krebsarten aufführt. Der Durchschnittswert dieser Kosten pro Krebsfall, welcher 298.000 US-Dollar beträgt, wurde in ECU umgerechnet, gerundet und mit 250.000 ECU für die Bewertung nicht-tödlicher Krebserkrankungen verwendet. Damit ergeben sich in Summe Gesundheitskosten von 54,1 Milliarden ECU (rund 74,3 Milliarden Euro<sub>2011</sub>).<sup>156</sup>

Als Sachkosten werden vor allem Kosten für Nahrungsmittelverbote und für die Evakuierung und Umsiedlung berechnet. In einer Tabelle innerhalb der ExternE-Studie sind die grundsätzlichen Bewertungsfaktoren aufgelistet, jedoch fehlen die Werte, auf die sie angewendet wurden. So finden sich keine Angaben zu den betroffenen Mengen der jeweiligen Nahrungsmittel und zu der Anzahl evakuierter und umgesiedelter Personen. Auch über die Dauer der Maßnahmen finden sich keine Angaben. Die Berechnungen wurden mittels eines von der European Community Radiation Protection Programme<sup>157</sup> entwickelten Computermodells namens COSYMA durchgeführt, zu

---

<sup>150</sup> Vgl. [Europäische Kommission 1995], S. 195.

<sup>151</sup> Menge und Art der freigesetzten Radionuklide

<sup>152</sup> Siehe [UNSC 1988].

<sup>153</sup> Der Wert eines statistischen verhinderten Todesfalles.

<sup>154</sup> Beim WTP-Ansatz wird danach gefragt, wie viel die Bürger zu zahlen bereit wären, um eine Verbesserung der Umweltsituation zu erreichen.

<sup>155</sup> Vgl. [ORNL 1993].

<sup>156</sup> Vgl. [Europäische Kommission 1995], S. 205.

<sup>157</sup> Siehe hierzu [Europäische Kommission 1991].

dem genauere Angaben fehlen. Die Gesamtkosten für Nahrungsmittelverbote belaufen sich auf 27,6 Milliarden ECU (rund 37,9 Milliarden Euro<sub>2011</sub>) und die für Evakuierung und Umsiedlung auf 1,5 Milliarden ECU (rund 2,1 Milliarden Euro<sub>2011</sub>).<sup>158</sup>

In Summe ergibt sich ein Gesamtschaden für das Szenario mit der größten Freisetzung in Höhe von 83,252 Milliarden ECU (rund 114,29 Milliarden Euro<sub>2011</sub>).

#### 4.3.2 Eine Antwort der Bundesregierung auf eine kleine Anfrage zum Thema „Nuklearer Katastrophenfall“, 2010

Wettersituation	Flaeche fuer langfristige Umsiedlung ca. [km <sup>2</sup> ]
starker Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	80
starker Wind aus konstanter Richtung, trocken	400
maessiger Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	160
maessiger Wind aus konstanter Richtung, trocken	1.200
schwacher Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	350
schwacher Wind aus konstanter Richtung, trocken	700
starker Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	22.900
starker Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	9.900
maessiger Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	15.600
maessiger Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	6.200
schwacher Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	10.100
schwacher Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	2.700

Abbildung 4.2: Mögliche Größen von Umsiedlungsflächen in Folge eines nuklearen Katastrophenfalls (Quelle: [Bundesregierung 2010 a])

Einen Ansatz zur Quantifizierung der Kosten, die sich aus der Umsiedlung von Bevölkerung ergeben können, liefert eine Antwort der Bundesregierung auf eine kleine Anfrage zum Thema „Nuklearer Katastrophenfall - Katastrophenschutz und Evakuierung“.<sup>159</sup> Dort werden als Antwort auf die eine Frage mit dem Wortlaut

<sup>158</sup> Da für diese Werte keine genauen Angaben zur Berechnung gemacht werden und keine lineare Abhängigkeit von der Gesamtschadenhöhe vermutet wird, fließen diese als fixe Werte in die Berechnung der Versicherungsprämie ein.

<sup>159</sup> Vgl. [Bundesregierung 2010 a].

---

„Für welche maximale Fläche (Angabe in Quadratkilometern) könnte im Falle eines nuklearen Ereignisses unter Zugrundelegung unterschiedlicher meteorologischer Ausbreitungsverhältnisse eine Evakuierung erforderlich sein, wenn zur Beurteilung der Notwendigkeit einer langfristigen Umsiedlung das Kriterium der Dosis von 100 mSv durch äußere Exposition innerhalb eines Jahres herangezogen wird?“<sup>160</sup>

mögliche Größen von Evakuierungs- und Umsiedlungszonen tabellarisch dargestellt. Es wird eine Freisetzung in der Größenordnung von Tschernobyl angenommen und mittels des den Kernkraftwerksbetreibern für solche Fälle zur Verfügung stehenden Entscheidungshilfesystems „Real-time On-line Decision Support system for off-site emergency management“ (RODOS) für unterschiedliche Wettersituationen die theoretisch betroffenen Flächen berechnet, die in Abbildung 4.2 dargestellt sind. Die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Wettersituationen wurde nicht angegeben.

### **4.3.3 Das Öko-Institut Darmstadt mit einer Analyse des Bedrohungspotenzials „gezielter Flugzeugabsturz“ am Beispiel der Anlage Biblis A, 2007**

In dieser Studie des Öko-Institutes Darmstadt<sup>161</sup> werden die Sicherheit und die Auslegung von Kernreaktoren gegenüber einem Flugzeugabsturz untersucht. Die Einzelheiten dieser Untersuchung werden innerhalb der Szenarien in Kapitel 5.2 dieser Arbeit näher erläutert. Für eine Quantifizierung von Unfallfolgen relevant ist die Darstellung möglicher Auswirkungen, die von den Autoren in Kapitel 4 der Studie des Öko-Institutes sehr ausführlich vorgenommen wird. Dazu zählen die realistische Abschätzung eines Quellterms und die Durchführung generischer Ausbreitungsrechnungen zur Untersuchung der wahrscheinlich zu ergreifenden Maßnahmen unter Berücksichtigung der Eingreifrichtwerte des Katastrophenschutzes.

Die Eingreifrichtwerte der „Radiologischen Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden“ sehen eine Evakuierung bei einer äußeren Exposition und einer effektiven Folgedosis durch inhalierte Radionuklide von 100 mSv in sieben Tagen vor. Eine langfristige Umsiedlung ist vorgesehen, wenn eine äußere Exposition von 100 mSv innerhalb eines Jahres zu erwarten ist.<sup>162</sup>

Die in der Studie durchgeführten Berechnungen stützen sich auf die Modelle des Leitfadens der Strahlenschutzkommission und beschreiben die Ausbreitung mittels des Gauß-Fahnenmodells<sup>163</sup> mit konstanter Ausbreitungsrichtung. Dabei werden unterschiedliche Diffusionskategorien, Wind-

---

<sup>160</sup> [Bundesregierung 2010 a], S. 6.

<sup>161</sup> Vgl. hierzu [Küppers/Pistner 2007].

<sup>162</sup> Vgl. [BMU 2008 a], S. 28 f.

<sup>163</sup> Hierbei handelt es sich um ein Modell zur Prognose von Immissionen im Rahmen einer atmosphärischen Ausbreitungsrechnung.

richtungen und Niederschlagsszenarien berücksichtigt.

Das Berechnungsszenario „Langfristig umzusiedelndes Gebiet bei neutraler bis leicht stabiler Luftturbulenz und Wind aus Südwest (große Freisetzung)“ weist eine Umsiedlungsfläche in Form einer Ellipse von ca. 350 km Länge und ca. 60 km Breite aus. Berücksichtigt man den Radius von 25 km im Umkreis des Kraftwerks ebenfalls als Sperrzone, was angesichts der 30 km-Sperrzone um Tschernobyl realistisch erscheint, ergibt sich eine Gesamtfläche von ca. 18.000 km<sup>2</sup>, die von einer langfristigen Umsiedlung betroffen wäre. Dies liegt innerhalb der Bandbreite der Ergebnisse der Beispielrechnungen, die mittels des Entscheidungshilfesystems RODOS durchgeführt wurden.

#### 4.3.4 The Other Report on Chernobyl (TORCH), 2006

The Other Report on Chernobyl, kurz TORCH, ist ein im Jahr 2006 von zwei britischen Wissenschaftlern erstellter Bericht über die gesundheitlichen Folgen der Katastrophe von Tschernobyl.<sup>164</sup> Der Bericht stellt eine unabhängige wissenschaftliche Untersuchung verfügbarer Daten über die Freisetzung von Radioaktivität in der Umwelt und damit verbundene Gesundheitsrisiken in Folge des Unglücks von Tschernobyl dar. Nach Darstellung des Reports unterschätzen die bisherigen Berichte der IAEA, UNSCEAR und des Tschernobyl-Forums die tatsächlichen Gesundheitsschäden in erheblichem Maß. So würden in den offiziellen Berichten die Kontaminationen außerhalb der am schwersten betroffenen Gebiete nicht ausreichend berücksichtigt, obwohl diese einen großen Teil der Kollektivdosis ausmachen. Als weitere Faktoren der Unsicherheit existierender Studien benennen die Autoren die Auswirkungen sehr geringer Dosen und die damit verbundene Diskussion um einen Schwellenwert sowie die Abschätzung interner Dosen, also von eingeatmeten oder mit der Nahrung aufgenommenen Nukliden.

Bei ausreichender Berücksichtigung aller Kontamination geben die Autoren die verursachte Kollektivdosis mit 600.000 Personensievert an. Davon entfallen 36 Prozent auf die Bevölkerung von Weißrussland, Ukraine und Russland, 53 Prozent auf die Bevölkerung im übrigen Europa und 11 Prozent auf die übrige Weltbevölkerung. Bei der Anwendung von Risikofaktoren in einer Spanne von 5 Prozent bis 10 Prozent pro Sievert berechnen die beiden Autoren insgesamt weltweit 30.000 bis 60.000 zusätzliche Todesfälle durch Krebs in Folge der Tschernobyl-Katastrophe in einer Zeitspanne von bis zu 70 Jahren nach der Katastrophe.

#### 4.3.5 Die Methodenkonvention des Umweltbundesamtes zur ökonomischen Bewertung von Umweltschäden, 2007

In einem im Jahr 2007 veröffentlichten Dokument des Umweltbundesamtes<sup>165</sup> werden Methodenkonventionen zur Schätzung externer Umweltkosten dargelegt, die auf der Grundlage umfangrei-

---

<sup>164</sup> Siehe [Fairlie/Sumner 2006].

<sup>165</sup> Siehe [UBA 2007].

---

cher Diskussionen im Umweltbundesamt, mit politischen Entscheidungsträgern und Wissenschaftlern entworfen wurden. Ziel dieser Konventionen ist es, „einheitliche Maßstäbe für die fachliche Bewertung umweltrelevanter Kosten zu entwickeln und die Transparenz der Schätzungen zu verbessern“<sup>166</sup>. Sehr detailliert wird der Stand der Forschung auf dem Gebiet der ökonomischen Bewertung externer Kosten dargelegt und ein standardisiertes Vorgehen zur Erhebung dieser Kosten beschrieben. Die Empfehlungen zur Bewertung von Gesundheitsrisiken werden daher für den Rahmen dieser Arbeit als besonders relevant angesehen.

Gesundheitsrisiken bestehen demnach aus drei Komponenten:

1. Die erste Komponente, Ressourcenkosten, beinhaltet „medizinische Kosten, die durch das Gesundheitswesen oder Versicherungen gedeckt werden, und weitere persönliche Ausgaben des Individuums oder der Familie“<sup>167</sup>. Bezogen auf den Untersuchungsgegenstand dieser Studie wären dies die Kosten der Behandlung von nicht-tödlichen Krebserkrankungen sowie genetischen Defekten, wobei auch bei tödlichen Krebserkrankungen immer eine Behandlungsdauer unterstellt wird.
2. Opportunitätskosten, die die zweite Komponente darstellen, enthalten die Produktivitäts- und Einkommensverluste durch Arbeitsunfähigkeit oder reduzierte Leistung. Die Humankapitalmethode, die Hohmeyer noch in Ermangelung von Alternativen in der Studie aus dem Jahr 1989 nutzt, stellt vor allem auf diese Komponente ab, wobei sichtbar wird, dass sie nur einen möglicherweise geringen Ausschnitt der tatsächlichen Kosten aufzeigt, da die Ressourcenkosten meist den größten Kostenanteil ausmachen.
3. Als dritte Komponente wird der individuelle Nutzenverlust genannt, der sich beispielsweise in der Beschränkung oder dem verminderten Genuss von Freizeitaktivitäten oder Schmerz und Leiden ausdrückt.

Die Bewertung tödlicher Gesundheitsrisiken erfolgt häufig in Form des Wertes eines statistisch verhinderten Todesfalls, welcher in der Literatur oft als Value of a Statistical Life (VSL) bezeichnet wird. Im Rahmen der Untersuchungen des Umweltbundesamtes wurden verschiedene Studien zur Ermittlung dieses Wertes betrachtet. Es wird jedoch keine direkte Empfehlung für die Verwendung eines spezifischen VSL für tödliche Risiken ausgesprochen, da sich die Methodenkonvention „in der jetzigen Fassung auf die umweltrelevanten nicht-tödlichen Gesundheitsrisiken“<sup>168</sup> konzentriert. Allerdings wird ein Hinweis auf sinnvolle Bandbreiten für Sensitivitätsrechnungen gegeben, die sich in der Spanne von 1 Mio. Euro bis 3 Mio. Euro pro Todesfall bewegen.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass sich aufgrund des umfassenden Ansatzes und der Aktualität die Untersuchungen des Umweltbundesamtes für eine aktuelle hypothetische Studie zu

---

<sup>166</sup> [UBA 2007], S. 14.

<sup>167</sup> [UBA 2007], S. 70.

<sup>168</sup> [UBA 2007], S. 75.

den Abschätzungen der Unfallfolgen eines nuklearen Katastrophenfalls in Deutschland besonders gut eignen.

#### 4.3.6 Abgeleitete eigene Ansätze zur Quantifizierung

Ansätze von einigen der untersuchten Studien werden im Rahmen dieser Arbeit genutzt, um weitere Quantifizierungen von Schadenkosten vorzunehmen. Diese sollen hier kurz dargestellt werden, da sie als zusätzliche Bewertungen in die Berechnungen der Versicherungsprämie (siehe Kapitel 6) eingehen.

Wettersituation	Fläche fuer langfristige Umsiedlung ca. [km <sup>2</sup> ]	Betroffene Einwohner	Ausfall des BIP fuer 5 Jahre [Mrd. EUR]
starker Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	80	18.320	2,68
starker Wind aus konstanter Richtung, trocken	400	91.600	13,42
maessiger Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	160	36.640	5,37
maessiger Wind aus konstanter Richtung, trocken	1.200	274.800	40,26
schwacher Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	350	80.150	11,74
schwacher Wind aus konstanter Richtung, trocken	700	160.300	23,49
starker Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	22.900	5.244.100	768,31
starker Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	9.900	2.267.100	332,15
maessiger Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	15.600	3.572.400	523,39
maessiger Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	6.200	1.419.800	208,02
schwacher Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	10.100	2.312.900	338,86
schwacher Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	2.700	618.300	90,59

Abbildung 4.3: Mögliche Schadenhöhen durch Umsiedlungsmaßnahmen in Folge eines nuklearen Katastrophenfalls (Quelle: [Bundesregierung 2010 a], eigene Berechnungen)

Ein erster weiterführender Ansatz ergibt sich aus der Antwort der Bundesregierung auf eine kleine Anfrage, die in Kapitel 4.3.2 betrachtet wird. Die durch das Entscheidungshilfesystem RODOS berechneten möglichen Umsiedlungszonen werden als Grundlage für die Berechnung von Schadenkosten genutzt, die sich aus dem Wegfall des gesamten volkswirtschaftlichen Einkommens dieser Zonen ergeben. Für die einzelnen Flächen wird mittels der Bevölkerungsdichte und Angaben zum

durchschnittlichen Bruttoinlandsprodukt der Bundesrepublik Deutschland das Bruttoinlandsprodukt für die betroffenen Zonen berechnet. Dieses wird anschließend mit dem Faktor fünf multipliziert, um der recht konservativen Annahme Rechnung zu tragen, dass diese Zonen fünf Jahre vollständig für die Produktion ausfallen. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die umgesiedelte Bevölkerung im Rahmen dieser Frist an anderer Stelle in Deutschland zum Bruttoinlandsprodukt beitragen wird, so dass diese Annahme gerechtfertigt erscheint.

Bei einer durchschnittlichen Einwohnerdichte der Bundesrepublik Deutschland von 229 EW/km<sup>2</sup><sup>169</sup> und einem durchschnittlichen Bruttoinlandsprodukt von 40.873,27 US-Dollar<sub>2011</sub> pro Kopf<sup>170</sup> ergeben sich somit bei einem angenommenen 5-jährigen vollständigen Ausfall der Produktion in diesem Gebiet auf Grund der Sperrung die in Abbildung 4.3 dargestellten Kosten.

Einen weiteren Ansatz ergibt sich aus der Arbeit des Öko-Institutes Darmstadt mit dem Titel „Analyse des Bedrohungspotenzials ‚gezielter Flugzeugabsturz‘ am Beispiel der Anlage Biblis-A“. Ausgehend von den durch das Öko-Institut angestellten Berechnungen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit versucht, die Wahrscheinlichkeit zu berücksichtigen, mit der Ballungsgebiete von einer langfristigen Umsiedlung betroffen wären, da dies die volkswirtschaftlichen Kosten eines nuklearen Katastrophenfalls signifikant beeinflussen würde. Allerdings werden lediglich Sachkosten in Form eines Ausfalls des Bruttoinlandsproduktes für eine angenommene Sperrung dieser Gebiete für fünf Jahre angenommen, da die Berechnung der Personenschäden nach dem zur Verfügung stehenden Prinzip der Kollektivdosis unabhängig von betroffenen Gebieten erfolgt.

Für die Berechnungen werden Windrosen des Deutschen Wetterdienstes von Standorten nahe den in Deutschland betriebenen KKW genutzt. Für acht Windrichtungen (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW), wobei auch immer das jeweilige Höchstschadenszenario Beachtung findet, wird die nahezu ellipsenförmige Ausbreitungsfahne des oben genannten Szenarios um die jeweiligen Standorte gedreht. Zur Abschätzung der betroffenen Bevölkerung wurde die durchschnittliche Einwohnerdichte der Bundesrepublik Deutschland von 229 EW/km<sup>2</sup> zu Grunde gelegt. Zu diesem Wert werden die Einwohnerzahlen von Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern addiert, so dass besonders bevölkerungsreiche Gebiete wie bspw. das Ruhrgebiet ausreichend berücksichtigt werden. Gebiete mit geringerer Bevölkerungsdichte und Ausbreitungen beispielsweise über die Nordsee werden durch entsprechende Abschläge berücksichtigt. Die sich aus der Multiplikation der betroffenen Zahl der umzusiedelnden Einwohner und des Pro-Kopf-Wertes des Bruttoinlandsproduktes von Deutschland ergebenden Schadenhöhen werden für den Zeitraum von fünf Jahren berechnet und anschließend mit der jeweiligen Windhäufigkeit für diese Windrichtung multipliziert (siehe Anhang B). Somit ergeben sich für die insgesamt untersuchten zwölf KKW-Standorte die in Abbildung 4.4 dargestellten zu erwartende Höhen der Sachschadenkosten.

---

<sup>169</sup> [SÄBL 2011].

<sup>170</sup> [SBD 2010].

Standort KKW	Standort Messstation	BIP-Ausfall für 5 Jahre in Mrd. € <sub>2011</sub>
Biblis	Lindenfels	707,19
Brunsbuettel	Brunsbuettel	575,32
Brokdorf	Brunsbuettel	393,80
Kruemmel	Ahrensburg- Wulfsdorf	573,50
Emsland	Lingen	688,95
Grohnde	Hameln	993,94
Grafenrheinfeld	Bad Kissingen	732,98
Philippsburg	Karlsruhe	713,59
Neckarwestheim	Stuttgart- Schnarrenberg	774,40
Isar	Muenchen Flughafen FSJ	690,28
Unterweser	Bremerhaven	747,86
Gundremmingen	Ulm	626,89

Abbildung 4.4: Sachschäden unter Berücksichtigung von Windrichtungsszenarien für die zwölf KKW-Standorte in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung)

Durch die Berücksichtigung der Windhäufigkeiten ergeben sich insgesamt Werte, die keine große Streuung aufweisen. Dies liegt zum einen daran, dass den meisten Szenarien die durchschnittliche Bevölkerungsdichte zu Grunde gelegt wurde. Zum anderen werden Maximalschadenereignisse wie beispielsweise die Umsiedlung fast des gesamten Ruhrgebietes durch die Seltenheit der jeweiligen Windrichtungen nivelliert.

#### 4.4 Eine Übersicht der verwendeten Quantifizierungsansätze

Die in Abbildung 4.5 auf Seite 58 dargestellten Ansätze werden für die Berechnungen von Schadenverteilungen, die die Grundlage für die Berechnung einer Versicherungsprämie bilden, genutzt.

Diese Werte sind nun derart zu berücksichtigen, dass sie pro Schadenart jeweils miteinander multipliziert werden, so dass eine Berechnung aller möglichen Kombinationen erfolgt. So ergibt sich beispielsweise im Fall der tödlichen Krebserkrankungen durch Multiplikation des niedrigsten Wertes für freigesetzte Radioaktivität mit dem Risikoeffizienten, dem Faktor für die Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte und dem niedrigsten Bewertungsansatz ein Wert von rund 80,5 Mrd. Euro.

Ansatz	Wert	Quelle
	291.200 Personen-Sv	ExternE, Vol. 5, 1995 [EC 1995]
Kollektivdosis	600.000 Personen-Sv	The Other Report on Chernobyl, 2006 [FS 2006]
	2.400.000 Personen-Sv	Tschernobyl-Bericht der UdSSR, 1986 [Ewers/Rennings, 1992a]
	4.800.000 Personen-Sv	Ewers/Rennings, 1992 [Ewers/Rennings, 1992a]
	5% pro Sievert	ICRP 60, 1991 [ICRP 1991]
Risikofaktor toedliche Kreberkrankungen	12% pro Sievert	ICRP 60, 1991 [ICRP 1991]
Risikofaktor nicht-toedliche Kreberkrankungen	1% pro Sievert	ICRP 60, 1991 [ICRP 1991]
Faktor zur Beruecksichtigung der Bevoelkerungsdichte in Deutschland	7	Ewers/Rennings, 1992 [Ewers/Rennings, 1992a]
Bewertungsansatze fuer toedliche Kreberkrankungen je Fall	790.446,85 € <sub>2011</sub> /Fall	1.000.000 DM <sub>1989</sub> aus Hohmeyer, 1989 [Hohmeyer 1989]
	1.000.000 € <sub>2011</sub> /Fall	Untere Grenze der Spannbreite nach Umweltbundesamt, 2007 [UBA 2007]
	2.600.000,00 € <sub>1995</sub> /Fall	Value of Statistical Life aus ExternE, Vol. 5, 1995 [EC 1995]
	3.000.000,00 € <sub>2011</sub> /Fall	Obere Grenze der Spannbreite nach Umweltbundesamt, 2007 [UBA 2007]
Bewertungsansatze fuer nicht- toedliche Kreberkrankungen je Fall	4.469.134,35 € <sub>2011</sub> /Fall	6.000.000 DM <sub>1992</sub> aus Ewers/Rennings, 1992 [Ewers/Rennings, 1992a]
	305.125,10 € <sub>2011</sub> /Fall	298.000 USD1993 aus Oak Ridge National Laboratory, 1993 [ORNL 1993]
Bewertungsansatze fuer schwere genetische Schaeden je Fall	406.344,57 € <sub>2011</sub> /Fall	296.000 ECU <sub>1995</sub> aus ExternE Vol. 5, 1995, 3% Diskontrate [EC 1995]
	53.538,64 € <sub>2011</sub> /Fall	39.000 ECU <sub>1995</sub> aus ExternE Vol. 5, 1995, 10% Diskontrate [EC 1995]
Konsumverbote von Nahrungsmitteln	37.935.011.060,19 € <sub>2011</sub>	27.633.600.000 ECU <sub>1995</sub> aus ExternE Vol. 5, 1995 [EC 1995]
Kosten fuer Evakuierung und Umsiedlung	2.080.044.900,35 € <sub>2011</sub>	1.515.200.000 ECU <sub>1995</sub> aus ExternE Vol. 5, 1995 [EC 1995]

Abbildung 4.5: Für die Berechnung der Versicherungsprämie verwendete Bewertungsgrundlagen (Quelle: Eigene Darstellung)

Beispiel:

$$\begin{aligned}
 & 291.200 \text{ Personen-Sievert} \\
 \times & \quad 5 \text{ Prozent pro Sievert für tödliche Krebserkrankungen} \\
 \times & \quad 7 \text{ Faktor für die Bevölkerungsdichte} \\
 \times & \quad 790.000 \text{ Euro} \\
 \approx & \quad 80,5 \text{ Mrd. Euro}
 \end{aligned}$$

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Kombinationen aller für die Berechnung der Schadenhöhe der Versicherungsprämie verwendeten Bewertungsgrundlagen für Personenschäden in Euro. Dabei sind die Personenschäden unterteilt in genetische Schäden, tödliche Krebserkrankungen und nicht-tödliche Krebserkrankungen.

Freisetzung in Personen-Sievert	Risiko-koeffizient in % pro Sv	Faktor Bevoelkerungs-dichte	Anzahl genetischer Schaeden	Bewertung	Summe in Euro
291.200	1%	7	20.384	406.344	8.282.916.096
291.200	1%	7	20.384	53.538	1.091.318.592
600.000	1%	7	42.000	406.344	17.066.448.000
600.000	1%	7	42.000	53.538	2.248.596.000
2.400.000	1%	7	168.000	406.344	68.265.792.000
2.400.000	1%	7	168.000	53.538	8.994.384.000
4.800.000	1%	7	336.000	406.344	136.531.584.000
4.800.000	1%	7	336.000	53.538	17.988.768.000

Abbildung 4.6: Höhen genetischer Schäden (Eigene Berechnungen)

Freisetzung in Personen-Sievert	Risiko-koeffizient in % pro Sv	Faktor Bevoelkerungs-dichte	Anzahl nicht-toedlicher Krebsfaelle	Bewertung	Summe in Euro
291.200	12%	7	244.608	305.125,00	74.636.016.000
600.000	12%	7	504.000	305.125,00	153.783.000.000
2.400.000	12%	7	2.016.000	305.125,00	615.132.000.000
4.800.000	12%	7	4.032.000	305.125,00	1.230.264.000.000

Abbildung 4.7: Schadenhöhen nicht-tödlicher Krebserkrankungen (Eigene Berechnungen)

Freisetzung in Personen-Sievert	Risiko-koeffizient in % pro Sv	Faktor Bevoelkerungs-dichte	Anzahl toedlicher Krebsfaelle	Bewertung	Summe in Euro
291.200	5%	7	101.920	790.446,85	80.562.342.952
291.200	5%	7	101.920	1.000.000,00	101.920.000.000
291.200	5%	7	101.920	2.600.000,00	264.992.000.000
291.200	5%	7	101.920	3.000.000,00	305.760.000.000
291.200	5%	7	101.920	4.469.134,35	455.494.172.952
600.000	5%	7	210.000	790.446,85	165.993.838.500
600.000	5%	7	210.000	1.000.000,00	210.000.000.000
600.000	5%	7	210.000	2.600.000,00	546.000.000.000
600.000	5%	7	210.000	3.000.000,00	630.000.000.000
600.000	5%	7	210.000	4.469.134,35	938.518.213.500
2.400.000	5%	7	840.000	790.446,85	663.975.354.000
2.400.000	5%	7	840.000	1.000.000,00	840.000.000.000
2.400.000	5%	7	840.000	2.600.000,00	2.184.000.000.000
2.400.000	5%	7	840.000	3.000.000,00	2.520.000.000.000
2.400.000	5%	7	840.000	4.469.134,35	3.754.072.854.000
4.800.000	5%	7	1.680.000	790.446,85	1.327.950.708.000
4.800.000	5%	7	1.680.000	1.000.000,00	1.680.000.000.000
4.800.000	5%	7	1.680.000	2.600.000,00	4.368.000.000.000
4.800.000	5%	7	1.680.000	3.000.000,00	5.040.000.000.000
4.800.000	5%	7	1.680.000	4.469.134,35	7.508.145.708.000

Abbildung 4.8: Schadenhöhen tödlicher Krebserkrankungen (Eigene Berechnungen)

Diese Ergebnisse werden gemeinsam mit den berechneten volkswirtschaftlichen Kosten aus Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 sowie den Kosten für Konsumverbote von Nahrungsmitteln in Höhe von rund 38 Mrd. Euro und Evakuierung und Umsiedlung in Höhe von rund 2,1 Mrd. Euro verwendet, um in Kapitel 6.2 eine Schätzung des erwarteten Maximalschadens vorzunehmen. Eine vollständige Aufführung aller Ergebnisse je KKW befindet sich im Anhang B.

## 4.5 Weitere Schadenarten

Die hier untersuchten Studien betrachten immer nur eine begrenzte Auswahl möglicher Schäden, die auf Grund eines nuklearen Katastrophenfalles auftreten können. So werden fast ausschließlich Personen- und Sachschäden bewertet. In der ExternE-Studie werden darüber hinaus noch Kosten in Folge von Konsumverboten von Nahrungsmitteln sowie von Evakuierungs- und Umsiedlungsmaßnahmen berechnet.

Darüber könnte eine Vielzahl weiterer Schäden in eine Untersuchung einbezogen werden. Dabei sind beispielsweise Kosten für Dekontamination und Endlagerung verseuchten Materials oder der Verlust von bedrohten Arten und von Biotopen zu nennen. Der Grund für das Fehlen dieser Schadenarten in den meisten Berechnungen ist der, dass oft keine ausreichenden Quantifizierungsansätze für diese Schäden existieren. Das Umweltbundesamt merkt beispielsweise zur Bewertung irreversibler Schäden an: „Kennt man die Folgewirkungen eines Schadens nicht oder sind die Kenntnisse sehr unsicher (z.B. Verlust einer Art), dann sollte man die Bandbreiten der möglichen Schäden aufzeigen und monetär bewerten (Szenarienanalysen). Sofern keine Analysen zu möglichen Schäden

vorliegen, kann man die möglichen Folgewirkungen nur qualitativ beschreiben.“<sup>171</sup> Die Zahlen der hier untersuchten Studien unterschätzen also den tatsächlich möglichen Gesamtschaden eher, wobei anzumerken ist, dass die Gesundheitskosten durch Strahlenexposition den vermutlich größten Anteil der Gesamtkosten darstellen.

---

<sup>171</sup> [UBA 2007], S. 78.

## Kapitel 5

# Eintrittswahrscheinlichkeit: Bisherige Quantifizierungsmethoden und Einfluss von Szenarien auf einen nuklearen Katastrophenfall

### 5.1 Bisherige Quantifizierungsmethoden der Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls

Eine der für Deutschland aussagekräftigsten Aussagen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten von die sicherheitstechnischen Auslegungsgrenzen überschreitenden Unfällen stammt aus der Studie „Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B“ (DRS Phase B) der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS), welche im Juni 1989 veröffentlicht wurde.<sup>172</sup> In dieser Arbeit wurden umfangreiche Untersuchungen zum Störfallverhalten von Kernkraftwerken am Beispiel der Referenzanlage Biblis B vorgenommen. Dabei wurden Störfälle in ihrem zeitlichen Verlauf, die mit ihnen verbundenen Belastungen und das Eingreifen der zur Störfallbeherrschung vorgesehenen Sicherheitssysteme eingehend analysiert. Es wurden ebenfalls anlageninterne Notfallmaßnahmen (Accident-Management-Maßnahmen) berücksichtigt, welche auch dann noch für Sicherheitsreserven sorgen sollen, wenn Sicherheitssysteme nicht wie vorgesehen eingreifen.

Nach der DRS Phase B wird für einen Reaktor des Typs Biblis B für ein Szenario der Katego-

---

<sup>172</sup> Siehe [GRS 1989].

rie AF-SBV (großflächiges Sicherheitsbehälterversagen), bei dem nahezu das gesamte radioaktive Inventar eines Kernreaktors in die Umwelt freigesetzt wird, eine Eintrittswahrscheinlichkeit ohne Accident-Management-Maßnahmen von  $3 \times 10^{-5}$  pro Jahr angegeben. Dies entspricht einem Ereignis dieser Größenordnung alle etwa 33.300 Jahre pro Reaktorbetriebsjahr. Unter Berücksichtigung von Accident-Management-Maßnahmen, denen allerdings eine vollständige Wirksamkeit unterstellt wird, beträgt die eine Wahrscheinlichkeit für einen Unfall mit Kernschmelze für den Druckwasserreaktor Biblis B 3,  $6 \times 10^{-6}$  pro Jahr. Das entspricht in etwa einem Unfall alle 280.000 Betriebsjahre.

Im Jahr 2001 wurde durch die GRS eine Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland vorgenommen.<sup>173</sup> Referenzanlage war das KKW Neckarwestheim 2 (GKN 2). Weitere Kraftwerke dieser Ausführungen sind die so genannten Konvoi-Anlagen Isar Block 2 und Emsland. Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Schadensereignisses der Kategorie AF-SBV wird bei diesen Reaktoren mit  $10^{-8}$  pro Jahr angenommen, was einem Ereignis aller 100 Millionen Jahre entspricht.

In ExternE<sup>174</sup> wird für die Berechnung von monetären Unfallfolgen eine Kernschmelzhäufigkeit von  $5 \times 10^{-5}$  pro Reaktorbetriebsjahr zugrunde gelegt. Weiterhin wird angenommen, dass es nur in 19 Prozent dieser Fälle zu einer Freisetzung von Radioaktivität kommt und in den restlichen 81 Prozent das Containment hält. Somit ergibt sich eine Eintrittswahrscheinlichkeit von einem Ereignis aller 105.000 Betriebsjahre.

Die Methodenkonvention des Umweltbundesamtes nennt unter Verweis auf eine Quelle aus dem Jahr 1997 eine geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit eines Kernschmelzunfalls in Deutschland von 1:10.000.000 Betriebsjahren.<sup>175</sup>

Bei all diesen Werten handelt es sich um Eintrittswahrscheinlichkeiten, die vorsätzlich herbeigeführte Unfälle in Folge von Krieg, Bürgerkrieg, Luftangriffen, Terrorismus oder Sabotage nicht berücksichtigen. Solche Ereignisse können sich allerdings im Lauf der Zeit zu dominierenden Risikofaktoren entwickeln. Als Beispiel sei hier eine Beteiligung der Bundeswehr an Auslandseinsätzen genannt, die möglicherweise zu einer Erhöhung des Terrorrisikos führen kann, da Terroristen hier eine politische Hebelwirkung vermuten könnten. Eine Darstellung von Szenarien, welche die Eintrittswahrscheinlichkeit erhöhen könnten, erfolgt im folgenden Kapitel.

---

<sup>173</sup> Siehe [GRS 2001].

<sup>174</sup> [Europäische Kommission 1995].

<sup>175</sup> [UBA 2007], S. 29.

---

## 5.2 Einbeziehen weiterer Szenarien mit direktem Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls

In diesem Kapitel werden Szenarien vorgestellt, die Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls haben bzw. diese deutlich erhöhen können. Diese Szenarien ergänzen die im vorangegangenen Kapitel 5.1 beschriebenen verfügbaren Zahlen zur Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls. Die Szenarien sollen insbesondere dazu dienen, das Bedrohungspotenzial hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Ursachen für Änderungen der Eintrittswahrscheinlichkeit besser zu verstehen.

Die hier getroffenen theoretischen Bewertungsprämissen sind lediglich Stressannahmen, die auf tatsächlich eingetretenen Stör- und Unfällen beruhen. Sie wurden nicht im Rahmen eines Modells entwickelt oder validiert.

Mit Ausnahme des Terrorrisikos, für welches ein direkter Wert geschätzt wird, haben alle Szenarien Einfluss auf die in Kapitel 5.1 erhobenen Eintrittswahrscheinlichkeiten, die durch Quellen belegt sind. Dieser Einfluss wird durch die Verwendung von Modifikationsfaktoren dargestellt. So verdoppelt ein Faktor von zwei die ursprünglich angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Alle Wahrscheinlichkeiten werden im Anschluss an die Betrachtung der Szenarien in Kapitel 5.3 tabellarisch zusammengefasst.

### 5.2.1 Szenario Alterung der KKW

Die in Deutschland betriebenen 17 Druck- und Siedewasserreaktoren<sup>176</sup> wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten errichtet und werden daher verschiedenen Generationen bzw. Baulinien zugeordnet.<sup>177</sup> Sie unterscheiden sich dadurch, dass jeweils beim Bau der einzelnen Reaktoren verschiedene Bauweisen, Techniken bzw. sicherheitstechnische Grundkonzepte zugrunde lagen.<sup>178</sup>

Keines der KKW entspricht, gemessen am derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik, vollständig den heutigen gesetzlichen Vorgaben und würde eine (erstmalige) Betriebsgenehmigung erhalten. Das bedeutet, dass nicht einmal die neueste in Deutschland existierende Generation von KKW dem aktuellen technischen Stand entspricht, da auch diese mittlerweile mehr als 20 Jahre alt sind.<sup>179</sup>

---

<sup>176</sup> Siehe hierzu Abbildung 2.2.

<sup>177</sup> Siehe hierzu Abbildung 5.1.

<sup>178</sup> Vgl. [Becker 2009], S. 2.

<sup>179</sup> Vgl. [Büro für Atomsicherheit 2010], S. 1 sowie [Becker 2009], S. 2. Aus diesem Grund müssen die Kernkraftwerke bis 2012 entsprechend ihres jetziger Sicherheitsstandards nachrüsten. Aber auch die Möglichkeiten einer Nachrüstung werden aufgrund zugrundeliegender konzeptioneller Sicherheitsnachteile als begrenzt angesehen. Siehe hierzu: [Büro für Atomsicherheit 2010], S. 22 ff.

Die Ergebnisse verschiedener Analysen deuten darauf hin, dass in den älteren KKW der sogenannten Generation 2 bzw. in Baulinie 69 deutlich mehr meldepflichtige Ereignisse seit deren Inbetriebnahme auftraten als in den „neueren“ Reaktoren. Darüber hinaus nimmt mit zunehmender Laufzeit der KKW unabhängig von der Generation/Baulinie auch die Häufigkeit von Ereignissen zu, die zur Störung des Betriebs des KKW führen.<sup>180</sup>

Es lassen sich zwei Effekte der Alterung von KKW feststellen, aus denen Störfälle bzw. Unfälle resultieren: Stör- bzw. Unfälle erfolgen einerseits aus dem Veralten der angewandten Technologien im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik und andererseits durch die Betriebszeit der KKW und damit einhergehender *Abnutzung*. Eine Laufzeitverlängerung der KKW in Deutschland inklusive der Übertragung von Reststrommengen auf alte Reaktoren würde also das Risiko von Stör- und Unfällen überproportional erhöhen.<sup>181</sup>

Diese Zusammenhänge werden durch die in der Abbildung 5.1 dargestellten Ergebnisse der Untersuchung der KKW in Deutschland im Jahr 2010 in Bezug auf deren Stör- und Unfälle verdeutlicht.

Generation/Baulinie	Kernkraftwerk	Jahr der Inbetriebnahme (Erstkritikalität)	Betriebsjahre (bis einschl. 2009)	Anzahl der Stoer- und Unfaelle
<b>Druckwasserreaktoren (DWR)</b>				
DWR-Generation 2	Biblis A	1974	36	12
	Biblis B	1976	34	12
	Neckarwestheim 1	1976	34	12
	Unterweser	1978	32	10
DWR-Generation 3	Grafenrheinfeld	1981	29	7
	Grohnde	1984	26	8
	Philippsburg 2	1984	26	7
	Brokdorf	1986	24	9
DWR-Generation 4	Isar 2	1988	22	3
	Emsland	1988	22	5
	Neckarwestheim 2	1988	22	4
<b>Siedewasserreaktoren (SWR)</b>				
SWR-Baulinie '69	Philippsburg 1	1979	31	11
	Isar 1	1977	33	8
	Brunsbüttel	1976	34	14
	Kruemmel	1983	27	12
SWR-Baulinie '72	Gundremmingen B	1984	26	4
	Gundremmingen C	1984	26	4

Abbildung 5.1: In Betrieb stehende KKW in Deutschland und ungefähre Anzahl meldepflichtiger Ereignisse (Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Paulitz 2010], S. 7.)

Auch die Abbildung 5.2 veranschaulicht die teilweise überproportionale Zunahme der Ereignisse

<sup>180</sup> Vgl. [Büro für Atomsicherheit 2010], S. 11 und [Kotting-Uhl 2010].

<sup>181</sup> Vgl. [Büro für Atomsicherheit 2010], S. 6 und [Paulitz 2010], S. 1.

durch Bauteildefekte mit zunehmendem Alter und Laufzeit der KKW in Deutschland.<sup>182</sup>

Baulinien-Ø	SWR '69	SWR '72	DWR-2	DWR-3	DWR-4
1994-1998	17,5	7	15,75	7,75	5
1999-2003	18,75	9,5	19	13	6
2004-2008	22,25	12	23,25	18,75	9,33

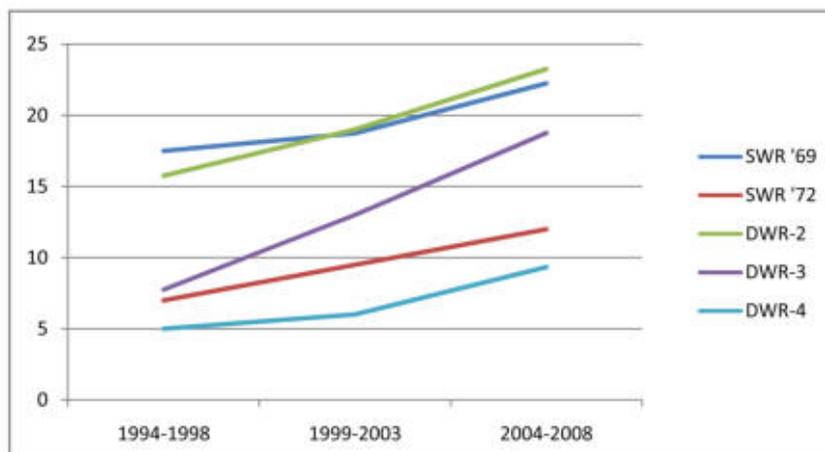


Abbildung 5.2: Entwicklung der Anzahl an Bauteileffekten in den KKW Deutschlands (Quelle: [Kotting-Uhl 2010])

Die Alterung tritt in verschiedenen Bereichen auf:

- Materialalterung,
- Nachweisalterung,
- Alterung des Personals,
- Konzeptionelle Alterung (alte zugrundeliegende Sicherheitskonzepte).<sup>183</sup>

Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die konzeptionelle Alterung. Beispielsweise zeichnet sich ein Siedewasserreaktor der Baulinie 69 gegenüber der Baulinie 72 besonders durch die Anfälligkeit für ein rasches Versagen des Sicherheitsbehälters beim Durchschmelzen, durch eine verhältnismäßig geringe Wandstärke des Reaktorgebäudes und durch eine geringere Kapazität der Kernnotkühlung aus. Auch bei dem Vergleich zweier Generationen an Druckwasserreaktoren (Generation 2 gegenüber neueren Generationen) werden konzeptionelle Nachteile und damit risikohörende Faktoren sichtbar. So weist die 2. DWR-Generation bspw. eine geringere Wandstärke

<sup>182</sup> Dabei ergibt sich der Wert je Generation bzw. Baulinie aus dem Quotient der absoluten Anzahl der Ereignisse und der Reaktoren-Anzahl der jeweiligen Baulinie (bspw. SWR '69 = Brunsbüttel, Isar 1, Philippsburg 1, Krümmel). Vgl. [Kotting-Uhl 2010].

<sup>183</sup> Vgl. [Büro für Atomsicherheit 2010], S. 8 ff.

auf, hinzu kommen eine geringere Druck- und Temperaturfestigkeit des Sicherheitsbehälters sowie fehlende durchgängige Automatik beim Abfahren der Sekundärseite zur Kernnotkühlung.<sup>184</sup>

Aus diesen Defiziten hinsichtlich der den älteren KKW zugrunde liegenden Sicherheitstechniken ergibt sich eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Stör- und Unfällen. Dem gegenüber steht eine geringere Wahrscheinlichkeit, solche Ereignisse beherrschen zu können, da weniger bauliche und technische Sicherheitsreserven bestehen. Die Auswirkungen eines gleichen Ereignisses können daher bei einem älteren KKW gravierender sein.<sup>185</sup>

So verfügt das KKW Biblis beispielsweise über keine räumliche Trennung der Stromversorgungs- und Steuerungskabel. Ein Szenario, wie es sich am 22. März 1975 in dem US-amerikanischen Kernkraftwerk Browns Ferry tatsächlich ereignete, wäre daher auch in Biblis möglich: Bei der Suche nach einem Luftleck verwendete der Kontrolleur eine brennende Kerze. Die Kabel waren mit Schaumstoff umgeben, der sich an der Kerzenflamme entzündete. Dies wurde erst erkannt als der Schaum schon brannte und bereits erhebliche Schäden am Stromversorgungs- und Steuerungskabel aufgetreten waren. Dadurch fiel der Strom aus und in beiden Blöcken der Anlage waren fast alle Notkühlssysteme des Reaktors nicht mehr funktionstüchtig. Nur noch in Block 2 war noch ein einziges Notkühlsystem verfügbar. Ohne ausreichende Kühlung kann es zu einer Kernschmelze kommen, da die radioaktiven Zerfälle in den Reaktoren auch nach der Abschaltung noch eine solch große Hitze erzeugen, dass Reaktorbehälter nicht standhalten könnten. Im Falle Browns Ferry wurde eine Kernschmelze verhindert, weil zwei vorhandene, aber eigentlich für das normale Betriebssystem vorgesehene Kondensatpumpen zugeschaltet wurden.

Aufgrund dieses Ereignisses in den USA wurde das Prinzip der räumlichen Trennung generell zum Grundsicherheitsprinzip neuer KKW. In Biblis selbst wurden zwar Brand hemmende Beschichtungen an den Kabeln und auch Teiltrennungen der Kabelstränge vorgenommen, dennoch kann eine vollständige Trennung der Stromversorgung und Steuerung aufgrund des zugrundeliegenden baulichen Konzepts in Form von Nachrüstungen nicht mehr erfolgen, so dass ein erhöhtes Risiko gegenüber den neueren Generationen bzw. Baulinien bestehen bleibt.<sup>186</sup>

In sogenannten Probabilistischen Sicherheitsanalysen (Stufe 1) wird die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt schwerer Unfälle in KKW ermittelt. Dabei spielen das relativ niedrige Sicherheitsniveau älterer KKW sowie Unzulänglichkeiten durchgeführter Nachrüstungen eine Rolle. Für ältere KKW ergab sich für Siedewasserreaktoren der Baulinie 69 eine zwei- bis sechsmal höhere Eintrittswahrscheinlichkeit für schwere Unfälle je KKW im Vergleich zur den neueren Siedewasserreaktoren. Bei Druckwasserreaktoren ist der Unterschied zwischen Reaktoren der 2. Generation und den neueren Reaktoren durch eine zehn- bis 18-mal höhere Wahrscheinlichkeit je KKW geprägt.<sup>187</sup> Diese Werte

---

<sup>184</sup> Vgl. [Becker 2009], S. 3 ff.

<sup>185</sup> Vgl. [Becker 2009], S. 5.

<sup>186</sup> Vgl. [Büro für Atomsicherheit 2010], S. 16 f.

<sup>187</sup> Vgl. [Becker 2009], S. 17.

---

wurden als Modifikationsfaktoren der Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

Diese Veränderungen der Eintrittswahrscheinlichkeit für schwere Unfälle durch die Alterung eines KKW wurden in die Berechnung der Haftpflichtversicherungsprämie in Kapitel 6.2 einbezogen.

### 5.2.2 Szenario eines Terroraktes

Seit den Anschlägen auf das World Trade Center veränderte sich der Blick der Welt auf das Risiko „terroristische Anschläge“. Definieren lassen sich Terrorakte als „jegliche Handlungen von Personen oder Personengruppen zur Erreichung politischer, religiöser, ethnischer oder ideologischer Ziele, die geeignet sind, Angst oder Schrecken in der Bevölkerung oder Teilen davon zu verbreiten und dadurch auf eine Regierung oder staatliche Einrichtungen Einfluss zu nehmen.“<sup>188</sup> Terrorangriffe können mittels verschiedener Wege verübt werden - zum Beispiel aus der Luft, vom Boden oder vom Wasser aus.

Es ist anzunehmen, dass Terroristen bei einem Anschlagversuch den größtmöglichen (Personen-)Schaden erzielen wollen, um ihre Ziele zu erreichen. Daher wären auch KKW ein denkbare Ziel terroristischer Anschläge, denn die Auswirkungen eines erfolgreichen Anschlages wären bei Freisetzung radioaktiven Materials weitreichend und langfristig katastrophal.<sup>189</sup>

Die Gefahr eines terroristischen Anschlags auf ein KKW besteht durchaus. Beweise liefern Berichte von Versuchen, in KKW einzudringen, sie anzugreifen oder zu bedrohen, die aus Argentinien, Russland, Litauen, Südafrika, Südkorea, den USA und Frankreich vorliegen und die verdeutlichen, dass KKW schon häufiger im Fokus von Terroristen bzw. Kriminellen standen.<sup>190</sup>

Unter der theoretischen Annahme, dass eine terroristische Gruppe einen Höchstschaden durch ihren Angriff erzielen will, müsste ein Angriff im Rahmen der Laufzeit der KKW erfolgen. Da eine Abschaltung älterer, besonders anfälliger, KKW auch entsprechend früher erfolgt, ist das Risiko, dass speziell diese KKW zu Terrorzielen werden, als besonders hoch einzuschätzen.

Hinsichtlich der Gefahr „Terroranschlag“ besteht eine Vielzahl möglicher Szenarien. In den folgenden Kapiteln werden die Szenarien eines Angriffs aus der Luft, eines Angriffs vom Boden aus sowie eines Sabotageakts durch Innentäter dargestellt.

Terror-Risiken sind eine besondere Art von Katastrophenrisiken, da sie nicht zufällig auftreten, sondern durch bewusstes menschliches Handeln verursacht werden. Damit kann die Eintrittswahrscheinlichkeit durch Terrorrisiken verursachter Schäden und deren Gefahren nicht durch Daten und

---

<sup>188</sup> [Haubner 2009], S. 41.

<sup>189</sup> Vgl. [Bundesregierung 2006], S. 4 und 6.

<sup>190</sup> Vgl. [Kelle/Schaper 2001], S. 35.

Verfahren modelliert werden.<sup>191</sup> Dennoch wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Angriff einer terroristischen Gruppe sehr hoch ist, wenn sich diese einmal zu einem Angriff entschlossen hat.<sup>192</sup>

Insgesamt wird im Rahmen der vorliegenden Studie das Terrorrisiko nicht mit einem Modifikationsfaktor berücksichtigt, sondern übergreifend mit 1:1.000 pro Reaktorbetriebsjahr geschätzt.

### 5.2.2.1 Szenario eines gezielten Flugzeugabsturzes

Es existieren mehrere Analysen zur Bewertung der Widerstandsfähigkeit deutscher KKW im Falle eines Angriffs aus der Luft.<sup>193</sup> Ergebnis dieser Analysen ist, dass die KKW in Deutschland, auch nach der Einführung zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen (aufgrund der Ereignisse im September 2001), einem gezielten Absturz eines Verkehrsflugzeugs aufgrund zu dünner Wände der Reaktorgebäude nicht standhalten können und die Gefahr eines nuklearen Katastrophenfalls besteht. Insbesondere die älteren KKW sind für Terrorangriffe anfällig, da die Wände ihrer Reaktorgebäude im Vergleich zu denen jüngerer Bauart dünner sind.<sup>194</sup> So sind die KKW Biblis und Brunsbüttel besonders gefährdet und bereits der Absturz eines vergleichsweise kleinen Flugzeugs, wie bspw. eines Airbus A320, könnte zu einem nuklearen Katastrophenfall führen.<sup>195</sup> Diese beiden KKW sowie die KKW Isar 1 und Philippsburg 1 sind explizit nicht durch entsprechende Sicherheitsmaßnahmen gegen einen Flugzeugabsturz ausgelegt.<sup>196</sup>

In dem Bericht des Untersuchungsausschusses des US- Kongresses in Bezug auf die Ereignisse im September 2001 wird deutlich, dass die Attentäter bzw. deren Gruppe auch den Absturz eines Flugzeugs auf ein KKW in den USA in ihrer Überlegungen einbezogen.<sup>197</sup> Seit den Ereignissen im September 2001 gab es mindestens 20 weitere Flugzeugentführungen. Daher ist generell ein gezielter Flugzeugabsturz aufgrund einer Entführung des Flugzeugs denkbar. Aber auch ein gezielter Absturz speziell auf ein KKW in Deutschland<sup>198</sup> stellt nach Einschätzung deutscher Behörden und Gerichte für Deutschland eine tatsächliche Bedrohung dar.<sup>199</sup> Die in Deutschland bestehende hohe Flugdichte erschwert die Überwachung des Luftraumes. Täglich gibt es hier durchschnittlich mehr als 8.600 Starts und Landungen sowie 3.000 Überflüge.<sup>200</sup> Das Szenario könnte sich dann wie folgt darstellen:

---

<sup>191</sup> Vgl. [Haubner 2009], S. 41 und [Becker 2010 a], S. 2.

<sup>192</sup> Vgl. [Becker 2010 a], S. 2.

<sup>193</sup> Siehe hierzu u. a. [Dietzel 2002], [Hirsch et al. 2004] und [Becker 2010 a].

<sup>194</sup> Vgl. [Becker 2010 a], S. 1. Die Wände des Reaktorgebäudes des KKW Biblis-A aus Stahlbeton haben lediglich eine Stärke von 60 Zentimetern. Vgl. [Becker/Hirsch 2005], S. 14.

<sup>195</sup> Vgl. [Hirsch 2001], S. 7 ff. [Hirsch et al. 2004], S. 3.

<sup>196</sup> Vgl. [Küppers/Pistner 2007], S. 9 f.

<sup>197</sup> Vgl. [9-11 Commission 2004].

<sup>198</sup> Vgl. [Dietzel 2002].

<sup>199</sup> Vgl. [Becker 2010 a] Einleitung (Seite 2 des Dokuments).

<sup>200</sup> Vgl. [Becker 2010 a], S. 3 f.

*Ein Terrorist schafft es, sich trotz gepanzerter und mit einem Code gesicherter Cockpittür, Zugang zum Cockpit des Verkehrsflugzeugs zu verschaffen, da er den Moment der Versorgung der Piloten mit Getränken durch die Crew gewaltsam ausnutzt.<sup>201</sup> Zusätzlich ist die Kabinencrew nicht ausreichend für den Fall einer Flugzeugentführung geschult und wird von zwei weiteren Terroristen überwältigt. Die Terroristen zwingen die Piloten, auf ein KKW zuzufliegen.<sup>202</sup> Dabei trifft das Flugzeug auf das Reaktorgebäude.<sup>203</sup> Die Reaktorgebäudefwand wird beschädigt und ein Großteil des aus dem Flugzeug ausdringenden Treibstoffes gelangt in das Innere des Gebäudes, wodurch ein Brand entfacht wird.<sup>204</sup> Durch den Aufprall des Flugzeuges kommt es zudem zu Schäden im Inneren der Anlage, bspw. zu Brüchen in den Kühlleitungen aufgrund starker Schwingungen.<sup>205</sup> Mehrere sicherheitstechnisch relevante Redundanzen sind davon betroffen und es kommt aufgrund des Kerosinbrandes und der ausfallenden Primärkühlung zu nicht mehr beherrschbaren Abläufen, die bei Ausfall geeigneter Notfallmaßnahmen (Notkühlung) zu einer Kernschmelze führen.<sup>206</sup>*

### 5.2.2.2 Szenario eines Angriffs mit Panzerabwehrlenk Waffen

Der Angriff auf ein KKW unter Verwendung eines Raketenwerfers ist nicht unrealistisch. Bspw. wurde 1982 das noch nicht fertig gestellte KKW Creys-Malville in Frankreich mit mehreren Raketen eines tragbaren Raketenwerfers vom Typ RPG-7 beschossen. Das KKW wurde damals nur leicht beschädigt. Ein anderes Beispiel ist die Bedrohung des KKW Krsko in Slowenien Anfang der 90er Jahre durch Kriegshandlungen.<sup>207</sup>

Die angesprochene Waffengattung entwickelte sich in den vergangenen 20 Jahren stetig weiter.<sup>208</sup> Grund dafür ist, dass sich militärische Auseinandersetzungen auf dem Gefechtsfeld häufig zwischen Panzern und panzerbrechenden Waffen entscheiden und es deshalb zu einem „Wettrüsten“ beider Technologien kam.<sup>209</sup> Beispielsweise rüstet sich die libanesische Organisation Hisbollah seit 1993 mit Panzerabwehrlenk Waffen aus und setzte diese bereits bei ihren Angriffen gegen Israel ein.<sup>210</sup>

In den letzten Jahrzehnten wurden die Panzerabwehrlenk Waffen hinsichtlich ihrer Durchschlagsleistung, Trefferwahrscheinlichkeit, Reichweiten, Sekundärwirkungen sowie ihre Einsatzspektrums

<sup>201</sup> Vgl. [Becker 2010 a], S. 6.

<sup>202</sup> Es könnte aber auch davon ausgegangen werden, dass die Terroristen selbst Kenntnisse besitzen, ein Flugzeug gezielt fliegen zu können. Siehe hierzu: [Becker 2010 a], S. 26.

<sup>203</sup> Selbst bei einer Vernebelung der KKW-Anlage durch ein eingerichtetes Vernebelungssystem, die bei einer Entfernung von 15 bis 20 km des Flugzeugs zum KKW verursacht wird, um die Trefferwahrscheinlichkeit für einen genauen Aufschlagpunkt zu verringern, kann insbesondere bei älteren KKW das Reaktorgebäude getroffen werden. Diese Vernebelungstechnik wurde gerade in Bezug auf die markanten Gebäude der KKW-Anlage, wie das Reaktorgebäude, als unzureichend bewertet. Vgl. [Becker 2010 a], S. 17.

<sup>204</sup> Vgl. [Küppers/Pistner 2007], S. 13 ff.

<sup>205</sup> Vgl. [Küppers/Pistner 2007], S. 6.

<sup>206</sup> Vgl. [Küppers/Pistner 2007], S. 13 ff. und [Kelle/Schaper 2001], S. 35.

<sup>207</sup> Vgl. [Stritar et al. 1993], S. 70.

<sup>208</sup> Vgl. [Becker 2010 b], S. 2.

<sup>209</sup> Vgl. [Becker 2010 b], S. 1.

<sup>210</sup> Siehe hierzu: [Global Security 2006], S. 1 und [Marcus 2006].

deutlich weiterentwickelt.<sup>211</sup> Panzerabwehrlenkflugkörpersysteme verfügen heutzutage auch bei großen Entfernungen über eine so hohe Trefferwahrscheinlichkeit, dass das gleiche Ziel zu 80 Prozent mehrmals hintereinander getroffen werden kann.<sup>212</sup> Mit diesen Waffen können neben Hohlladungsgefechtssköpfen auch thermobarische Gefechtssköpfe abgefeuert werden. Diese besitzen aufgrund der brennbaren Substanzen im Gefechtsskopf einen stärkeren zerstörerischen Effekt.<sup>213</sup>

Die Panzerabwehrwaffen und deren Gefechtssköpfe wurden entwickelt, um Panzer zu zerstören. Schlägt bspw. ein Hohlladungsgefechtsskopf, bestehend aus einem „hohlen mit Sprengstoff ummantelten Metallkegel“<sup>214</sup>, auf eine Panzerung auf, wird der Sprengstoff gezündet. Durch die hohe Geschwindigkeit des aufprallenden Hohlladungsstachels wird die Panzerung zerstört und ein Teil der Explosionsenergie in den Panzer gebracht. Der Hohlladungsstachel sowie die Partikel der zerstörten Panzerung verursachen verheerende Schäden im Innenraum des Fahrzeugs. Dieses Szenario wäre auch bei Angriff eines Reaktorgebäudes denkbar.<sup>215</sup>

Die Wände der Reaktorgebäude der KKW bestehen aus Stahlbeton. Ergebnisse von Versuchen mit Panzerabwehrwaffen gegen Stahlbetonwände mit einer Wandstärke von 1,2 bis 2m, die den Wandstärken deutscher KKW entsprechen<sup>216</sup>, sind nicht bekannt. Allerdings existieren Erkenntnisse über die Durchschlagskraft anderer Panzerabwehrwaffen, die ein Ziel aus Beton mit einer Wandstärke von zwei Metern aus 1,3 km Entfernung durchschlagen können, wenn kein Zaun vorgeschaltet wurde.<sup>217</sup> Bei Bestehen eines Zaunes als vorgelagerter Schutz könnte es nur bei mehrmaligem Beschuss zu einer Zerstörung des Reaktorgebäudes kommen.<sup>218</sup>

Die von Frankreich und Deutschland gemeinsam entwickelte Panzerabwehrwaffe Milan 3 (Missile d'Infanterie léger antichar 3) kann sogar 3m dicke Wände aus verstärktem Beton durchschlagen.<sup>219</sup> Der russischen Panzerabwehrwaffe des Typs Kornet wird darüber hinaus eine noch höhere Durchschlagkraft nachgesagt.

Hinsichtlich der Durchschlagskraft von Panzerabwehrwaffen macht es keinen erheblichen Unterschied, ob es sich dabei um einen einfachen oder einen Doppelhohlladungssprengkopf handelt. Vielmehr ist das Gewicht des Sprengkopfes entscheidend.

Unter der Annahme, dass bei einem Beschuss mit derartigen Waffen die Primär- und Notkühlung während des Betriebs des KKW ausfällt, wäre auch für dieses Szenario ein nuklearer Katastro-

---

<sup>211</sup> Vgl. [Becker 2010 b], S. 1 f.

<sup>212</sup> Vgl. [Bundesministerium der Verteidigung 2010], S. 1.

<sup>213</sup> Vgl. [Becker 2010 b], S. 1.

<sup>214</sup> [Becker 2010 b], S. 2.

<sup>215</sup> Vgl. [Becker 2010 b], S. 2.

<sup>216</sup> Die Wandstärken der Reaktorgebäude der ältesten KKW sind sogar noch geringer. Beispielsweise liegen die bei einigen KKW bei nur 60 Zentimetern. Siehe hierzu [Becker/Hirsch 2005], S. 14.

<sup>217</sup> Vgl. [Bundesministerium der Verteidigung 2010], S. 2.

<sup>218</sup> Vgl. [Bundesministerium der Verteidigung 2010], S. 1.

<sup>219</sup> Vgl. [army-technology].

phenfall denkbar.

### 5.2.2.3 Szenario der Sabotage durch Innentäter

Auch sogenannte Innentäter stellen, Experten der US-Umweltschutzbehörde zufolge, eine Bedrohung für KKW dar. Innentäter sind einerseits die im KKW angestellten Mitarbeiter, die neben Informationen aus öffentlich zugänglichen Quellen auch über ein breites Wissen in Bezug auf die Sicherungsmaßnahmen und die Funktionsweisen aller sicherheitsrelevanten Komponenten im „eigenen“ KKW verfügen und dies durch gezielte Sabotage beschädigen können. Andererseits können es auch KKW-fremde Personen sein, die sich Zugang zur KKW-Anlage verschaffen.<sup>220</sup>

In den vergangenen Jahren stiegen die Terrorgefahr und damit die Bedrohung einer Sabotage durch Innentäter. Die zunehmend steigenden Wartungs- und Prüfungsarbeiten, v.a. diejenigen, die während des Leistungsbetriebs des KKW stattfinden, sowie der dafür notwendige Einsatz von Fremdfirmen, erhöht die Möglichkeiten für Terroristen, sich zu Zugang zu verschaffen.<sup>221</sup>

Zudem erhöht sich das Risiko einer ernsthaften Beschädigung des KKW und dessen Funktionsweise, wenn man die Möglichkeit eines Selbstmordattentats des Innentäters einbezieht, weil damit meist größere Detonationen einher gehen. Allerdings führen Faktoren, wie bspw. die zunehmenden Sicherheitsüberprüfungen anzustellender Personen oder Fremdfirmenmitarbeiter, zu einer Verringerung des Risikos einer ernsthaften Beschädigung.<sup>222</sup> Bestehende Sicherheitslücken sind insbesondere für die älteren KKW bedeutsam, da sie aufgrund generell geringerer Sicherheitsstandards in Bezug auf den heutigen Stand an Wissenschaft und Praxis (Auslegungsreserven) einen Unfall eher nicht beherrschen könnten. Die Bedrohung hängt aber auch von der Sicherheitskultur im KKW selbst ab.<sup>223</sup>

Im März 2006 wurde im KKW Philippsburg 1 einem Kontrollen durchführenden Mitarbeiter ein Schlüsselbund ausgehändigt, um Arbeiten an einem Notstromaggregat durchführen zu können. Wenige Stunden später fehlen zwölf dieser Schlüssel, von denen drei einen Zugang zu sicherheitsrelevanten Bereichen ermöglichten. Mit dem Austausch der Schlösser wurde erst in den folgenden Tagen begonnen. Es waren über einhundert Schlösser auszutauschen.<sup>224</sup> Am 15. Februar 2007 informierte eine Fremdfirma die für das KKW zuständige Atomaufsicht, dass keine ausreichende Kontrolle des eigenen Werkzeuges und anderer Geräte bei der Einfahrt in das KKW vorgenommen wurde. Dieser Vorwurf wurde bestätigt. Es stellte sich heraus, dass Unklarheiten hinsichtlich der Intensität vorzunehmender Kontrollen bestanden haben. Diese wurden durch eine entsprechende Ergänzung der Dienstanweisung des Objektsicherungsdienstes beseitigt.<sup>225</sup>

---

<sup>220</sup> Vgl. [Honnellio/Rydell 2005].

<sup>221</sup> Vgl. [Becker 2009], S. 37.

<sup>222</sup> Siehe hierzu [Honnellio/Rydell 2005].

<sup>223</sup> Vgl. [Becker 2009], S. 37 f.

<sup>224</sup> Vgl. [Stuttgarter Zeitung 2006].

<sup>225</sup> Vgl. [LTBW 2009], S. 5.

Ein weiterer Vorfall durch Sabotage ereignete sich in dem KKW Koeberg bei Kapstadt. In einem Generatorkern wurde ein acht Zentimeter langer Bolzen entdeckt, der normalerweise außerhalb angebracht ist. Der Reaktor fiel aus, aufgrund dessen lief der zweite Reaktor länger, als das Wartungsintervall es vorsah.<sup>226</sup>

Ein mutmaßliches Mitglied der Terrorgruppe al-Qaida arbeitete von 2002 bis 2008 in einem KKW in New Jersey, USA, da ihn die US-amerikanischen Behörden nicht als „Risikoperson“ einstufen. Er soll auch in weiteren KKW tätig gewesen sein. Nach Angaben des Verteidigungsministeriums im Jemen soll die Person in mehrere Terroranschläge verwickelt gewesen sein.<sup>227</sup>

Auf die Möglichkeit, einen Sabotageakt verüben zu können, machte auch eine Aktion einer großen Gruppe von Greenpeace-Aktivisten am 22.06.2009 aufmerksam. Mit der Zielsetzung, auf die Gefahren der Atomenergie hinzuweisen, gelang es ihnen, in das Gelände des KKW Unterweser einzudringen und die Kuppel des Reaktors zu besetzen.<sup>228</sup>

Anhand der aufgeführten Beispiele soll verdeutlicht werden, dass die Bedrohung eines KKW durch Sabotage durch Innentäter besteht.

### 5.2.3 Szenario eines Computervirus

Im Jahr 2010 befiel der Computervirus Stuxnet u.a. das iranische KKW Buschehr. Das KKW war erst wenige Zeit vorher ans Netz gegangen. Der Virus richtete Schäden an mehreren Computern im KKW an. Mit der Beeinflussung der Steuerung industrieller Großanlagen war es Ziel des Virenangriffs, das iranische Nuklearprogramm zu verzögern.<sup>229</sup> Zudem wird als Ursache für die Zerstörung von mehr als 1.000 Zentrifugen der Urananreicherungsanlage Natans im Iran der gleiche Virus vermutet.<sup>230</sup> Ein Computerexperte decodierte den Virus und bezeichnete ihn als die größte Schadsoftwareoperation in der Geschichte. Er soll von Experten programmiert worden sein, die über Insiderwissen der Anlage sowie Informationen des Geheimdienstes verfügen. Vermutet wurde daher ein Angriff durch staatliche Organisationen.<sup>231</sup>

Bezüglich der Bedrohung von KKW durch Cyber-Attacken sind die Meinungen sehr verschieden. Einige Organisation sehen in ihnen die derzeit größte Bedrohung, während andere Institutionen ernstzunehmende Gefahren für KKW fast ausschließen. Die Bundesregierung hält es ebenfalls für ausgeschlossen, dass Computersysteme von außen derart beeinflusst werden können, dass es zu einer ernsthaften Beschädigung mit weitreichenden Folgen für die Anlage und deren Umgebung

---

<sup>226</sup> Vgl. [DPA 2006].

<sup>227</sup> Vgl. [Welt Online 2010].

<sup>228</sup> Vgl. [Becker 2009], S. 37.

<sup>229</sup> Vgl. [Pick 2010].

<sup>230</sup> Vgl. [Albright/Brannan/Walrond 2010], S. 1 ff.

<sup>231</sup> Vgl. [Ladurner/Pham 2010].

---

kommt.<sup>232</sup>

Nach Meinung von IT-Sicherheitsexperten kann ein Computerwurm wie Stuxnet einen großen Schaden an einem KKW anrichten, dieses aber nicht außer Gefecht setzen. Bspw. könnten Kernkraftwerke indirekt betroffen sein, wenn ein Virenangriff zum Ausfall der Klimatechnik führt, was zunächst relativ unkritisch ist. Problematischer ist aber der Gesichtspunkt zu sehen, dass bereits Wissen vorhanden und im Umlauf ist, wie in die Steuerungssoftware von Industrieanlagen eingegriffen, speicherprogrammierbare Steuerungen infiziert und effektiv gestört werden können. Möglicherweise könne sich dies noch zu einem Szenario katastrophaler Auswirkungen entwickeln.<sup>233</sup>

Auch wenn die Gefahr eines Cyber-Angriffs aktuell als nicht wahrscheinlich eingestuft wird, könnte die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Angriffs in Zukunft aufgrund der Weiterentwicklung dieser Programme steigen und zu einer Bedrohung für KKW aufgrund ausfallender Computer- und Steuerungssysteme werden. Unter dieser Annahme wird im Rahmen der vorliegenden Studie eine Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls um 10 bis 50 Prozent geschätzt, was sich in Modifikationsfaktoren von 1,1 und 1,5 niederschlägt.

#### 5.2.4 Szenario menschlichen Versagens

Das Szenario eines nuklearen Katastrophenfalls, der durch menschliches Versagen im Sinne von Fahrlässigkeit (mit) verursacht wurde, kann am Beispiel des Kernkraftwerkes Tschernobyl belegt werden. Am 25. April 1986 wurde getestet, ob bei einem Stromausfall die Energie der Turbinenrotation des Reaktors IV übergangsweise zur Stromerzeugung genutzt werden kann, bis die Notstromdiesellaggregate angelaufen sind. Das Anlaufen dieser Aggregate dauert 40 bis 50 Sekunden. Der Test wurde von der Betriebsmannschaft ohne die Erlaubnis zuständiger Behörden vollzogen. Der Test wurde allerdings nicht zum ersten Mal durchgeführt; im Reaktor III wurde dies ein Jahr zuvor getestet, allerdings nicht während des Betriebs des Reaktors. Der Test am Reaktor IV im Jahr 1986 wurde - bei Verstoß gegen die Betriebsvorschriften - während des Betriebs bei 50 Prozent Leistung des Reaktors durchgeführt. Zusätzlich wurde, wie in der Versuchsanordnung vorgesehen, das Notkühlsystem isoliert, um bei Notkühlsignalen während des Testversuchs eine Einspeisung von Wasser zur Kühlung zu vermeiden. Durch eine ungünstige Verkettung physikalischer Eigenschaften des Reaktors und sicherheitstechnischer Eigenschaften sowie durch Bedienungsfehler geriet der Test außer Kontrolle. Am Morgen des folgenden Tages explodierte der Reaktor und die Halle sowie das Turbinengebäude wurden zerstört. Es kam zur Kernschmelze und eine große Menge radioaktiven Materials wurde freigesetzt.<sup>234</sup>

Auch das Ereignis am 28. März 1979 in Harrisburg am KKW Three Mile Island, bei dem es

---

<sup>232</sup> Vgl. [Bundesregierung 2006], S. 11.

<sup>233</sup> Vgl. [DPA 2010].

<sup>234</sup> Vgl. [Czakainski et al. 1996], S. 4 ff. Für detaillierte Beschreibungen der Ursachen und des Ablaufs des Unfalls in Tschernobyl siehe [Czakainski et al. 1996].

ebenfalls zu einer Freisetzung radioaktiven Materials kam, wurde u.a. durch menschliches Versagen verursacht. Es kam zunächst zu einer Störung der Unit 2. Kleinere technische Defekte wurden nicht erkannt und anstatt das Ventil zu schließen, das den Abfluss des Kühlwassers verursachte, führte eine Reihe von Maßnahmen der Betriebsmannschaft zu einer Verschlimmerung des Zustandes und letztendlich zur Kernschmelze sowie zur Freisetzung radioaktiven Materials.<sup>235</sup>

Beide erläuterten Unfälle belegen, dass das Risiko nuklearer Ereignisse die durch menschliches Versagen verursacht werden, unbedingt besteht. Grund für menschliches Versagen können bspw. auch die langen Arbeitszeiten der Überwachungspersonen sein. Diese arbeiten teilweise 72 Stunden innerhalb von sechs Arbeitstagen. Diese Problematik war den Behörden und der Öffentlichkeit bereits bekannt. Erneut auf die Situation aufmerksam machte im Jahr 2007 ein anonymes Brief an die US-amerikanische Atomaufsichtsbehörde, in dem ein Mitarbeiter des KKW Peach Bottom in Pennsylvania sich darüber beschwerte, dass Sicherheitspersonal im Dienst schlafen würde.<sup>236</sup>

Im Zusammenhang mit dem Risiko des menschlichen Versagens wird der stetige Verlust an Know-how aufgrund des Ausscheidens von erfahrenen Mitarbeitern des KKW, der Gutachterfirmen sowie den (Aufsichts-)Behörden diskutiert. Erschwerend hinzu kommt, dass es für KKW zunehmend schwieriger wird, adäquat qualifiziertes Personal zu finden, begründet durch das stetig abnehmende Interesse für naturwissenschaftliche Fächer, insbesondere in Bezug auf die Kerntechnik.<sup>237</sup> Auch dadurch kann sich das Risiko möglicherweise erhöhen.

Das menschliche Versagen ist aber eine der Gefahren, der der meiste Aufwand gewidmet wird. Daher wird der Einfluss auf die Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit im Rahmen der vorliegenden Studie durch die Autoren als eher gering eingeschätzt. Sie wird mit einer Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeiten aus Kapitel 5.1 von 10 Prozent berücksichtigt.

### 5.2.5 Szenario eines Erdbebens

Gerade die aktuellen Ereignisse im japanischen Fukushima machen darauf aufmerksam, dass sich ein „Restrisiko“, das als extrem unwahrscheinlich gilt, realisieren kann.

Am 11. März 2011 wurde ein Erdbeben der Magnitude (Stärke) 9<sup>238</sup> erstmalig vor der Nordostküste Japans gemessen. Das Beben verursachte einen Tsunami. Die Einflüsse dieser Naturereignisse führten u.a. zum Versagen des Kühlsystems und der externen Stromversorgung des KKW Daiichi in Fukushima, das sechs Siedewasserreaktoren umfasst. Aufgrund des Tsunami konnten die für die Notfallstromversorgung vorgesehenen Dieselgeneratoren nicht lang genug in Betrieb genom-

---

<sup>235</sup> Vgl. [USNRC 2009], S. 1.f.

<sup>236</sup> Vgl. [Harwood 2007].

<sup>237</sup> Vgl. [Büro für Atomsicherheit 2010], S. 15 f.

<sup>238</sup> Vgl. [Schweizerischer Erdbebendienst 2011], S. 14 ff. Eine Magnitude beschreibt die Stärke eines Erdbebens.

men werden. In mindestens einem dieser Blöcke kam es vermutlich<sup>239</sup> zu einer Kernschmelze und aufgrund eines Brandes im Abklingbecken für die Brennstäbe kam es zu Freisetzung erheblicher Mengen radioaktiven Materials. Der Unfall wurde zum Zeitpunkt der Studiererstellung im März 2011 bereits der INES-Stufe 6 (ernster Unfall) zugeordnet.<sup>240</sup>

Ein identisches Szenario „Erdbeben und Tsunami“ ist aufgrund der geografischen Lage Deutschlands nicht möglich. Dennoch befinden sich einige KKW in Gebieten, in denen regelmäßig Erdbeben geringer Intensität auftreten. Zu nennen sind im Zusammenhang mit KKW-Standorten vor allem die Region rund um den Oberrheingraben und die alpennahen Regionen. Auch Erdbeben der Stärken sechs bis acht hat es bereits in diesen Gebieten gegeben.<sup>241</sup> Die Abbildung 5.3 zeigt Erdbeben der Stärken sechs bis acht in Deutschland anhand von Erdbebenereignissen in den Jahren 800 bis 2010.

Bis Ende der 1990er Jahre wurde von einem möglichen Erdbeben in Deutschland mit maximaler Intensität von 7,75 ausgegangen. Diese damals vorliegenden Annahmen lagen auch bei dem Bau der KKW in Deutschland und dem Einrichten der Sicherheitsvorkehrungen zugrunde.<sup>242</sup> Das KKW Biblis B ist beispielsweise gegen Erdbeben der Stärke acht ausgelegt, d.h. die Bauweise, die Bausubstanz und die Sicherheitsvorkehrungen sollen einem Erdbeben bis zu dieser Stärke standhalten.<sup>243</sup> Nach neuestem Stand der Erkenntnisse wird ein höherer Maximalwert eines Erdbebens in Deutschland angenommen.<sup>244</sup> Laut Geowissenschaftler Eckhard Grimmel, Institut Geographie der Universität Hamburg, wird die Erdbebenaktivität in Deutschland weitgehend unterschätzt.<sup>245</sup> Der Hessischen Atomaufsicht liegt ein Erdbeben-Gutachten vor, dem zufolge in Deutschland mit Erdbeben bis zur Stärke zehn gerechnet werden muss.<sup>246</sup>

Ein starkes Erdbeben kann für Deutschland demnach nicht ausgeschlossen werden. Auch wird ein Erdbeben als eine einen nuklearen Katastrophenfall auslösende Gefahr angesehen. Daher wird das Szenario eines für ein KKW bedrohliches Erdbeben im Rahmen der hier vorliegenden Analyse einbezogen.<sup>247</sup>

Ein zusätzliches Risiko besteht, wenn die Auslegung gegen Erdbeben zwar konzipiert wurde, die bauliche Ausführung der KKW aber nicht ordnungsgemäß durchgeführt wird. So kam es im Jahr

---

<sup>239</sup> Zum Zeitpunkt der Erstellung der hier vorliegenden Studie im März 2011 existierten noch keine finalen Erkenntnisse zum genauen Hergang und zu den Folgen.

<sup>240</sup> Vgl. [Focus Online 2011].

<sup>241</sup> Vgl. die Abbildung des [Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe 2011].

<sup>242</sup> Vgl. [Becker 2005], S. 14 f.

<sup>243</sup> Vgl. [Paulitz 2008], S. 2

<sup>244</sup> Vgl. [Becker 2005], S. 14 f.

<sup>245</sup> Vgl. [Steeb 2011].

<sup>246</sup> Vgl. [Paulitz 2008], S. 2

<sup>247</sup> Der Einfluss eines Erdbebens wurde bereits in den vorangegangenen Studien - dargestellt in Kapitel 5.1 berücksichtigt. Allein aufgrund aktueller Ereignisse wird es hier erläutert. Es fließt jedoch nicht in die nachfolgenden Berechnungen ein, da keine Änderung des Erdbebenrisikos erfolgte.

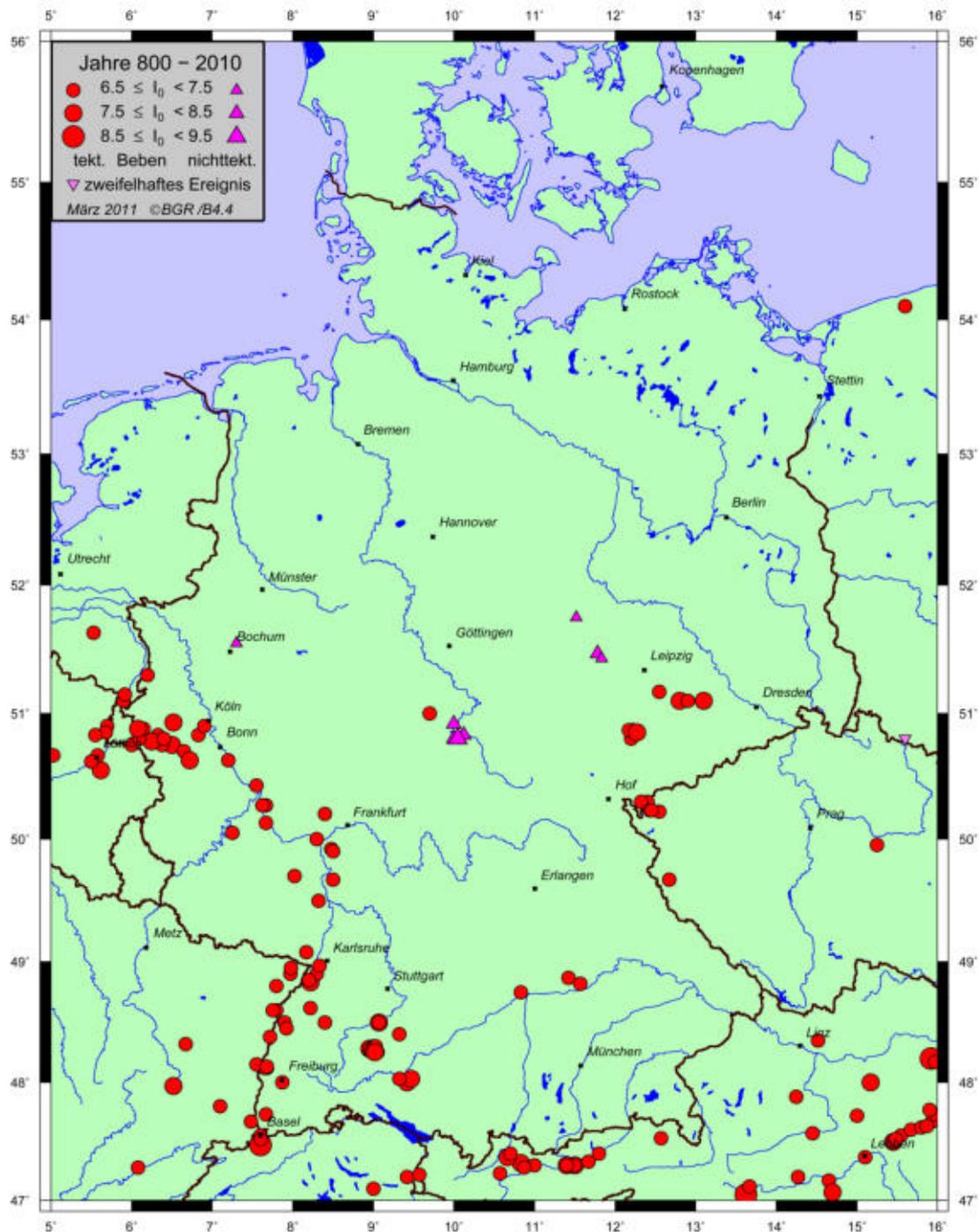


Abbildung 5.3: Erdbeben in Deutschland in den Jahren 800 - 2010 (Quelle: [Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe 2011])

2006 zu einer außerplanmäßigen Abschaltung des Kraftwerksblocks Biblis B, nachdem bei einer Generalüberholung des Blocks A bei Stichproben mehrere falsch montierte Dübel aufgefallen waren. Der Betreiber teilte daraufhin mit, dass in beiden Kraftwerksblöcken zwischen 3500 und 4000 Spezialdübel überprüft werden müssen, mit denen Rohrleitungen erdbebensicher aufgehängt sind.<sup>248</sup>

Allerdings haben die aktuellen Ereignisse in Japan keinerlei Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Szenarios. Lediglich die veränderte Sicht der Öffentlichkeit auf diese Gefahr rückte diese in den vergangenen Wochen in den Vordergrund. Daher hat die Gefahr eines Erdbebens keinen Einfluss auf die angenommene Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls.

### **5.3 Zusammenfassung der Schätzungen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten**

In der nachfolgenden Tabelle sind alle Eintrittswahrscheinlichkeiten, die in Kapitel 5.1 betrachtet wurden sowie die jeweiligen durch die Szenarien modifizierten Eintrittswahrscheinlichkeiten dargestellt.

---

<sup>248</sup> Vgl. [Spiegel-Online 2006].

Eintrittswahrscheinlichkeit pro Reaktorbetriebsjahr	Modifikationsfaktor	Szenario eines Terroraktes (Kapitel 5.2.2)	Externalities of Energy (ExternE) Vol. 5	DRS Phase B ohne Accident Management	DRS Phase B mit Accident Management	Methodenkonvention des Umweltbundesamtes
Eintrittswahrscheinlichkeit pro Reaktorbetriebsjahr		1:1000/Ra	1:100.000/Ra	1:33.333/Ra	1:280.000/Ra	1:10.000.000/Ra
Szenario Alterung der KKW (Kapitel 5.2.1)	2	keine Modifikation	1:50.000/Ra	1:16.666/Ra	1:140.000/Ra	1:5.000.000/Ra
Szenario Alterung der KKW (Kapitel 5.2.1)	6		1:16.666/Ra	1:5.555/Ra	1:46.666/Ra	1:1.666.666/Ra
Szenario Alterung der KKW (Kapitel 5.2.1)	10		1:10.000/Ra	1:3.333/Ra	1:28.000/Ra	1:1.000.000/Ra
Szenario Alterung der KKW (Kapitel 5.2.1)	18		1:5.555/Ra	1:1.850/Ra	1:15.555/Ra	1:555.555/Ra
Szenario eines Computervirus (niedriger Ansatz) (Kapitel 5.2.3)	1,1		1:90.909/Ra	1:30.300/Ra	1:254.545/Ra	1:9.090.909/Ra
Szenario menschlichen Versagens (Kapitel 5.2.4)						
Szenario eines Computervirus (hoher Ansatz) (Kapitel 5.2.3)	1,5		1:66.666/Ra	1:22.222/Ra	1:186.666/Ra	1:6.666.666/Ra

Abbildung 5.4: Übersicht über alle in Kapitel 5 erhobenen Eintrittswahrscheinlichkeiten (Quelle: Eigene Darstellung)

## Kapitel 6

# Berechnung der Prämie einer Haftpflichtversicherung für das Risiko „nuklearer Katastrophenfall“

### 6.1 Verwendete Methodik / Beschreibung des Modells

#### 6.1.1 Aufgabenstellung und Ziele

Mit dem folgenden Modell soll der anfallende erwartete Leistungsbarwert berechnet werden, der nötig ist, um Schäden und Schadenbeseitigungskosten gegenüber Dritten privat abzusichern, welche durch das Schadenereignis eines nuklearen Katastrophenfalls in einem KKW entstehen. Dazu werden die Auswirkungen eines nuklearen Katastrophenfalls in einem KKW simuliert und das dabei zugrunde liegende Risiko quantifiziert. Es existieren bereits verschiedene Studien zur Einschätzungen der Schadenhöhen und Eintrittswahrscheinlichkeiten, diese wurden in Kapitel 4 und 5 vorgestellt und werden als Grundlage für die Berechnung genutzt.

Die Schadenereignisse eines nuklearen Katastrophenfalls in einem KKW zeichnen sich insbesondere durch extreme Schadenhöhen und sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten aus. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine einzelne Schadenhöhe der gesamten Wahrscheinlichkeitsfunktion befindet sich in der Größenordnung von 500 Femto ( $10^{-15}$ ). Deshalb erfolgt die Berechnung des Leistungsbarwerts unter Verwendung von Modellen der Extremwertstatistik. Dazu wird auf Ba-

sis der vorliegenden Studien je Schadenart  $X$  die Verteilungsfunktion<sup>249</sup>  $F$  für das Auftreten von Schadenhöhen geschätzt, wie diese Schätzung erfolgt, wird in Kapitel 6.1.3 erläutert. Aus dieser Verteilungsfunktion kann die Verteilung der Ordnungsstatistiken<sup>250</sup> ermittelt werden. Für große  $n$  konvergieren die „standardisierten“<sup>251</sup> Ordnungsstatistiken gegen eine Extremwertverteilung.

Im folgenden Abschnitt werden zum besseren Verständnis des Sachverhalts die Grundzüge der Extremwerttheorie erklärt. Im Anschluss wird erläutert, welche Verteilungsfunktion für das Auftreten von Schadenhöhen zugrunde gelegt wird, wie der Höchstschaden und die Schadenerwartung ermittelt werden.

### 6.1.2 Einführung in die Extremwerttheorie

Die Extremwerttheorie<sup>252</sup> beschäftigt sich mit den maximalen bzw. minimalen Werten von Stichproben. Es stellt sich die Frage, ob für die Extremwerte für unabhängig identisch verteilte Zufallsgrößen  $X_1, X_2, \dots, X_n$  mit Verteilungsfunktion  $F$  eine Grenzverteilung existiert und wie letztere eindeutig bestimmt werden kann.

Dabei genügt es, wenn nur die Verteilung der Maximalwerte betrachtet wird, welche wegen der Unabhängigkeit der Zufallsgrößen gegeben ist durch

$$\mathbb{P}(\max(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq x) = \mathbb{P}(X_1 \leq x, X_2 \leq x, \dots, X_n \leq x) = F^n(x).$$

Diese Gleichung bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass der größte Wert der Zufallsgrößen kleiner ist als  $x$ , gleich der Wahrscheinlichkeit ist, dass alle Zufallsgrößen kleiner sind als  $x$ .

Für die Quantifizierung des Risikos eines nuklearen Katastrophenfalls ist einzig das Verhalten der maximalen Schadenausmaße<sup>253</sup> relevant. Es sei jedoch zur Vollständigkeit der Extremwerttheorie angemerkt, dass auch entsprechende Aussagen über die Verteilung der Minimalwerte möglich sind. Die Bestimmung der Grenzverteilung für die minimalen Werte erfolgt dann analog, denn aufgrund der Eigenschaft

$$\min(X_1, X_2, \dots, X_n) = -\max(-X_1, -X_2, \dots, -X_n)$$

<sup>249</sup> Eine Verteilungsfunktion  $F$  beschreibt die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsgröße  $X$ . Der Wert  $F(x)$  der Verteilungsfunktion  $F$  an der Stelle  $x$  gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Zufallsgröße Werte annimmt, die kleiner oder gleich  $x$  sind, d.h.  $F(x)$  gibt an, wie wahrscheinlich das Ereignis  $X \leq x$  ist.

<sup>250</sup> Eine Stichprobe  $X_1, \dots, X_n$  von Zufallsgrößen wird als Statistik bezeichnet. Die zugehörige Ordnungsstatistik ordnet die Zufallsgrößen der Größe nach.

<sup>251</sup> Eine Zufallsgröße heißt standardisiert, wenn ihr Erwartungswert gleich 0 ist und ihre Varianz gleich 1. Sei  $X$  eine Zufallsgröße, dann ist die Standardisierung der Zufallsgröße  $X$  gegeben durch:

$$Y = \frac{X - \mathbb{E}X}{\sqrt{\text{Var}(X)}}$$

<sup>252</sup> Siehe hierzu [Leadbetter et al. 1983] oder auch [Reiss/Thomas 2007]

<sup>253</sup> Die maximalen Schadenausmaße im Bezug auf den nuklearen Katastrophenfall sind die simulierten Höchstschäden.

und mit

$$\bar{F}(x) = 1 - F(x)$$

folgt

$$\mathbb{P}(\min(X_1, X_2, \dots, X_n) > x) = (1 - F(x))^n = \bar{F}^n(x).$$

Somit gilt für die Verteilungsfunktion der minimalen Werte

$$\mathbb{P}(\min(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq x) = 1 - \bar{F}^n(x)$$

und unter Verwendung der Extremwertverteilung für Maximalwerte kann die Extremwertverteilung der Minimalwerte gefolgert werden.

Die folgenden Hauptaussagen stellen die zentralen Resultate der Extremwerttheorie dar. Das erste Resultat besagt, dass sich die Verteilung der Maximalwerte einer Stichprobe unter geeigneter „Standardisierung“<sup>254</sup> einer Grenzverteilung  $G$  annähert:

**Theorem 6.1.1** *Es seien  $X_1, X_2, \dots, X_n$  unabhängig identisch verteilte Zufallsgrößen. Dann existieren zwei Zahlenfolgen  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  und  $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$  mit  $a_n, b_n \in \mathbb{R}$  und  $a_n > 0$ , so dass gilt:*

$$\frac{\max(X_1, X_2, \dots, X_n) - b_n}{a_n} \xrightarrow{\mathcal{D}} G.$$

$G$  ist eine nicht degenerierte Grenzverteilung.

Das zweite Hauptresultat der Extremwerttheorie besagt, dass die Grenzverteilung  $G$  der Maxima einer Stichprobe eine von drei Verteilungsfunktionsstypen annimmt:

**Theorem 6.1.2** *Es seien  $X_1, X_2, \dots, X_n$  unabhängig identisch verteilte Zufallsgrößen. Die Grenzverteilung der „standardisierten“ Maxima ist definiert durch eine der drei folgenden Verteilungsfunktionsstypen:*

$$\begin{array}{ll} \text{Typ 1 (Gumbel-Typ):} & G_0(x) = \exp(-e^{-x}) \quad -\infty < x < \infty; \\ \text{Typ 2 (Fréchet-Typ):} & G_{1,\alpha}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ \exp(-x^{-\alpha}), \quad \alpha > 0, & x > 0; \end{cases} \\ \text{Typ 3 (Weibull-Typ):} & G_{2,\alpha}(x) = \begin{cases} \exp(-(-x)^\alpha), \quad \alpha > 0, & x \leq 0, \\ 1, & x > 0. \end{cases} \end{array}$$

<sup>254</sup> Es ist keine Standardisierung der Zufallsgröße im eigentlichen Sinn, da  $a_n$  und  $b_n$  nicht notwendigerweise die Streuung und den Erwartungswert wie in Fußnote 251 beschrieben darstellen.

### 6.1.3 Wahl der Verteilungsfunktion für das Auftreten von Schadenhöhen

Es soll das Risiko der finanziellen Verpflichtung aus der Haftung eines KKW-Inhabers nach einem nuklearen Katastrophenfall abgesichert werden, d.h. der Versicherer ist nur verpflichtet, eine Zahlung zu leisten, wenn ein nuklearer Katastrophenfall eingetreten ist. Andere Schäden und Unfälle als die des nuklearen Katastrophenfalls im Zusammenhang mit dem KKW-Betrieb, wie beispielsweise vereinzelte Erkrankungen des Personals durch überhöhte Strahlenbelastung im KKW, werden durch diese Versicherung nicht abgedeckt. Deshalb sind die Wahrscheinlichkeiten von bestimmten Extremschadenhöhen der Schadenart  $X$  unter der Annahme, dass ein nuklearer Katastrophenfall erfolgte, von Interesse. Diese Verteilungsfunktion wird mit  $F$  bezeichnet.

Da ein nuklearer Katastrophenfall immer mit sehr hohen Schadenaufwänden verbunden ist und ein bestimmtes Schadenausmaß nicht unterschreitet, handelt es sich bei der Verteilungsfunktion  $F$  offenbar um eine linksschiefe Verteilung. Weiterhin wird angenommen, dass das Schadenausmaß eines einzelnen nuklearen Katastrophenfalls nach oben begrenzt ist. Deshalb ist die Verteilungsfunktion der Schadenhöhen nach oben beschränkt. Unter der Bedingung, dass ein nuklearer Katastrophenfall eingetreten ist, nimmt die Relation zwischen der Schadenhöhe und der zugehörigen Wahrscheinlichkeit für diese Schadenhöhe die Form aus Abbildung 6.1 an.

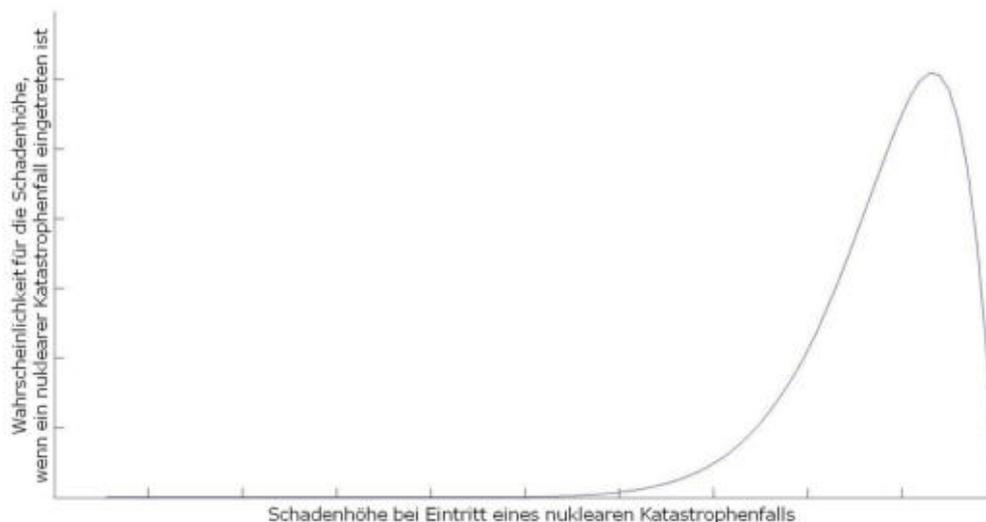


Abbildung 6.1: Wahrscheinlichkeiten für Schadenhöhen, wenn ein nuklearer Katastrophenfall eingetreten ist (Quelle: Eigene Darstellung)

Die zweiparametrische Beta-Verteilung mit den Parametern  $\alpha > 0$  und  $\beta > 0$  erfüllt diese Eigenschaft unter entsprechender Wahl der Parameter<sup>255</sup>. Deshalb wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die Schadenhöhen bei Eintritt eines nuklearen Katastrophenfalls beta-verteilt sind. Zunächst soll

<sup>255</sup> Durch die Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  wird die Form der Beta-Verteilung beschrieben, außerdem legen sie den Erwartungswert und die Varianz fest.

das mathematische Konzept, auf dem dieses Kapitel beruht, veranschaulicht werden. Im Anschluss daran wird die Beta-Verteilung beschrieben. Da die traditionelle Beta-Verteilung jedoch auf das Intervall  $[0, 1]$  beschränkt ist, wird sie anschließend auf ein beliebiges Intervall  $[a, b]$  verallgemeinert. Abschließend erfolgt die Erläuterung, wie die Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  gewählt werden müssen, damit der Schaden eines nuklearen Katastrophenfalls beschrieben werden kann.

Das angewandte mathematische Konzept beruht darauf, dass die Beta-Verteilung eindeutig durch ihre Momente<sup>256</sup> beschrieben wird. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache kann die Verteilungsfunktion aus den Momenten abgeleitet werden. Unter Verwendung der betrachteten Studien werden der Erwartungswert und die Varianz, d.h. das erste Moment und das zweite zentrale Moment<sup>257</sup>, für einen nuklearen Katastrophenschaden als bekannt angenommen. Da die Momente der Beta-Verteilung nur von den Parametern  $\alpha$  und  $\beta$  abhängen, können diese unter der Annahme, dass die Schäden beta-verteilt sind und dass die Erwartung und die Varianz der Schäden bekannt sind, berechnet werden.

Die Beta-Verteilung besitzt auf dem Intervall  $[0, 1]$  die Dichte<sup>258</sup>

$$f_{Beta}(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad \text{und} \quad \alpha, \beta > 0,$$

wobei

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)} = \int_0^1 y^{\alpha-1} (1-y)^{\beta-1} dy$$

die Betafunktion bezeichnet.

Durch Bilden der ersten Ableitung ist nachzurechnen, dass die Dichte der Beta-Verteilung sein Extremum<sup>259</sup> an der Stelle

$$x_e = \frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2}$$

annimmt. Unter Verwendung der Betafunktion lassen sich auch entsprechend die Charakteristika einer mit den Parametern  $\alpha$  und  $\beta$  beta-verteilten Zufallsgröße  $X$  nachweisen. Es gilt für den

<sup>256</sup> Das  $k$ -te Moment  $m_k$  einer Zufallsgröße  $X$  ist gegeben durch den Erwartungswert der  $k$ -ten Potenz von  $X$ , d.h.

$$m_k = \mathbb{E} \left[ X^k \right].$$

Das erste Moment einer Zufallsgröße ist somit ihr Erwartungswert.

<sup>257</sup> Die zentralen Momente einer Zufallsgröße betrachten die Verteilung der Wahrscheinlichkeitsmassen um den Erwartungswert, d.h.

$$\mu_k = \mathbb{E} \left[ (X - \mathbb{E}X)^k \right].$$

Das zweite zentrale Moment ist die Varianz.

<sup>258</sup> Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, kurz Dichte genannt, lässt Häufigkeitsaussagen über das Eintreten von Ereignissen zu. Das Maximum einer Dichtefunktion beschreibt den wahrscheinlichsten Wert einer Verteilungsfunktion. Wenn die Dichte existiert, beschreibt sie die zugehörige Verteilungsfunktion eindeutig.

<sup>259</sup> Wenn es sich um ein Maximum handelt, so ist es der wahrscheinlichste Wert der Verteilung, wenn es sich um ein Minimum handelt, dann ist es der unwahrscheinlichste Wert.

Erwartungswert

$$\mathbb{E}X = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$

Die Varianz ist gegeben durch

$$\text{Var}(X) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta + 1)(\alpha + \beta)^2}.$$

Dementsprechend ergibt sich der Variationskoeffizient

$$\text{Var}K(X) = \frac{\sqrt{\text{Var}(X)}}{\mathbb{E}X} = \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{\alpha\sqrt{\alpha + \beta + 1}}.$$

Durch Ermittlung des dritten zentralen Momentes kann die Schiefe<sup>260</sup> durch

$$\nu(X) = \frac{\mu_3(X)}{\sigma^3(X)} = \frac{2(\beta - \alpha)\sqrt{\alpha + \beta + 1}}{(\alpha + \beta + 2)\sqrt{\alpha\beta}}$$

angegeben werden.

Wenn die Parameter der Betaverteilung die Eigenschaft

$$\beta < \alpha$$

erfüllen, so handelt es sich um eine linksschiefe Verteilung.

Die Schadenhöhe eines nuklearen Katastrophenfalls ist nicht auf das Intervall  $[0, 1]$  beschränkt. Deshalb wird die allgemeine Betaverteilung für das beliebige Intervall  $[a, b]$  betrachtet. Die Dichte dieser Verteilungsfunktion ist gegeben durch

$$f_{\text{Beta},[a,b]}(x) = \frac{1}{B(a, b, \alpha, \beta)}(x - a)^{\alpha-1}(b - x)^{\beta-1}, \quad a \leq x \leq b \text{ und } \alpha, \beta > 0,$$

wobei die allgemeine Betafunktion durch

$$B(a, b, \alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)}(b - a)^{\alpha+\beta-1} = \int_a^b (y - a)^{\alpha-1}(b - y)^{\beta-1} dy$$

dargestellt wird. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 6.2 die Dichte einer allgemeinen Betaverteilung auf dem Intervall  $[0; 5 \cdot 10^{12}]$ .

Der wahrscheinlichste Wert der allgemeinen Betaverteilung wird an der Stelle

$$x_e = \frac{(\alpha - 1)b - (\beta - 1)a}{\alpha + \beta - 2}$$

angenommen. Der Erwartungswert einer auf dem Intervall  $[a, b]$  betaverteilten Zufallsgröße  $X$  mit den Parametern  $\alpha > 0$  und  $\beta > 0$  ist gegeben durch

$$\mathbb{E}X = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}(b - a) + a. \quad (6.1)$$

<sup>260</sup> Die Schiefe gibt an, wie stark eine Verteilung nach recht ( $\nu(X) > 0$ ) oder nach links ( $\nu(X) < 0$ ) geneigt ist. In Abbildung 6.1 ist dementsprechend  $\nu(X) < 0$ .

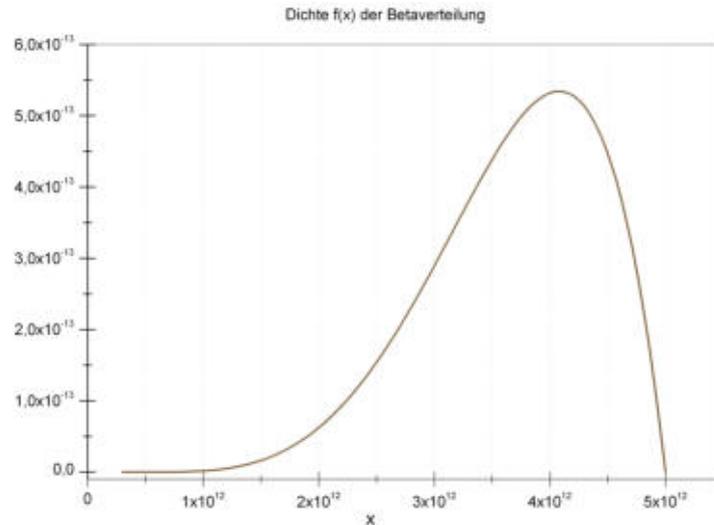


Abbildung 6.2: Graph der Dichte einer allgemeinen Betaverteilung (Quelle: Eigene Darstellung)

Durch Berechnung des zweiten Momentes kann die Varianz durch

$$\text{Var}(X) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta + 1)(\alpha + \beta)^2}(b - a)^2 \quad (6.2)$$

angegeben werden. Damit gilt für den Variationskoeffizienten

$$\text{Var}K(X) = \frac{\sqrt{\text{Var}(X)}}{\mathbb{E}X} = \frac{\sqrt{\alpha\beta}(b - a)}{(\alpha(b - a) + a(\alpha + \beta))\sqrt{\alpha + \beta + 1}}.$$

Wie bereits erwähnt kann die Betaverteilung eindeutig durch ihre Momente beschrieben werden. Deshalb kann unter der Kenntnis des Erwartungswertes und der Varianz die zugehörige allgemeine Betaverteilung ermittelt werden. Unter Verwendung der Gleichungen (6.1) und (6.2) lassen sich die Parameter der Betaverteilung, welche das Schadenausmaß eines nuklearen Katastrophenschadens beschreibt, bestimmen. Indem (6.1) nach  $\beta$  umgestellt und in (6.2) eingesetzt wird, ergeben sich die Gleichungen

$$\alpha = \frac{\mathbb{E}X - a}{b - a} \left( \frac{(b - \mathbb{E}X)(\mathbb{E}X - a)}{\text{Var}(X)} - 1 \right) \quad (6.3)$$

$$\beta = \frac{b - \mathbb{E}X}{b - a} \left( \frac{(b - \mathbb{E}X)(\mathbb{E}X - a)}{\text{Var}(X)} - 1 \right) \quad (6.4)$$

#### 6.1.4 Ermittlung des Maximalschadens und seiner Erwartung

Nachdem die Verteilungsfunktion  $F$  ermittelt wurde, soll im weiteren die Verteilungsfunktion des größten eingetretenen Extremschadens betrachtet werden. Dazu wird eine Stichprobe von Zufallsgrößen  $X_1, X_2, \dots, X_n$  erzeugt, welche unabhängig identisch nach  $F$  verteilte Extremschäden darstellen. Diese Extremschäden werden anschließend der Größe nach geordnet. Somit ergeben sich die Ordnungsstatistiken  $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$ , d.h.  $X_{(i)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , entspricht dem  $i$ -kleinsten

Wert der Stichprobe  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Also gilt

$$X_{(1)} = \min(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

und

$$X_{(n)} = \max(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (6.5)$$

Für die Verteilungsfunktionen  $F_{X_{(i)}}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , der Ordnungsstatistiken gilt bekanntlich<sup>261</sup>:

$$\begin{aligned} F_{X_{(i)}} = \mathbb{P}(X_{(i)} \leq x) &= \sum_{j=i}^n \binom{n}{j} [F(x)]^j [1 - F(x)]^{n-j} \\ &= \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} \int_0^{F(x)} t^{i-1} (1-t)^{n-i} dt. \end{aligned}$$

Der Erwartungswert ergibt sich somit als

$$\mathbb{E}X_{(i)} = \int_0^\infty \sum_{j=0}^{i-1} \binom{n}{j} [F(x)]^j [1 - F(x)]^{n-j} dx.$$

Wie bereits erwähnt, gilt (6.5) und aufgrund der Unabhängigkeit der Zufallsgrößen folgt wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben

$$F_{X_{(n)}} = \mathbb{P}(X_{(n)} \leq x) = \mathbb{P}(X_1 \leq x, X_2 \leq x, \dots, X_n \leq x) = F^n(x).$$

Mit wachsendem  $n$  wird der Erwartungswert des Maximalschadens nicht kleiner und die Varianz nicht größer. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 6.3 verschiedene  $n$ -te Potenzen am Beispiel einer allgemeinen Betaverteilung.

Wenn davon ausgegangen wird, dass  $F(x) < 1$  für alle  $x < \infty$  ist, dann gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F^n(x) = 0 \quad \text{für alle } x < \infty.$$

Im Folgenden findet die Extremwerttheorie aus Kapitel 6.1.2 Anwendung, insbesondere der Satz von Fisher-Tippett: „Die ‚standardisierte‘ Zufallsgröße  $\frac{X_{(n)} - \nu_n}{\varsigma_n}$  der Ordnungsstatistik  $X_{(n)}$  konvergiert für große  $n$  gegen eine Extremwertverteilung.“ Die Größen  $\nu_n$  sind Kandidaten<sup>262</sup> für den Extremschadenerwartungswert und bei den Größen  $\varsigma_n$  handelt es sich um Kandidaten für die Standardabweichung bzw. Streuung des Extremschadens.

Die Modellierung folgt der Tatsache, dass Höchstschäden bei einem nuklearen Katastrophenfall von KKW grundsätzlich mit sehr großen Werten und sehr kleinen Wahrscheinlichkeiten verbunden sind (Bewertung des Extremfalls im Lichte seines seltenen Auftretens).

Gemäß der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines nuklearen Katastrophenfalls wird für die Deckungssumme  $\nu_n + 3\varsigma_n$  (übliche Berücksichtigung von Zufallsschwankungen in Sachversicherungen) bzw.  $\nu_n + 6\varsigma_n$  (Berücksichtigung von Extremschäden) eine Risikoprämie bestimmt.<sup>263</sup> Aufgrund der

<sup>261</sup> Siehe hierzu [Büning/Trenkler 1994]

<sup>262</sup> Hierbei handelt es sich um Näherungen an die jeweiligen Größen, sogenannte Schätzer.

<sup>263</sup> Siehe hierzu Kapitel 3.1.3.

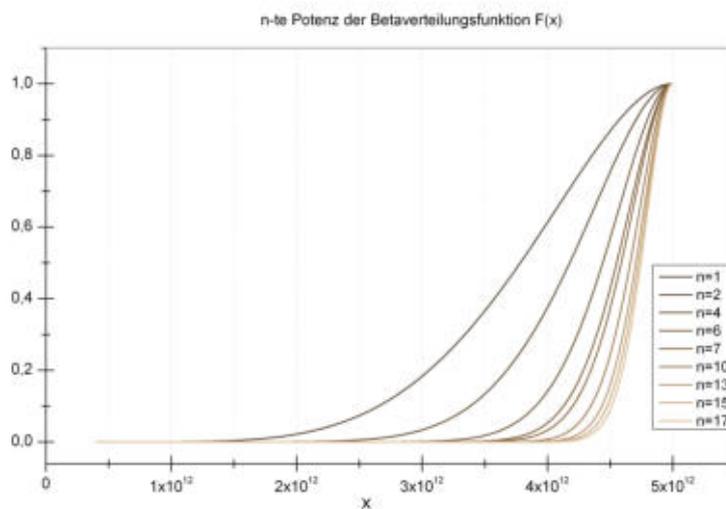


Abbildung 6.3: verschiedene  $n$ -te Potenzen der allgemeinen Betaverteilung (Quelle: Eigene Darstellung)

Extremeschadennatur wird  $\nu_n + 6\zeta_n$  gewählt. Dabei kann aus  $\nu_n$  die reine Risikoprämie und aus  $6\zeta_n$  der Sicherheitszuschlag ermittelt werden. Außerdem werden verschiedene Szenarien berücksichtigt, in denen bereits zu einem früheren Zeitpunkt 99,5 Prozent der Deckungssumme zur Verfügung stehen müssen und nicht erst am Ende der Laufzeit.

Es kann unter der Kenntnis der Extremwertverteilung, welche durch Kapitel 6.1.2 festgelegt ist und der Kenntnis der Maximalschadenhöhe, also der Ordnungsstatistik  $X_{(n)}$ , die Extremeschadenerwartung ermittelt werden.

Doch bevor die Extremeschadenerwartung bestimmt werden kann, muss der Maximalschaden eines nuklearen Katastrophenfalls simuliert werden. Bekanntlich werden die Stichprobe der unabhängig identisch nach  $F$  verteilten Extremeschadenhöhen  $X_1, \dots, X_n$  und die zugehörigen Ordnungsstatistiken betrachtet. Diese Ordnungsstatistiken sollen nun so in einer Matrix angeordnet werden, dass sie sowohl zeilenweise als auch spaltenweise monoton wachsen. Für genügend große  $n$  konvergiert der Maximalschaden somit gegen den Eintrag in der  $n$ -ten Zeile und der  $n$ -ten Spalte.

Dazu werden  $n$  verschiedene Stichproben der Länge  $n$  simuliert, d.h. es ergibt sich eine  $n \times n$ -Matrix von Zufallsgrößen für das Schadensmaß:

$$\begin{pmatrix} X_{1,1} & X_{2,1} & \dots & X_{n,1} \\ X_{1,2} & X_{2,2} & \dots & X_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{1,n} & X_{2,n} & \dots & X_{n,n} \end{pmatrix}.$$

Für  $i = 1, 2, \dots, n$  werden folgende Zufallsvektoren

$$X^{(i)} = \begin{pmatrix} \max_{j=1, \dots, i} X_{j,1} \\ \max_{j=1, \dots, i} X_{j,2} \\ \vdots \\ \max_{j=1, \dots, i} X_{j,n} \end{pmatrix}$$

eingeführt, d.h. der Vektor der Zeilenmaxima bis zur  $i$ -ten Spalte. Die zugehörigen „standardisierten“ Ordnungsstatistiken dieser Vektoren ergeben somit folgende Matrix

$$\begin{pmatrix} \frac{X_{(1)}^{(1)} - \nu_{1,1}}{\varsigma_{1,1}} & \frac{X_{(1)}^{(2)} - \nu_{2,1}}{\varsigma_{2,1}} & \cdots & \frac{X_{(1)}^{(n)} - \nu_{n,1}}{\varsigma_{n,1}} \\ \frac{X_{(2)}^{(1)} - \nu_{1,2}}{\varsigma_{1,2}} & \frac{X_{(2)}^{(2)} - \nu_{2,2}}{\varsigma_{2,2}} & \cdots & \frac{X_{(2)}^{(n)} - \nu_{n,2}}{\varsigma_{n,2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{X_{(n)}^{(1)} - \nu_{1,n}}{\varsigma_{1,n}} & \frac{X_{(n)}^{(2)} - \nu_{2,n}}{\varsigma_{2,n}} & \cdots & \frac{X_{(n)}^{(n)} - \nu_{n,n}}{\varsigma_{n,n}} \end{pmatrix}.$$

Die Ordnungsstatistiken  $X_{(j)}^{(i)}$ ,  $i = 1, \dots, n$  und  $j = 1, \dots, n$ , sind sowohl zeilenweise als auch spaltenweise monoton wachsend, d.h. der Maximalschaden wird durch  $X_{(n)}^{(n)}$  dargestellt. Die Variablen  $\nu_{n,n}$  und  $\varsigma_{n,n}$  sind somit Kandidaten für die Extremschadenerwartung und für die Streuung des Extremschadens.

### 6.1.5 Mathematische Grundlagen für die Kalkulation einer Versicherungsprämie

Im vorangegangenen Kapitel wurde erläutert wie die Extremschadenerwartung  $\nu_{n,n}$  und die Streuung des Extremschadens  $\varsigma_{n,n}$  ermittelt wird. Gemäß der bereits erwähnten Berücksichtigung von Extremschäden ergibt sich die Deckungssumme als  $\nu_{n,n} + 6\varsigma_{n,n}$ . Dies ist der erwartete Leistungsbarwert einer Haftpflichtversicherung für den nuklearen Katastrophenfall eines KKW. Somit ist das zugrundeliegende Risiko entsprechend quantifiziert.

Die zur Risikoübernahme erforderlichen Mittel müssen im wesentlichen durch die Gesamtheit der Entgelte aufgebracht werden, d.h. sie müssen durch die Versicherungsprämie abgedeckt werden.<sup>264</sup> Mittels des versicherungsmathematischen Äquivalenzprinzips<sup>265</sup> wird dieser Sachverhalt berücksichtigt. Auf Basis des Äquivalenzprinzips wird die (Netto-)Risikoprämie<sup>266</sup> berechnet. Dabei wird ein Rechnungszins in Höhe von 2 Prozent zugrunde gelegt. Der Rechnungszins wurde in dieser Höhe gewählt, weil aktuell der Höchstrechnungszins in der Lebensversicherung bei 2,25 Prozent liegt und ab dem Jahr 2012 auf 1,75 Prozent gesenkt wird.

<sup>264</sup> Wie in Kapitel 3.1.1 erklärt.

<sup>265</sup> Im Folgenden kurz als Äquivalenzprinzip bezeichnet

<sup>266</sup> Diese wurde in Kapitel 3.1.3 definiert und wird im Folgenden kurz mit Risikoprämie bezeichnet.

Gemäß dem Äquivalenzprinzip entspricht der erwartete Leistungsbarwert dem erwarteten Prämienbarwert,<sup>267</sup> d.h.

$$\text{erwarteter Leistungsbarwert} = \text{erwarteter Prämienbarwert}.$$

Der Zeitraum, in der die Prämie geleistet werden soll, beeinflusst die Ausprägungen der jährlichen Risikoprämie. Wenn beispielsweise die Risikoprämie, welche über einen Zeitraum von 1.000 Jahren geleistet werden soll, mit einer Risikoprämie verglichen wird, die gewährleistet, dass bereits 99,5 Prozent der Deckungssumme innerhalb der nächsten 30 Jahre angespart wird, dann ist aufgrund des Zinseszinseseffektes die erste Risikoprämie geringer<sup>268</sup>. Dies würde jedoch auch bedeuten, dass der Schaden erst nach Ablauf der 1.000 Jahre beglichen werden kann, auch wenn ein nuklearer Katastrophenfall bereits in 20 Jahren stattfindet. Außerdem ist der KKW-Inhaber und auch die fortlaufenden Generationen des KKW-Inhabers verpflichtet die Risikoprämie weiterhin bis zum Ende der Laufzeit zu bezahlen, auch wenn das KKW nicht über die gesamte Laufzeit in Betrieb ist.

Deshalb werden verschiedene Szenarien berücksichtigt, die sich mit der Systematik der Laufzeit und der Verfügbarkeit der Deckungssumme befassen.

## 6.2 Anwendung der Methodik

### 6.2.1 Schätzung der Verteilung der Schadenhöhen

Für die Quantifizierung des Risikos „nuklearer Katastrophenfall“ wurde auf verschiedene Studien für die Einschätzung der Schadenhöhen zurückgegriffen, die in Kapitel 4 näher betrachtet und in einer Übersicht der verwendeten Werte dargestellt wurden. Eine genaue Aufstellung der angenommenen einzelnen Schadenhöhen befindet sich im Anhang *B*.

Wo keine standortspezifischen Daten vorliegen, die eine individuelle Berechnung aller Schadenarten für jedes einzelne KKW in Deutschland ermöglichen, werden für alle Kraftwerke die gleichen Werte unterstellt. Liegen für einzelne Standorte detaillierte Werte vor, welche mittels einer bestimmten Methodik ermittelt wurden, so wird diese Methodik genutzt, um sie auf die anderen Standorte zu übertragen. So erlauben es beispielsweise die selbst erstellten Abschätzungen für Windrichtungsszenarien, die Auswirkungen auf die Anzahl der von Umsiedlungsmaßnahmen betroffenen Bevölkerung haben, eine nach Standort differenzierte Schadenhöhe anzugeben.

In der Regel handelt sich bei allen Daten, die die Schadenhöhen betreffen, um Schätzungen des mittleren Ausmaßes. Seltene Ereignisse von besonders hohem Ausmaß gehen schon mit ihrer kleinen Wahrscheinlichkeit in diesen Erwartungswert ein. Aus diesen Werten ist noch keine seriöse

<sup>267</sup> Siehe hierzu [Adelmeyer/Warmuth 2003] S. 27 ff.

<sup>268</sup> Auch ohne Zinsen wäre die erste Risikoprämie geringer, da die Deckungssumme konstant bleibt und im zweiten Fall auf einen geringeren Zeitraum aufgeteilt werden kann.

Orientierung auf einen Maximalschaden möglich, es wird also auch an dieser Stelle konservativ, und nicht überschätzend vorgegangen.

Die Modellierung von unterschiedlichen Verteilungsfunktionen aus jeweils einem Wert, der zudem von KKW zu KKW nicht sehr unterschiedlich ausfällt, hätte über die dann notwendigen Annahmen über die Streuung bei jedem KKW zu einer generellen Vergrößerung der Streuung der weiteren zu schätzenden Größen geführt. Der Erwartungswert der Verteilung des Maximums wäre davon nicht betroffen. Auf die Wahl eines Kandidaten für den Erwartungswert des Extremschadens nach 6.1.4 würde sich diese Vorgehensweise jedoch erhöhend auswirken.

Mit der Modellierung einer für alle KKW einheitlichen Verteilungsfunktion für die Schäden wird eine konservative Herangehensweise gewählt, welche nicht „unnötig“ zur Erhöhung des Erwartungswertes als auch der Streuung (damit dann auch des Sicherheitszuschlages) beiträgt.

Im ersten Schritt werden die berechneten Ergebnisse aus Kapitel 4 genutzt, gewichtete Schadenssummen für jedes KKW abzuleiten. Hierfür werden die durch Auswertung aller Ergebnisse der untersuchten Studien für alle KKW gewonnenen Werte<sup>269</sup> je Schadenart addiert. Bei allen Schadenarten außer den Kosten für Umsiedlung wird den jeweils höchsten Werten die Hälfte des Gesamtgewichtes zugemessen, die anderen Werte bekommen innerhalb der verbleibenden 50 Prozent das jeweils gleiche Gewicht. Diese Gewichtungen wurden vorgenommen, um dem Charakter einer Prämie für ein Maximalschadenereignis gerecht zu werden.

Für die Schadenart tödliche Krebserkrankungen liegen beispielsweise 20 Schadenhöhen vor. Der höchste Wert geht mit 50 Prozent in die Schadenssummenermittlung ein. Die verbleibenden 50 Prozent werden gleichmäßig unter den restlichen 19 Werten aufgeteilt. Die Berechnung erfolgt somit nach folgender Vorgehensweise:

$$\frac{1}{2} \times 7.508,12 \text{ Mrd. Euro} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{19} \times 80,6 \text{ Mrd. Euro} + \dots + \frac{1}{19} \times 5.040 \text{ Mrd. Euro} \right)$$

Bei den Umsiedlungskosten werden die Werte der eigenen Berechnungen verschiedener Windrichtungsszenarien mit 50 Prozent und alle anderen Werte gleich gewichtet, um den Einfluss großer Ausbreitungen von Radioaktivität stärker zu berücksichtigen. Kosten für Konsumverbote von Nahrungsmitteln und für Evakuierung und Umsiedlung wurden jeweils voll berücksichtigt. Die gewichteten Schadenssummen je KKW sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Der angenommene erwartete Schaden als Erwartungswert der Ergebnisse für alle 17 Kernkraftwerke beträgt 5,756 Billionen Euro. Die Streuung als Wert dafür, wie weit die Ergebnisse der Zufallsvariable durchschnittlich vom Erwartungswert entfernt sind, beträgt aufgrund der überwiegend standortunspezifischen Daten der ausgewerteten Studien lediglich 60,7 Milliarden Euro. Die Darstellung der Schadenssummen<sup>270</sup>

<sup>269</sup> Siehe Abbildungen B.3 und B.4 im Anhang B

<sup>270</sup> Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die auf den Euro genau ausgewiesenen Beträge eine Genauigkeit suggerieren, die seriöserweise so nicht haltbar ist. Tatsächlich werden hier die Ergebnisse so ausgewiesen, wie sie unter Berücksichtigung aller Annahmen rechnerisch zustande kommen.

erfolgt in Abbildung 6.4.

KKW	Gewichtete Schadenssumme in Euro	Mittelwert in Euro	Streuung in Euro
Biblis A	5.765.028.543.594	5.756.466.403.899	60.718.280.095
Biblis B	5.765.028.543.594		
Brokdorf	5.608.337.868.136		
Brunsbuettel	5.699.096.453.230		
Emsland	5.755.911.013.272		
Grafenheinfeld	5.777.925.424.626		
Grohnde	5.908.407.122.808		
Gundremmingen B	5.724.878.931.293		
Gundremmingen C	5.724.878.931.293		
Isar 1	5.756.577.040.625		
Isar 2	5.756.577.040.625		
Kruemmel	5.698.184.067.681		
Neckarwestheim 1	5.798.633.202.876		
Neckarwestheim 2	5.798.633.202.876		
Philippsburg 1	5.768.232.334.353		
Philippsburg 2	5.768.232.334.353		
Unterweser	5.785.366.811.054		

Abbildung 6.4: Darstellung der Schadenssummen, des Erwartungswertes und der Streuung (Quelle: Eigene Darstellung)

Im Folgenden wird die Verteilungsfunktion der Schadenhöhen gemäß dem Modell aus Kapitel 6.1.3 ermittelt. Die Verteilungsfunktion ist durch vier Parameter bestimmt, den Lageparameter, den Formparameter, die minimale Schadenhöhe und die maximale Schadenhöhe.

Da ein nuklearer Katastrophenfall stets mit hohen Kosten verbunden ist, kann als Untergrenze für die Schadenhöhe nicht Null angenommen werden. Für die untere Intervallgrenze wird daher eine Berechnung der kleinsten Schadenssumme vorgenommen, die sich aus den minimalsten Annahmen für das Schadenausmaß ableitet und wie folgt berechnet wird:

#### *Tödliche Krebserkrankungen*

$$\begin{array}{rcl}
 & & 291.200 \text{ Personen-Sievert} \\
 \times & & 5 \text{ Prozent pro Sievert für tödliche Krebserkrankungen} \\
 \times & & 7 \text{ Faktor für die Bevölkerungsdichte} \\
 \times & & 790.446,85 \text{ Euro je Fall} \\
 = & & 80,6 \text{ Mrd. Euro}
 \end{array}$$

*Nicht-tödliche Krebserkrankungen*

	291.200 Personen-Sievert
×	12 Prozent pro Sievert für tödliche Krebserkrankungen
×	7 Faktor für die Bevölkerungsdichte
×	305.125,10 Euro je Fall
=	74,6 Mrd. Euro

*Genetische Schäden*

	291.200 Personen-Sievert
×	1 Prozent pro Sievert für tödliche Krebserkrankungen
×	7 Faktor für die Bevölkerungsdichte
×	53.538,64 Euro je Fall
=	1,09 Mrd. Euro

*Ausfälle des BIP durch Umsiedlung*

Geringster Wert bei 80 km<sup>2</sup> Umsiedlungsfläche = 2,68 Mrd. Euro

*Konsumverbote von Nahrungsmitteln*

Wert der ExternE-Studie aus dem Jahr 1995 = 37,9 Mrd. Euro

*Kosten für Evakuierung und Umsiedlung*

Wert der ExternE-Studie aus dem Jahr 1995 = 2,1 Mrd. Euro

Insgesamt ergeben sich als kleinste Schadenssumme 198,97 Mrd. Euro. Da dieser Wert bereits einen Erwartungswert darstellt, können in diesem Fall auch Abweichungen nach unten entstehen. Da in den zugrunde liegenden Studien keine Aussagen bezüglich der Streuungen dieser Werte getroffen wurden, ist eine Abrundung dieses Wertes aus konservativen Gesichtspunkten auf 150 Mrd. Euro angemessen, um einen tatsächlichen Wert eines Mindestschadens als Untergrenze des Intervalls zu erhalten.

Als Obergrenze wird die Summe aus dem Erwartungswert in Höhe von 5,756 Billionen Euro und dem Zehnfachen der Streuung der Werte, welche mit rund 60,7 Mrd. angegeben ist, verwendet. Dieser Zuschlag auf den Erwartungswert soll die Obergrenze möglicher Schwankungen des Maximumschadens abbilden; die Höhe beträgt 6.363 Mrd. Euro.

Zur Bestimmung des Lageparameters und des Formparameters werden der Erwartungswert der

Schäden und die Streuung<sup>271</sup> in die Gleichungen (6.3) und (6.4) eingesetzt. Es ergibt sich

$$\alpha = 832$$

$$\beta = 90.$$

Somit ergibt sich eine Verteilung mit folgender Dichte:

$$f_{Schaden}(x) = \frac{1}{B_{Schaden}} (x - 150 \text{ Mrd.})^{832-1} (6.363 \text{ Mrd.} - x)^{90-1}, \quad (6.6)$$

wobei  $150 \text{ Mrd.} \leq x \leq 6.363 \text{ Mrd.}$  gilt und  $B_{Schaden}$  gegeben ist durch

$$B_{Schaden} = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)} (\text{Obergrenze} - \text{Untergrenze})^{\alpha+\beta-1}.$$

Weder die Modellierung als allgemeine Beta-Verteilung noch die Wahl der Unter- und Obergrenze haben einen Einfluss auf den Erwartungswert des Maximalschadens und auf seine Varianz gemäß Kapitel 6.2.2.

## 6.2.2 Schätzung des erwarteten Maximalschadens und seiner Streuung

Die einheitliche allgemeine Betaverteilung aus 6.2.1 wird für alle 17 KKW angesetzt. Unter konservativer Vorgehensweise werden die Schäden der 17 KKW als unabhängig angesehen. Gemäß der in (6.6) hergeleiteten Verteilung werden die Schäden für die 17 KKW als Zufallszahlen erzeugt und der Größe nach geordnet. Diese geordneten Zufallszahlen werden „standardisiert“, wie in Kapitel 6.1.4 auf Seite 89 beschrieben. Diese „standardisierten“ Zufallsgrößen konvergieren gegen eine Extremwertverteilung, wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben. Ausgehend von dieser Grenzverteilung wird ein Maximalschaden simuliert. Durch betragsmäßige Minimierung des Erwartungswertes der standardisierten Zufallszahlen werden sogenannte Kandidaten, also Näherungen an die jeweiligen Größen, für den erwarteten Maximalschaden  $\nu_{n,n}$  und seine Streuung  $\varsigma_{n,n}$  ermittelt. Der Maximalschaden bleibt bei wachsendem  $n$  entweder gleich oder wächst, er sinkt jedoch nie und je mehr Werte hinzu kommen, desto geringer wird die Streuung des Maximalschadens. Damit wird der Erwartungswert des Maximalschadens mit wachsender Anzahl der einbezogenen KKW nicht kleiner. Die Kandidatenbestimmung erfolgt immer im Paar. Bei der Wahl der Kandidaten wird darauf geachtet, dass der Kandidat für den Erwartungswert des Maximalschadens möglichst klein bleibt. Dass der Kandidat für die Varianz des Maximalschadens dennoch recht klein bleibt, liegt an der recht schmalen Verteilungsform der einheitlichen Schadenhöhenverteilung.

Die Werte dafür sind der Abbildung 6.5 zu entnehmen. Das Risiko eines nuklearen Katastrophenfalls ist somit durch einen Erwartungswert in der Höhe (Nettorisiko) quantifiziert und es kann über die Varianz auch ein Sicherheitszuschlag erfolgen. Die Deckungssumme (Bruttorisiko=Nettorisiko+Sicherheitszuschlag), die für einen nuklearen Katastrophenfall bereitgestellt werden muss, beträgt demnach 6,09 Billionen Euro.

<sup>271</sup> Varianz  $\text{Var}(X) = \text{Streuung}^2$

Schaetzung	Werte in Euro
Erwarteter Maximalschaden ( $v_{n,n}$ )	5.900.000.000.000,00
Varianz ( $\zeta_{n,n}$ ) <sup>2</sup>	(31.666.666.667,00) <sup>2</sup>
6*Standardabweichung (6* $\zeta_{n,n}$ )	190.000.000.000,00
Deckungssumme ( $v_{n,n}+6*\zeta_{n,n}$ )	6.090.000.000.000,00

Abbildung 6.5: Kandidaten für den erwarteten Maximalschaden und seine Streuung (Quelle: Eigene Darstellung)

### 6.2.3 Prämienszenarien

Diese Deckungssumme wurde unter der Annahme verschiedener Bereitstellungsszenarien mittels des versicherungstechnischen Äquivalenzprinzips<sup>272</sup> in eine Jahresprämie für jedes KKW umgerechnet. Dabei wurde ein Rechnungszins von zwei Prozent zugrunde gelegt, wobei die Anrechnung der Zinsen jeweils nachschüssig (am Ende eines Jahres) erfolgt. Aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls wird von einer langen Laufzeit der Haftpflichtversicherung ausgegangen.

Je nach erwartetem Eintritt eines nuklearen Katastrophenfalls ergeben sich somit unterschiedliche Prämienhöhen. Für das Szenario eines Terroraktes, für das eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 1:1.000 geschätzt wurde, muss unter der Voraussetzung, dass die Deckungssumme erst am Ende des Kalkulationszeitraumes von 1000 Jahren zur Verfügung gestellt werden muss, eine Jahresprämie von 305,83 Euro pro KKW und Jahr gezahlt werden, um das Risiko abzudecken. Für Ereignisse, die seltener als ungefähr einmal in 1.500 Jahren auftreten, beträgt die Jahresprämie pro KKW aufgrund des Zinseszinses nur noch einen Cent und weniger. Die folgende Tabelle zeigt die Prämienhöhe pro Jahr und KKW unter Angabe der zugrunde liegenden Eintrittswahrscheinlichkeiten bei Bereitstellung der Deckungssumme am Ende des Kalkulationszeitraums.

Dies ist jedoch keine risikoadäquate Bewertung des nuklearen Katastrophenfalls. Wird die Risiko- prämie nach diesem Verfahren ermittelt, so könnten die Schäden eines nuklearen Katastrophenfalls auch erst am Ende des Kalkulationszeitraumes beglichen werden. Basierend auf den in Kapitel 5.1 betrachteten Werten sind auch Laufzeiten von bis zu 10 Millionen Jahren denkbar. Da das Ereignis beliebig innerhalb dieser Zeitspanne auftreten kann, ist ein Eintreten am ersten Tag genauso wahrscheinlich wie ein Eintritt am Ende dieser 1.000 oder auch 10 Millionen Jahre. Bei einer Ansparphase, die sich über solch große Zeiträume erstreckt, könnten Schäden aufgrund eines nuklearen Katastrophenfalls, die zu Beginn dieser Periode auftreten, nicht beglichen werden. Es muss ebenfalls klargestellt werden, dass bei einer Prämienverteilung auf den gesamten Kalkulationszeitraum die Prämienzahlung auch über eben diesen Zeitraum gewährleistet sein muss, auch wenn die Laufzeiten der heutigen Kernkraftwerke meist 60 Jahre nicht überschreiten.

<sup>272</sup> Siehe hierzu Kapitel 6.1.5

Herkunft der Schätzung	Eintrittswahrscheinlichkeit je Reaktorbetriebsjahr	Praemienhoehe pro Jahr und KKW
Szenario eines Terroraktes	1:1.000	305,83 €
Externalities of Energy (ExternE) Vol. 5	1:100.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x2)	1:50.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x6)	1:16.666	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x10)	1:10.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x18)	1:5.555	33,95 €
Szenario eines Computervirus (x1,1) Szenario menschlichen Versagens (x1,1)	1:90.909	kleiner 0,01 €
Szenario eines Computervirus (x1,5)	1:66.666	kleiner 0,01 €
DRS Phase B ohne Accident Management	1:33.333	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x2)	1:16.666	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x6)	1:5.555	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x10)	1:3.333	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x18)	1:1.850	kleiner 0,01 €
Szenario eines Computervirus (x1,1) Szenario menschlichen Versagens (x1,1)	1:30.300	kleiner 0,01 €
Szenario eines Computervirus (x1,5)	1:22.222	kleiner 0,01 €
DRS Phase B mit Accident Management	1:280.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x2)	1:140.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x6)	1:46.666	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x10)	1:28.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x18)	1:15.555	kleiner 0,01 €
Szenario eines Computervirus (x1,1) Szenario menschlichen Versagens (x1,1)	1:254.545	kleiner 0,01 €
Szenario eines Computervirus (x1,5)	1:186.666	kleiner 0,01 €
Methodenkonvention des Umweltbundesamtes	1:10.000.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x2)	1:5.000.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x6)	1:1.666.666	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x10)	1:1.000.000	kleiner 0,01 €
Szenario Alterung (x18)	1:555.555	kleiner 0,01 €
Szenario eines Computervirus (x1,1) Szenario menschlichen Versagens (x1,1)	1:9.090.909	kleiner 0,01 €
Szenario eines Computervirus (x1,5)	1:6.666.666	kleiner 0,01 €

Abbildung 6.6: Darstellung der je KKW und Jahr zu zahlenden Prämienhöhen bei Bereitstellung der Deckungssumme am Ende des Kalkulationszeitraums (Quelle: Eigene Darstellung)

Deshalb sind Szenarien zu betrachten, bei denen die Deckungssumme bereits vor dem Ende des Kalkulationszeitraums bereitgestellt werden muss. Diese Szenarien sind somit in der Ansparphase unabhängig von der Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls, da die Bereitstellung der benötigten Mittel wesentlich eher erfolgen muss. Da nun sehr viel kürzere Anlagezeiträume („Bereitstellungszeiträume“) zum Aufbau der Deckungssumme angenommen werden, wirkt sich dies auch entsprechend auf die Höhe der Risikoprämie aus. So muss bspw. für jedes betriebene KKW eine jährliche Prämie von 19,5 Milliarden Euro über den gesamten Zeitraum hinweg bezahlt werden, wenn die Deckungssumme bereits nach 100 Jahren zur Verfügung stehen soll.

Bereitstellungszeiträume	Jahresprämie je KKW
Bereitstellung in 500 Jahren	6.103.559,32 €
Bereitstellung in 100 Jahren	19.504.708.144,15 €
Bereitstellung in 90 Jahren	24.640.242.714,04 €
Bereitstellung in 80 Jahren	31.428.696.231,34 €
Bereitstellung in 70 Jahren	40.605.979.598,00 €
Bereitstellung in 60 Jahren	53.396.911.879,16 €
Bereitstellung in 50 Jahren	72.003.347.095,51 €
Bereitstellung in 40 Jahren	100.824.504.085,85 €
Bereitstellung in 30 Jahren	150.118.026.766,82 €
Bereitstellung in 20 Jahren	250.644.413.383,02 €
Bereitstellung in 10 Jahren	556.178.554.699,78 €

Abbildung 6.7: Jahresprämien in Abhängigkeit der verschiedenen Zeiträume für die Bereitstellung der gesamten Deckungssumme (Quelle: Eigene Darstellung)

Die bisher getroffenen Annahmen gehen davon aus, dass jedes in Deutschland betriebene KKW durch eine separate Versicherungsgesellschaft versichert wird, so dass kein Ausgleich im Kollektiv erfolgt. Wird eine tatsächliche Versicherung von Haftpflichtrisiken, die aus dem Betrieb von KKW resultieren, angenommen, so würde dies eher über einen Versicherungs-Pool erfolgen, welcher mehrere oder alle in Deutschland ansässigen KKW<sup>273</sup> versichert. Da die Zeiträume zur Bereitstellung der Deckungssumme im Vergleich zur gesamten Spanne der möglichen Eintrittswahrscheinlichkeiten sehr kurz sind, kann unter Annahme vollständiger Unabhängigkeit der Schadenereignisse davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt von zwei oder mehr nuklearen Katastrophenereignissen in diesem Zeitraum äußerst gering ist. Mit steigender Anzahl der KKW im Versicherungs-Pool steigt jedoch aufgrund der Unabhängigkeit der Schadenereignisse auch die Eintrittswahrscheinlichkeit eines nuklearen Katastrophenfalls. Folgendes Beispiel soll diesen Sachverhalt verdeutlichen. In der vorliegenden Studie wird für das Szenario eines Terroraktes von einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 1:1.000 pro Reaktorbetriebsjahre ausgegangen. Angenommen ein

<sup>273</sup> Prinzipiell ist denkbar, dass ein spezialisierter Versicherer noch weitere als die in Deutschland ansässigen KKW versichert. Dies kann insbesondere auch unter Zuhilfenahme des Prinzips der „Atomisierung“, d.h. Aufteilung der Risiken über Rückversicherungslösungen oder über Kapitalmarktinstrumente geschehen.

Spezialversicherer versichert alle 17 KKW in Deutschland in einem Portfolio. Dann erhöht sich bei Versicherung von 17 Reaktoren die Eintrittswahrscheinlichkeit auf 17:1.000, d.h. alle 58,824 Jahre ist mit einem Eintreten dieses Falles für das Kollektiv zu rechnen. In der Folge sind Bereitstellungszeiträume von 59 Jahren und länger für diesen Fall nicht mehr risikoadäquat. Der Bereitstellungszeitraum muss also immer kürzer gewählt werden als die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versicherungsfalles im Kollektiv. Unter Berücksichtigung dieser Beschränkung würde eine Versicherung von zwei oder mehr KKW daher nicht zu einer Vervielfachung der gesamten zu zahlenden Jahresprämie führen. Im günstigsten Fall wäre für alle im Pool versicherten KKW nur die einfache jährliche Prämie zu zahlen. Ausnahmen gelten lediglich, wenn angenommen wird, dass für Standorte mit mehreren Reaktoren ein erhöhtes Risiko für Schadenereignisse an allen Reaktoren gleichzeitig besteht. Dies könnte für den Fall eines Erdbebens, von Überschwemmungen oder parallel durchgeführten Terroranschlägen möglich sein. Bei separater Versicherung der Reaktoren bei unterschiedlichen Versicherungsgesellschaften würde sich keine Änderung ergeben, da in diesem Fall für jeden Reaktor eine eigene Deckungssumme aufgebaut wird. Erst bei der Bildung eines Pools, in dem ein oder mehrere Standorte mit zwei Reaktoren versichert wären, müsste dieses Kumulrisiko berücksichtigt werden. Innerhalb des Pools wären dann für Standorte mit zwei Reaktoren Prämien zu zahlen, die zwischen dem einfachen und dem doppelten der Prämie je Reaktor liegen würde. Ein linearer Verlauf von Prämienhöhe und Anzahl der Reaktoren an einem Standort muss auf Grund der Tatsache, dass im Schadenfall gleiche Wetterbedingungen für beide Reaktoren eines Standortes vorherrschen, nicht angenommen werden. Diese Szenarien werden aber im Folgenden nicht explizit berücksichtigt, da einerseits voraussichtlich die Anzahl der Standorte mit zwei betriebenen Reaktoren im Anschluss an das Atom-Moratorium der Bundesregierung reduziert wird und andererseits diese Annahmen von der Spannbreite der Prämien für separate Versicherung und vollständiger Poolbildung abgedeckt werden. Für die folgenden Berechnungen werden daher diese unterschiedlichen Szenarien betrachtet.

#### *Szenario 1a*

Alle 17 vor dem Atom-Moratorium vom März 2011 betriebenen KKW werden bei jeweils separaten Versicherungsgesellschaften versichert. Somit wird die volle Deckungssumme für jedes einzelne KKW angespart, was einer Gesamtsumme von 103,53 Billionen Euro entspricht.

#### *Szenario 1b*

Es werden nur noch die neun zum Stand 31. März 2011 laufenden KKW weiterbetrieben und bei jeweils separaten Versicherungsgesellschaften versichert.

#### *Szenario 2*

Es gibt in Deutschland vier Energieunternehmen, die KKW betreiben. Jedes Unternehmen versichert seine KKW bei einem Pool, so dass insgesamt vier Pools die Versicherung der KKW

übernehmen. Für diesen Fall wird angenommen, dass die Anzahl der KKW in den einzelnen Pools irrelevant ist, da die Prämienzahlung je Pool erfolgt.

### *Szenario 3*

Alle in Deutschland betriebenen KKW werden von einem Pool versichert. Die genaue Anzahl ist hier ebenso wie in Szenario 2 irrelevant.

Unter der Annahme, dass eine Umlage der durch die Inhaber zu zahlenden Risikoprämien für eine unbegrenzte Deckung der Haftpflichtrisiken auf den Strompreis erfolgt, ergeben sich auf Grundlage der gesamten im Jahr 2010 durch inländische KKW erzeugten Strommenge von 140,5 Mrd. kWh<sup>274</sup> für den Bereitstellungszeitraum von 100 Jahren folgende Preise je kWh in Euro:

$$\begin{aligned} \text{Szenario 1a:} \quad & 19,5 \text{ Mrd. Euro} \times 17 \text{ KKW} = 331,5 \text{ Mrd. Euro} \\ & 331,5 \text{ Mrd. Euro} / 140,5 \text{ Mrd. kWh} = 2,36 \text{ Euro/kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Szenario 1b:} \quad & 19,5 \text{ Mrd. Euro} \times 9 \text{ KKW} = 175,5 \text{ Mrd. Euro} \\ & 175,5 \text{ Mrd. Euro} / 140,5 \text{ Mrd. kWh} = 1,25 \text{ Euro/kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Szenario 2:} \quad & 19,5 \text{ Mrd. Euro} \times 4 \text{ Energieunternehmen} = 78 \text{ Mrd. Euro} \\ & 78 \text{ Mrd. Euro} / 140,5 \text{ Mrd. kWh} = 0,56 \text{ Euro/kWh} \end{aligned}$$

$$\text{Szenario 3:} \quad 19,5 \text{ Mrd. Euro} / 140,5 \text{ Mrd. kWh} = 0,14 \text{ Euro/kWh}$$

Die Preise für alle Bereitstellungszeiträume sind in Abbildung 6.8 auf Seite 100 dargestellt.

Aus der Übersicht der Kosten pro kWh für die einzelnen Szenarien wird deutlich, dass im Hinblick auf die Situation in Deutschland keine Möglichkeit besteht, eine vollumfängliche Deckung des Risikos, welches aus dem Betrieb von KKW resultiert, zu gewährleisten. Erst ab einer Ansparphase von 100 Jahren ist der Aufschlag auf den Strompreis bei vollständiger Poolbildung aller KKW-Risiken in einer Größenordnung angelangt, der auf den ersten Blick bezahlbar scheint. Allerdings müssten angesichts der verbleibenden Restlaufzeiten deutscher KKW und normaler Laufzeiten von 25 bis 40 Jahren wesentlich kürzere Laufzeiten der Ansparphase realisiert werden, um eine Bereitstellung der Mittel noch vor dem vollständigen Wagniswegfall in Form eines Ausstiegs aus der Kernenergie zu gewährleisten. Für dieses Szenario ist eine tatsächliche Finanzierbarkeit allerdings nicht gegeben. Hier wird die Problematik eines mit Inbetriebnahme sofort vorhandenen Risikos bei gleichzeitigem Fehlen einer genügend großen Deckungssumme, um Entschädigungen für Schäden leisten zu können, die sich aus einer Realisierung dieses Risikos ergeben können, besonders deutlich. Werden die unterschiedlichen Szenarien der Kollektivbildung betrachtet, ergibt sich eine Haftpflichtversicherungsprämie, welche die kWh in einer Spanne von rd. 0,14 Euro bis

<sup>274</sup> Siehe [BDEW 2011].

Szenario	Bereitstellungszeitraum	Preis je kWh in Euro
1a	500 Jahre	0,00074
1b		0,00039
2		0,00017
3		0,00004
1a	100 Jahre	2,36000
1b		1,24941
2		0,55529
3		0,13882
1a	50 Jahre	8,71215
1b		4,61231
2		2,04992
3		0,51248
1a	10 Jahre	67,29563
1b		35,62710
2		15,83426
3		3,95857

Abbildung 6.8: Darstellung der Netto-Aufschläge auf den Strompreis für Atomstrom unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien (Quelle: Eigene Darstellung)

67,3 Euro verteuern würde. Dieser Aufschlag auf den regulären Strompreis müsste über den gesamten Zeitraum des Aufbaus der Deckungssumme gezahlt werden. Die anschließend zu zahlende reine Risikoprämie wäre hauptsächlich von der angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeit, der verbleibenden Restlaufzeit sowie der Anzahl der im Pool befindlichen versicherten Risiken abhängig. Unter Berücksichtigung des Zinseffektes wären theoretisch erhebliche jährliche Mittelrückflüsse zu erwarten.

## Kapitel 7

# Interpretation der Ergebnisse und Fazit

Die im Rahmen dieser Studie berechnete Versicherungsprämie stellt lediglich eine fiktive Versicherungsprämie - gleichsam als Maßzahl für das gesamte Risiko eines nuklearen Katastrophenfalls - dar. Die insgesamt ermittelte risikoadäquate Haftpflichtversicherungsprämie entspricht der Deckungssumme aller einbezogenen (Teil-)Schäden im Falle eines nuklearen Katastrophenfalls. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass sowohl die erforderliche Deckungssumme i.H.v. 6,09 Billionen Euro, die aus einer Schätzung des erwarteten mittleren Maximalschadens und seiner Streuung resultiert, als auch die daraus erforderliche Versicherungsprämie für verschiedene angenommene Einzahlungszeiträume wesentlich höher sind, als die bisher gesetzlich geforderten finanziellen Mittel der KKW-Inhaber.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die Höhe der Prämie insbesondere von der Bereitstellungsdauer, also der Länge des Zeitraumes, in dem die Deckungssumme bereitgestellt wird, sowie von der Art der Kollektivbildung durch mögliche Pools bestimmt wird. Die Notwendigkeit einer relativ zeitnahen Bereitstellung ergibt sich aus dem Umstand, dass keine Institution im Schadenfall in der Lage wäre, eine Summe dieser Größenordnung als Entschädigung bereitzustellen. Eine Aufteilung der Versicherungsprämie über die gesamte Zeitspanne der vermuteten Eintrittswahrscheinlichkeiten wird auf Grund der bereits in Kapitel 6 diskutierten Aspekte der Praktikabilität verworfen. Die Prämienhöhe für verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Bereitstellungsdauern wird vor allem durch Zinseszinsseffekte dominiert. Je weiter der Zeitpunkt der Bereitstellung der vollständigen Deckungssumme in der Zukunft liegt, desto geringer wird die zu zahlende jährliche Prämie. Durch die exponentielle Verteilung steigen demgegenüber die Prämien sehr stark an, je kürzer dieser Zeitraum gewählt wird. Bei einem angenommenen Schaden innerhalb des Bereitstellungszeitraumes kann auch keine vorzeitige Entnahme der bis dahin angesammelten Deckungssumme erfolgen, da die volle Höhe dieser Summe auf Grund der Barwertberechnung nur erreicht wird, wenn diese bis zum Ende der berechneten Bereitstellungszeit bei laufender

---

Prämienzahlung verfügbar ist. Die Wahl eines zu langen Zeitraums für die Bereitstellung konterkariert somit die Absicht, möglichst schnell eine Absicherung möglicher Schäden zu gewährleisten. Daher werden Bereitstellungszeiträume, welche die verbleibenden Laufzeiten bestehender deutscher KKW übersteigen, als nicht zielführend angesehen.

Die Ergebnisse müssen dahingehend relativiert werden, dass aufgrund fehlender Ansätze quantitativer Schätzungen von Schäden manche Schadenarten nicht in die Berechnungen einbezogen werden konnten. Außerdem wurde für die Erstellung der vorliegenden Studie keine Neubewertung der einzelnen Schadenhöhen vorgenommen. Vielmehr wurde für die Einschätzung des erwarteten Schadenausmaßes größtenteils auf bereits bestehende Studien zurückgegriffen. Da allerdings nur veröffentlichte Arbeiten einbezogen wurden, könnten irrtümlicherweise wissenschaftliche Ergebnisse zu diesem Thema übereinstimmender erscheinen als sie tatsächlich sind. Im Extremfall könnten nicht existierende Unterschiede oder beobachtete Zusammenhänge nur durch Zufall beobachtet worden sein, während Untersuchungen, in denen nichts dergleichen beobachtet werden konnte, niemals veröffentlicht wurden. Gerade beim Thema Kernenergie ist auch in der Wissenschaft eine starke Polarisierung festzustellen. So ist erklärbar, dass die getroffenen Annahmen bzgl. der Schadenhöhen und der Eintrittswahrscheinlichkeiten in den untersuchten Studien große Abweichungen (Abweichungen auf der Makroebene<sup>275</sup>) enthalten. Da keine Wertung der vorliegenden Studien stattfand, wurde die gesamte Bandbreite der in den Studien getroffenen Annahmen berücksichtigt. Außerdem sei angemerkt, dass unabhängig von den getroffenen Annahmen bzgl. der Erwartungswerte auch Abweichungen auf der Mikroebene<sup>276</sup> auftreten können. So ist es möglich, dass in der Realität vereinzelt Schadenfälle auftreten, welche weit über dem angenommenen Erwartungswert liegen. Als Beispiel sei an dieser Stelle das Aussterben von Tierarten genannt.

Das Risiko eines nuklearen Katastrophenfalls ist ein Entwicklungsrisiko, d.h. es ändert sich im Zeitablauf. Fortschreitende Erkenntnisse von Wissenschaft und Technik oder Beobachtung der Hintergründe von tatsächlich eingetretenen Ereignissen (11. September 2001 in New York oder Erdbeben und Tsunami in Japan) und der damit einhergehenden Neubewertung der Risikosituation sind dabei als hauptsächliche Faktoren anzusehen. Diese Faktoren sollten zum Anlass genommen werden, regelmäßige politische und gesellschaftliche Debatten über den Umgang mit der geänderten Risikosituation zu führen. Die Verfügbarkeit von transparenten und realistischen Informationen zu diesen Risiken sowie über getroffene Entscheidungen über Maßnahmen der Risikosteuerung und -tragung ist dabei die Grundvoraussetzung. Im Bereich der Kernenergie erscheint zur Bereitstellung dieser Informationen dringend eine umfangreiche Untersuchung der Unfallwahrscheinlichkeiten und der möglichen Auswirkungen großer Unfälle für jedes einzelne Kraftwerk erforderlich zu sein, um zu tragfähigen Angaben zum Gesamtrisiko zu kommen. Dahingehend sollte eine Untersuchung der Zahlungsbereitschaft der deutschen Bevölkerung für die Vermeidung der mit der Kernenergie ver-

---

<sup>275</sup> Unter der Makroebene sind in diesem Fall Annahmen zu verstehen, welche sich direkt auf den Erwartungswert auswirken.

<sup>276</sup> Unter der Mikroebene sind in diesem Fall Abweichungen auf Einzelfallebene zu verstehen, welche sich stark vom Erwartungswert unterscheiden, aber durch ihre Unwahrscheinlichkeit keinen direkten Einfluss auf ihn haben.

bundenen Großrisiken durchgeführt werden.

Die in der vorliegenden Studie angesetzten Schadenhöhen bzw. Kosten einer Haftpflichtversicherung übersteigen die bislang durch die Inhaber der KKW vorzuhaltenden finanziellen Mittel um mehrere Größenordnungen. Bei Eintritt eines nuklearen Katastrophenfalls würden externe Effekte durch die Zerstörung der Umsysteme auftreten, die letztendlich die Allgemeinheit aufgrund der Umlage von Kosten zu tragen hätte. Dann wäre der durch Kernenergie erzeugte Strom, anders als bislang vielfach behauptet, nicht mehr als preisgünstig im Vergleich zu anderen Energiequellen anzusehen. Den hier vorliegenden Berechnungen zufolge würde - je nach Szenario hinsichtlich der Bereitstellungszeiträume von zehn bis 100 Jahren und der Anzahl versicherter KKW einzeln oder innerhalb eines Pools - der Preis für Strom aus Kernenergie netto um 0,139 Euro je kWh bis zu 67,3 Euro je kWh über den gesamten Zeitraum der Ansparphase steigen.

Praktisch sind nukleare Katastrophenfälle nicht versicherbar, was insbesondere in der Kombination aus

- fehlender Größe des (erforderlichen) Risikokollektivs,
- extremer Höhe des erwarteten Maximalschadens und
- schwer abschätzbarer Schadeneintrittswahrscheinlichkeit (aufgrund der angenommenen Seltenheit des Schadenereignisses)

begründet liegt. Gleichwohl könnten die hier vorgelegten Studienergebnisse als Anknüpfungspunkte für weiterführende Überlegungen gelten.

Als Versicherungsgeber käme beispielsweise eine staatliche Versicherungsgesellschaft in Form einer Anstalt oder Körperschaft des öffentlichen Rechts in Frage, die auch tatsächlich nach den hier vorgestellten Versicherungsprinzipien arbeiten müsste, um die bisherige letztendliche Kostentragung durch den Staat abzulösen.

Eine - im Rahmen dieser theoretischen Überlegungen - praktikablere Lösung wäre die Gründung eines privatwirtschaftlich organisierten Versicherers, etwa im Konstrukt einer sog. „Captive Company“. Hierbei würden die KKW-Inhaber ein firmeneigenes Versicherungsunternehmen gründen, das zur Absicherung der Haftpflichtrisiken aus dem Betrieb von KKW dienen würde. Für die KKW-Inhaber hätte dies den Vorteil, dass im Falle einer Nicht-Inanspruchnahme der aufzubauenden Deckungssumme das eingezahlte Kapital nach Entfall aller Risiken an die Eigentümer zurückfließen könnte. Die oben angesprochenen Problemstellungen der Nicht-Versicherbarkeit wären aber dadurch nicht gelöst; insbesondere ist der kurzfristige Aufbau einer Deckungssumme in dieser Größenordnung als unrealistisch anzusehen.

Eine weitere (hypothetische) Möglichkeit stellt die Nutzung der internationalen Kapitalmärkte

als Risikoträger dar. Hierbei wird durch die Ausgabe von Risikoanteilscheinen das benötigte Kapital von den Kapitalmärkten „eingesammelt“ und bei Nicht-Eintreten adäquat verzinst. Es erscheint allerdings ausgeschlossen, dass das Kapital in der benötigten Größenordnung eingesammelt werden kann. Selbst wenn dies gelänge, würde die von den Kapitalgebern geforderte, angemessene Verzinsung zu nicht finanzierbaren Kapitalverpflichtungen führen.

Grundsätzlich ist der Versicherungsgedanke getragen durch den sog. Risikoausgleich im Kollektiv und in der Zeit, d.h. eine Minderung des Zufallsrisikos bei wachsendem Bestand und die Betrachtung mehrerer einperiodischer Risikoausgleiche. Die Überlegungen, die im Rahmen dieser Studie angestellt wurden, bezogen sich auf den Kernenergiemarkt Deutschland, d.h. in die Modellbetrachtungen wurde das Risikokollektiv auf maximal 17 versicherungstechnische Einheiten festgesetzt. Ein größeres Kollektiv hätte den Vorteil, dass die Streuung der Gesamtschadenverteilung auf lange Sicht geringer würde und sich zudem mehr Unternehmen an der Bereitstellung der Deckungssumme beteiligen könnten. Denkbar wäre eine Lösung, welche Länder mit Kernenergienutzung in der EU oder Gesamteuropa oder gar weltweit einbezieht. Die unterschiedlichen Interessenlagen der einzelnen Nationen gälte es bei einem solchen Vorgehen zu berücksichtigen.

Die - auf Grundlage der Abschätzung der Kosten eines nuklearen Katastrophenfalls - berechnete Versicherungsprämie soll vielmehr einen Beitrag zur aktuellen Debatte über das „Restrisiko“ eines nuklearen Katastrophenfalls liefern und eine Abschätzung für die Höhe und Bereitstellung finanzieller Mittel für diesen Schadenfall geben. Damit versteht sich diese Prämie als Maßzahl, die in die Berechnung der gesamten externen Kosten des nuklearen Brennstoffkreislaufs unter dem Gesichtspunkt der Berücksichtigung unfallbedingter Kosten eingehen müsste. An verschiedenen Stellen der Studie wurde auf die in der Realität fehlende Versicherbarkeit bzw. Finanzierbarkeit hingewiesen. Damit stellt sich die Nutzung der Kernenergie und die damit verbundenen Risiken weniger als ökonomische Fragestellung denn als Frage der Bereitschaft von Gesellschaft und Volkswirtschaft dar, die im Rahmen der Studie quantifizierten Risiken zu tragen. Dies kann nur durch eine gesellschaftliche Diskussion beantwortet werden.

# Anhang A

## Zusätzliche Abbildungen Kapitel 1

Abbildung A.1 beschreibt die einzelnen INES-Stufen näher. In der Gesetzespyramide, welche durch Abbildung A.2 dargestellt wird, sind die regulatorischen Vorgaben für KKW aufgezeigt. Dabei ordnen sich diese nach ihrer Verbindlichkeit, beginnend mit den Gesetzen wie Grundgesetz und Atomgesetz mit allgemeiner Verbindlichkeit bis hin zu Betriebshandbüchern und technischen Spezifikationen, die durch die Industrie vorgegeben werden.

Stufe / Kurzbezeichnung	Aspekte		
	Erster Aspekt: Radiologische Auswirkungen ausserhalb der Anlage	Zweiter Aspekt: Radiologische Auswirkungen innerhalb der Anlage	Dritter Aspekt: Beeinträchtigung der Sicherheitsvorkehrungen
7 Katastrophaler Unfall	Schwerste Freisetzung: Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt in einem weiten Umfeld		
6 Schwerer Unfall	Erhebliche Freisetzung: voller Einsatz der Katastrophenschutzmassnahmen		
5 Ernster Unfall	Begrenzte Freisetzung: Einsatz einzelner Katastrophenschutzmassnahmen	Schwere Schädien am Reaktorkern / an den radiologischen Barrieren	
4 Unfall	Geringe Freisetzung: Strahlenexposition der Bevölkerung etwa in der Höhe der natürlichen Strahlenexposition	Begrenzte Schädien am Reaktorkern / an den radiologischen Barrieren  Strahlenexposition beim Personal mit Todesfolge	
3 Ernster Störfall	sehr geringe Freisetzung: Strahlenexposition der Bevölkerung in der Höhe eines Bruchteils der natürlichen Strahlenexposition	Schwere Kontaminationen  Akute Gesundheitsschädien beim Personal	Beinahe Unfall  Weitgehender Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
2 Störfall		Erhebliche Kontamination  Unzulaessig hohe Strahlenexposition beim Personal	Störfall  Begrenzter Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
1 Störung			Abweichungen von den zulaessigen Bereichen für den sicheren Betrieb der Anlage
0			Keine oder sehr geringe sicherheitstechnische Bedeutung

Abbildung A.1: Beschreibung der INES-Stufen (Eigene Darstellung, in Anlehnung an [IAEA a])

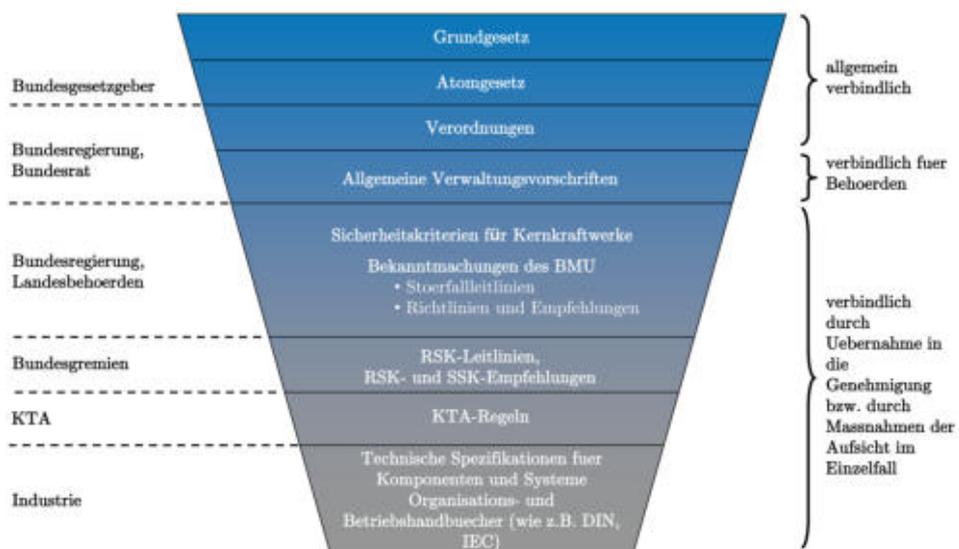


Abbildung A.2: Regelwerkspyramide: Hierarchie der nationalen Quellen, die Behörde oder Institution, die sie erlässt, sowie ihre Verbindlichkeit (Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [BMU 2009])

## Anhang B

# Zusätzliche Abbildungen Kapitel 4

Die folgende Abbildung zeigt die Windhäufigkeit je Hauptwindrichtung für die verschiedenen gewählten Standorte in Deutschland.

Standort KKW und Messstation	Isar 1&2 Muenchen-Flughafen FJS	Kruemmel Ahrensburg-Wulfsdorf	Brokdorf Brunsbuettel	Brunsbuettel Brunsbuettel	Emsland Lingen	Grafenheinfeld Bad Kissingen
Haeufigkeiten in %						
Windrichtung						
N	4,03	5,69	5,53	5,53	8,04	11,16
NO	10,58	7,52	7,11	7,11	8,04	26,18
O	22,17	8,13	16,21	16,21	10,72	4,29
SO	5,79	12,20	10,47	10,47	9,65	3,43
S	7,05	15,85	11,86	11,86	18,23	16,31
SW	19,14	16,06	18,38	18,38	23,06	27,90
W	24,69	21,95	17,39	17,39	11,80	6,87
NW	6,55	12,60	13,04	13,04	10,46	3,86

Standort KKW und Messstation	Groende Hameln	Gundremmingen D&C Ulm	Biblis A&B Lindenfels	Neckarwestheim 1&2 Stuttgart-Schnarrenberg	Philippsburg Karlsruhe	Unterweser Bremerhaven
Haeufigkeiten in %						
Windrichtung						
N	3,16	9,14	3,79	6,64	8,82	8,32
NO	5,00	11,60	17,89	8,71	20,96	7,92
O	24,21	7,73	18,97	9,13	10,29	13,07
SO	15,00	4,22	6,78	16,60	3,68	11,49
S	4,74	10,54	3,79	14,52	5,88	13,07
SW	8,68	29,00	20,05	11,62	37,87	19,21
W	21,05	11,60	22,76	16,60	8,82	15,64
NW	18,16	16,17	5,96	16,18	3,68	11,29

Abbildung B.1: Windhäufigkeit je Hauptwindrichtung (Eigene Berechnungen unter Verwendung der Windrosen des Deutschen Wetterdienstes)

In der Abbildung B.2 ist die Ermittlung der in Kapitel 4.3.6 aufgezeigten Schadenhöhen durch Umsiedlungsmaßnahmen in Folge eines nuklearen Katastrophenfalls dargestellt.

Wettersituation	Fläche fuer langfristige Umsiedlung ca. [km <sup>2</sup> ]	EW/km <sup>2</sup>	Anzahl betroffener Einwohner	BIP je Einwohner in USD	BIP/Jahr in USD	BIP/5 Jahre in USD	BIP/5 Jahre in Euro
starker Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	80	229	18.320	40.873,27	748.798.386	3.743.991.532	2.684.067.529
starker Wind aus konstanter Richtung, trocken	400	229	91.690	40.873,27	3.743.991.532	18.719.957.660	13.420.337.646
massiger Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	160	229	36.640	40.873,27	1.497.596.613	7.487.983.064	5.368.135.059
massiger Wind aus konstanter Richtung, trocken	1.200	229	274.800	40.873,27	11.231.974.596	56.159.872.980	40.261.012.939
schwacher Wind aus wechselnden Richtungen, trocken	350	229	80.150	40.873,27	3.275.992.591	16.379.962.953	11.742.795.441
schwacher Wind aus konstanter Richtung, trocken	700	229	160.300	40.873,27	6.551.985.181	32.759.925.905	23.485.590.881
starker Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	22.900	229	5.244.100	40.873,27	214.343.515.207	1.071.717.576.035	768.314.330.259
starker Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	9.900	229	2.267.100	40.873,27	92.663.790.417	463.318.952.085	332.153.356.750
massiger Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	15.600	229	3.572.400	40.873,27	146.015.669.748	730.078.348.740	523.393.168.212
massiger Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	6.200	229	1.419.800	40.873,27	58.031.868.746	290.159.343.730	208.015.233.520
schwacher Wind aus wechselnden Richtungen, 1 mm/h Niederschlag	10.100	229	2.312.900	40.873,27	94.535.786.183	472.678.930.915	338.863.525.573
schwacher Wind aus konstanter Richtung, 1 mm/h Niederschlag	2.700	229	618.300	40.873,27	25.271.942.841	126.359.714.205	90.587.279.114

Abbildung B.2: Schadenhöhen durch Umsiedlungsmaßnahmen (Eigene Berechnungen)

Die folgenden Abbildungen *B.3* und *B.4* stellen alle in die Berechnungen der vorliegenden Studie einbezogenen Schadenhöhen (in Mrd. Euro) für die verschiedenen KKW in Deutschland dar. Die meisten Schadenhöhen, die auf Basis von Ergebnissen bisheriger Studien erhoben wurden, unterscheiden nicht zwischen den einzelnen KKW. Allein die Schadenhöhen, auf Grundlage der in Kapitel 4.3.6 abgeleiteten eigenen Quantifizierungsansätze zur Ermittlung des BIP-Verlusts in der Umsiedlungszone, variieren je KKW-Standort.

Schadenart	Biblis A	Biblis B	Brokdorf	Brunsbüttel	Emsland	Grafenrheinfeld	Groland	Gundremmingen B	Gundremmingen C
Toedliche Krebsfaelle	Schadenhoeehen in Mrd. Euro								
	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56
	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92
	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99
	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00
	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99
	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76
	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49
	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00
	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00
	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98
	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00
	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52
	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95
	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00
	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00
	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00
3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	
4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	
5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	
7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	
Nicht-toedliche Krebsfaelle	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64
	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78
	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13
	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26
Genetische Schaedlen	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28
	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99
	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07
	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99
	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27
136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	
BIP-Verlust Umsiedlungszone	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68
	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37
	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74
	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42
	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49
	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26
	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59
	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02
	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15
	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86
	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39
768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	
707,19	707,19	393,80	575,32	688,95	732,98	993,94	626,89	626,89	
Konsumverbot	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94
Evakuierung und Umsiedlung	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08

Abbildung B.3: Gesamte Schadenhoeehen je KKW Teil 1 (Eigene Berechnungen)

Schadenart	Isar 1	Isar 2	Kraunmühl	Neckarwestheim 1	Neckarwestheim 2	Philippsburg 1	Philippsburg 2	Unterweser
Toedliche Krebsfaelle	Schadenhoeihen in Mrd. Euro							
	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56	80,56
	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92	101,92
	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99	165,99
	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00
	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99	264,99
	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76	305,76
	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49	455,49
	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00	546,00
	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00	630,00
	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98	663,98
	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00	840,00
	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52	938,52
	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95	1.327,95
	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00	1.680,00
	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00	2.184,00
	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00	2.520,00
	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07	3.754,07
4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	4.368,00	
5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	5.040,00	
7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	7.508,15	
Nicht-toedliche Krebsfaelle	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64	74,64
	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78	153,78
	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13	615,13
	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26	1.230,26
Genetische Schaeden	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28	8,28
	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99	8,99
	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07	17,07
	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99	17,99
	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27	68,27
136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	136,53	
BIP-Verlust Umsiedlungszone	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68
	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37
	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74	11,74
	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42	13,42
	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49	23,49
	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26	40,26
	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59	90,59
	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02	208,02
	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15	332,15
	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86	338,86
	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39	523,39
768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	768,31	
690,28	690,28	573,50	774,40	774,40	713,59	713,59	747,86	
Konsumverbot	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94	37,94
Evakuierung und Umsiedlung	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08

Abbildung B.4: Gesamte Schadenhoeihen je KKW Teil 2 (Eigene Berechnungen)

# Anhang C

## Gesichtete Literatur

- [1] Bartsch, Matthias; Brandt, Andrea; Fröhlingsdorf, Michael; Höflinger, Laura; Kaiser, Simone; Latsch, Günther; Meyer, Cordula; Rosenbach, Marcel; Stark, Holger; Traufetter, Gerald: Atomkraft - Landkarte des Schreckens. In: Der Spiegel 12/2011.
- [2] Becker, Oda: Risiko Restlaufzeit - Die Probleme und Schwachstellen der vier ältesten deutschen Atomkraftwerke Schwerpunkt Biblis B. 2005.
- [3] Becker, Oda: Risiko Restlaufzeit - Die Probleme und Schwachstellen der vier ältesten deutschen Atomkraftwerke Schwerpunkt Brunsbüttel. 2005.
- [4] Becker, Oda: Risiko Restlaufzeit - Die Probleme und Schwachstellen der vier ältesten deutschen Atomkraftwerke Schwerpunkt Neckarwestheim-1. 2005.
- [5] Becker, Oda: Auswirkungen eines schweren Unfalls im Atomkraftwerk Biblis - Betroffenheit eines Klägers. Hannover, August 2008.
- [6] Becker, Oda: Auswirkungen eines schweren Unfalls im Atomkraftwerk Brunsbüttel - Betroffenheit der Kläger und Klägerinnen. Hannover, Januar 2009.
- [7] Becker, Oda: Auswirkungen eines schweren Unfalls im Atomkraftwerk Philippsburg - Betroffenheit der Kläger. 2009.
- [8] Becker, Oda: Auswirkungen eines schweren Unfalls im Atomkraftwerk Isar 1 - Betroffenheit der Kläger. 2009.
- [9] Becker, Oda; Hirsch, Helmut: Schwere Unfälle im AKW Esenshamm und ihre Folgen - Schwerpunkt Terrorgefahr. 2006.
- [10] Büro für Atomsicherheit: Risiken alter Atomkraftwerke. Studie, Bonn, Juni 2010.
- [11] Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.): Epidemiologische Qualitätsprüfung der KiKK Studien. 2008.

- 
- [12] Bundesamt für Strahlenschutz: Grundsätze für die weitere Entwicklung des Strahlenschutzes. September 2009.
- [13] Blank, Ingo: Rückschau Energie und Umwelt - Diskussion um Kernkraftwerke. Information zum Beitrag im Ersten, 13. Juli 2010. URL: [http://www.daserste.de/plusminus/beitrag\\_dyn~uid,qqgk3x97by97m182~cm.asp](http://www.daserste.de/plusminus/beitrag_dyn~uid,qqgk3x97by97m182~cm.asp) (Abruf 25.03.2011).
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Antwort auf Fragen 7/117 vom 16. Juli 2008 zur Haftungsverteilung im Falle eines Atomunglücks. 21. Juli 2008.
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen - Stand 21.09.2008, Nichtamtliche Fassung, 2008. URL: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/rahmenempfehlung\\_katastrophenschutz.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/rahmenempfehlung_katastrophenschutz.pdf) (Abruf 26.03.2011).
- [16] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Antwort auf Fragen 11/156 vom 23. November 2009 zur Kündigung des „Beherrschungsvertrages“ und 11/159 vom 24. November 2009 zur Verlustübernahme von Konzernmüttern. 27. November 2009.
- [17] Bundesministerium der Verteidigung: Antwort auf die mündliche Frage vom 19. Februar 2010 zum Schutz eigener Kräfte gegen die Wirkung von Doppelhohlladungssprengköpfen, die aus tragbaren Infanteriewaffen abgefeuert werden. 24. Februar 2010.
- [18] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND): Atomkraftwerke und die Terrorgefahr - Nichts gelernt aus dem 11. September 2001. Berlin, 8. September 2006.
- [19] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND): Kurzexpertise Sicherheit der vier Atomkraftwerke in Baden-Württemberg. Hannover, März 2011.
- [20] Carroll, Simon; Foggatt, Antony: The Future of Nuclear Energy in A Carbon Constrained World - Nuclear Third Party Insurance - The Nuclear Sector's „Silent“ Subsidy - State of Play and Opportunities in Europe. Discussion paper, New York, 5. November 2007.
- [21] CE Solutions for environment, economy and technology (Hrsg.): Environmentally harmful support measures in EU Member States. Delft, Januar 2003.
- [22] CIO: Stuxnet dringt nicht in Kernsysteme eines Kraftwerks vor, Meldung vom 27. September 2010.
- [23] Deutscher Bundestag: Endbericht der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“. Drucksache 14/9400 vom 7. Juli 2002.
- [24] Deutscher Bundestag: Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kottling-Uhl, Hans-Josef Fell, Bärbel Höhn, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN - Nuklearer Katastrophenfall - „Liquidatoren“ und Dekontamination im Falle eines „Super GAUs“. Drucksache 17/2387 vom 2. Juli 2010.

- 
- [25] Droste-Franke, Bert: Quantifizierung von Umweltschäden als Beitrag zu umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Dissertation 2005.
- [26] Europäische Kommission (Hrsg.): Externalities of Energy „ExterE“ Project - Volume 2 - Methodology: Method for Estimation of Physical Impacts and Monetary Valuation for Priority Impact Pathways, URL: <http://www.externe.info/reportex/vol2.pdf> (Abruf 25.03.2011).
- [27] Europäische Kommission (Hrsg.): ExternE National Implementation Germany. November 1997.
- [28] Europäische Kommission (Hrsg.): ExternE Methodology Update 2005. Luxemburg, 2005. ISBN: 92-79-00423-9.
- [29] Eidgenössische Kommission für AC-Schutz: Atmosphärische Ausbreitungsrechnungen bei Unfällen in Kernanlagen. 7. März 2002.
- [30] European Spatial Planning Observation Network (Hrsg.): Technological hazards - Nuclear power plants. URL: <http://www.gsf.fi/projects/espon/Nuclear.htm> (Abruf 25.03.2011).
- [31] Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft: Staatliche Förderungen der Atomenergie - Der Zeitraum 1950-2008. Studie im Auftrag von Greenpeace, Berlin, 02. September 2009.
- [32] Freudenreich, Daniel: Bund ohne Notfallplan für Reaktor-Gau. Beitrag in: Der Westen, 1. August 2010. URL: <http://www.derwesten.de/nachrichten/politik/Bund-ohne-Notfallplan-fuer-Reaktor-Gau-id3356203.html> (Abruf 25.03.2011).
- [33] Froggatt, Antony: Nuclear Industry Status, Prospects and 3rd Party Liability. Seminarunterlage Wien, 15. Februar 2010.
- [34] Gesellschaft für Strahlenschutz e.V.: Gesundheitliche Folgen von Tschernobyl - 20 Jahre nach der Reaktorkatastrophe. April 2006.
- [35] Greenpeace e.V.: The Chernobyl Catastrophe - Consequences on Human Health. Greenpeace, Amsterdam. April, 2006. ISBN 5-94442-013-8.
- [36] Greenpeace: Terrorangriffe aus der Luft auf ältere deutsche Atomkraftwerke. September 2010.
- [37] Grawe, Joachim: Sind die deutschen Kernkraftwerke ausreichend versichert?. 5. April 2001.
- [38] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit; Physikerbüro Bremen; Öko-Institut e.V.: Sicherheitstechnische Überprüfung von Anlagen zu ausgewählten Anforderungen und Ereignissen im Rahmen von Anträgen zur Reststrommengenübertragung - Teil 1 KWB-A/KKE Bewertungsgegenstand 1 „Auswertung der Betriebserfahrung hinsichtlich Trends meldepflichtiger Ereignisse und Transienten“. Mai 2007.

- 
- [39] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit; Physikerbüro Bremen; Öko-Institut e.V.: Sicherheitstechnische Überprüfung von Anlagen zu ausgewählten Anforderungen und Ereignissen im Rahmen von Anträgen zur Reststrommengenübertragung - Teil 1 KWB-A/KKE Bewertungsgegenstand 13 „Großes Leck innerhalb des Sicherheitsbehälters“. Mai 2007.
- [40] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit; Physikerbüro Bremen; Öko-Institut e.V.: Sicherheitstechnische Überprüfung von Anlagen zu ausgewählten Anforderungen und Ereignissen im Rahmen von Anträgen zur Reststrommengenübertragung - Teil 2 GKN-1/GKN-2 Bewertungsgegenstand 1 „Auswertung der Betriebserfahrung hinsichtlich Trends meldepflichtiger Ereignisse und Transienten“. Februar 2008.
- [41] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit; Physikerbüro Bremen; Öko-Institut e.V.: Sicherheitstechnische Überprüfung von Anlagen zu ausgewählten Anforderungen und Ereignissen im Rahmen von Anträgen zur Reststrommengenübertragung - Teil 2 GKN-1/GKN-2 Bewertungsgegenstand 13 „Großes Leck innerhalb des Sicherheitsbehälters“. Februar 2008.
- [42] Harbrücker, Dirk: Versicherung gegen nukleare Schäden durch terroristische Angriffe. In: Pelzer, Norbert (Hrsg.): Die Internationalisierung des Atomrechts, S. 187-195. 2005.
- [43] Hirsch, Helmut; Becker, Oda: Risiko Restlaufzeit - Schwerpunkt Biblis A. Hannover, Juli 2005.
- [44] Hirsch, Helmut; Becker, Oda: Risiko Restlaufzeit - Schwerpunkt Biblis B. Hannover, Juli 2005.
- [45] Hirsch, Helmut; Becker, Oda: Risiko Restlaufzeit - Schwerpunkt Brunsbüttel. Hannover, Juli 2005.
- [46] Hirsch, Helmut; Becker, Oda: Risiko Restlaufzeit - Schwerpunkt Neckarwestheim-1. Hannover, Juli 2005.
- [47] Hohmeyer, Olav: Adäquate Berücksichtigung der Erschöpfbarkeit nicht erneuerbarer Ressourcen. In: Prognos AG (Hrsg): Externe Effekte der Energieversorgung - Versuch einer Identifizierung, S. 178-195, Baden-Baden, Nomos Verlagsgesellschaft, 1991.
- [48] Hohmeyer, Olav: Ausarbeitung zum aktuellen Sachstand der wissenschaftlichen Debatte um externe Kosten. Flensburg, Februar 2002.
- [49] Hohmeyer, Olav: Die Abschätzung der Kosten des anthropogenen Treibhauseffekts. Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 74 (2005), 2, S. 164-168, 2005.
- [50] International Center for Technology Assessment: Gasoline Cost Externalities - Security and Protection Services. 25. Januar 2005.
- [51] Informationskreis KernEnergie: Der Reaktorunfall in Tschernobyl. 4. Auflage, Juni 2007

- 
- [52] Internationale Länderkommission Kerntechnik: Untersuchungen zum gezielten Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges auf Kernkraftwerke - Ergebnisse aus dem Gutachten. November 2002.
- [53] International Physicians for the Prevention of Nuclear War (IPPNW): AKW-Störfallauswertung der IPPNW. Berlin, 2. Juni 2010.
- [54] Jakat, Lena: Versicherungsrisiko AKW - Katastrophe mit beschränkter Haftung. Beitrag in der Süddeutschen Zeitung, 18. März 2011. URL: <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/2.220/versicherung-der-kernkraft-mal-die-betreiber-zahlen-lassen-1.1074008> (Abruf 25.03.2011).
- [55] Jilek, Wolfgang; Karner, Karin; Rass Andrea: Externe Kosten im Energiebereich. 2. Zwischenbericht - Literaturrecherche. URL: [http://www.wind-energie.de/fileadmin/dokumente/Themen\\_A-Z/Externe%20Kosten/Studie\\_ExterneKosten\\_Uebersicht.pdf](http://www.wind-energie.de/fileadmin/dokumente/Themen_A-Z/Externe%20Kosten/Studie_ExterneKosten_Uebersicht.pdf) (Abruf 25.03.2011).
- [56] Kastchiew, Georgui; Lyman, Ed; Kromp, Wolfgang; Sailer, Michael; Kurth, Stephan; Lochbaum, David; Schneider, Mycle: Residual Risk - An Account of Events in Nuclear Power Plants since the Chernobyl Accident in 1986. May 2007. URL: [http://www.greens-efa.org/cms/topics/dokbin/181/181995.residual\\_risk@en.pdf](http://www.greens-efa.org/cms/topics/dokbin/181/181995.residual_risk@en.pdf) (Abruf 25.03.2011).
- [57] Kelle, Alexander; Schaper, Annette: Bio- und Nuklearterrorismus - Eine kritische Analyse der Risiken nach dem 11. September 2001. Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung (Hrsg.), Oktober 2001. ISBN: 3-933293-55-3.
- [58] Kraus, Gerald: Fachberater Strahlenschutz - Nuklearer Katastrophenschutz Symposium Biblis 08. 15. November 2008
- [59] Krewitt, Wolfram; Schlomann, Barbara: Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. 6. April 2006.
- [60] Kückler, Swantje; Meyer, Bettina: Billiger Strom aus Atom und Kohle? Staatliche Förderungen 1970-2008. Oktober 2010. URL: [http://www.kernenergie debate.de/pdfs/101015\\_FOES\\_Studie.pdf](http://www.kernenergie debate.de/pdfs/101015_FOES_Studie.pdf) (Abruf 25.03.2011).
- [61] Large and Associates: Chernobyl - A Nuclear Catastrophe 20 Years On. 22. April 2006.
- [62] Masuhr, Klaus P.; Wolff, Heimfrid; Keppler, Jan: Identifizierung und Internationalisierung Externer Kosten der Energieversorgung. Basel, Juni 1992.
- [63] Matthes, Felix Chr.: Nuklearhaftung - Subvention eines Energieträgers. Seminarunterlage Wien, 15. Februar 2010.
- [64] Mayer, Leopold: Versicherungswirtschaftslehre II. Teil. Skriptum zur Vorlesung, Oktober 2008.

- 
- [65] Meyer, Bettina: Hintergrundpapier Externe Kosten der Energieversorgung. Kiel, 8. November 2009.
- [66] Michel, Rolf: Sinn und Unsinn beim Gebrauch der effektiven Dosis und der Kollektivdosis. Tagungsdokument, 2006.
- [67] Michel, Rolf: Sinn und Unsinn beim Gebrauch der effektiven Dosis und der Kollektivdosis. Tagungsdokument, 2010.
- [68] Nell, Martin: Staatshaftung für Terrorrisiken?. Working Papers on Risk and Insurance Hamburg University No.4, Hamburg, Dezember 2001.
- [69] Nitsch, Joachim: Leitstudie 2007 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien - Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050“. 2007. URL: [http://www.bmu.de/erneuerbare\\_energien/downloads/doc/38787.php](http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/38787.php) (Abruf 25.03.2011).
- [70] o.A: Russland: Stuxnet hätte zweites Tschernobyl auslösen können, Artikel bei heise online, 28. Januar 2011. URL: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Russland-Stuxnet-haette-zweites-Tschernobyl-ausloesen-koennen-1179402.html> (Abruf 25.03.2011).
- [71] Öko-Institut e.V. (Hrsg.): Folgen schwerer Unfälle im KKW Krümmel für das Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg und Auswirkungen von Katastrophenschutzmaßnahmen. Darmstadt, April 1992.
- [72] Öko-Institut e.V. (Hrsg.): Analyse der Emissions- und Immissionsdaten des Kernkraftwerkes Krümmel im Zusammenhang mit den Leukämiefällen in der Elbmarsch. 1994.
- [73] Öko-Institut e.V. (Hrsg.): Analyse des Bedrohungspotenzials „gezielter Flugzeugabsturz“ am Beispiel der Anlage Biblis-A. Darmstadt, 20. November 2007.
- [74] Öko-Institut e.V. (Hrsg.): Klärung technischer und rechtlicher Fragestellungen bei der Beseitigung radioaktiv kontaminierter Abfälle landwirtschaftlicher Produkte nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Konsequenzen. Darmstadt, 26. Februar 2010.
- [75] Patalong, Frank: Stuxnet - Angst vor einem zweiten Tschernobyl. Artikel bei Spiegel online, 18. Januar 2011. URL: <http://www.spiegel.de/netzwelt/netzpolitik/0,1518,739950,00.html> (Abruf 25.03.2011).
- [76] Rechsteiner, Rudolf: Grün gewinnt. Zürich, Orell Füssli Verlag, 2003. ISBN: 3-280-05054-5.
- [77] Rieger, Frank: Der digitale Erstschlag ist erfolgt. Artikel in der Frankfurter Allgemeine Zeitung, 22. September 2010.
- [78] Sander, Lalon: Was uns die Atomkraft kostet. 2010. URL: <http://www.taz.de/1/zukunft/schwerpunkt-anti-akw/artikel/1/was-uns-die-atomkraft-kostet/> (Abruf 25.03.2011).
- [79] Sauer, Gustav W.: Haftung, Deckungs- und Stilllegungsvorsorge bei kerntechnischen Anlagen. In: Recht Technik Wirtschaft Schriftenreihe Band 64, S. 177-202. Carl Heymanns Verlag, Köln/Berlin/Bonn/München, 1991. ISBN: 3-452-22221-7.

- 
- [80] Sinwel, Manuel: Atomenergie - Vorteile, Risiken und Nachhaltigkeit. 2006.
- [81] Strahlenschutzkommission: Bewertung von Messungen der ARGE PhAM zur Radioaktivität in der Elbmarsch. 14. Februar 2003.
- [82] Umweltbundesamt Österreich (Hrsg.): Grenzüberschreitende UVP gemäß Art. 7 UVP-RL zum Standortzwischenlager Biblis. Wien, Februar 2002.
- [83] Umweltbundesamt Österreich (Hrsg.): Grenzüberschreitende UVP gemäß Art. 7 UVP-RL zum Standortzwischenlager Grundremmingen. 2002.
- [84] Umweltbundesamt Österreich (Hrsg.): Grenzüberschreitende UVP gemäß Art. 7 UVP-RL zum Standortlager Philippsburg. 2002.
- [85] Umweltbundesamt Österreich: Atomare Risiken - Wirtschaftliche und rechtliche Aspekte - Schloss Wilhelminenberg, Wien, 10. Dezember 1996. Tagungsberichte Band 23, Wien, 1997. URL: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/CP023.pdf> (Abruf 26.03.2011).
- [86] Umweltforschungsplan des Bundesumweltministeriums: Reaktorsicherheit und Strahlenschutz - Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie). 2006.
- [87] Welfens, Paul J.J.: Atomstrom ist extrem teuer. Artikel im Handelsblatt vom 24.03.2011.
- [88] Wolff, Verena: Atomkatastrophe in Japan - Die Kosten. Artikel vom 16.03.2011 bei sueddeutsche.de. URL: <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/atomkatastrophe-in-japan-wer-soll-das-alles-zahlen-1.1072821> (Abruf: 25.03.2011).
- [89] Ziesing, Hans-Joachim (Hrsg.): Externe Kosten in der Stromerzeugung. VWEW Energieverlag GmbH, Frankfurt/Berlin/Heidelberg, 2004. ISBN 3-8022-0794-7.
- [90] Zentrum für Klinische Studien Essen: Epidemiologische Qualitätsprüfung der KiKK-Studien im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz. 19. März 2008.
- [91] Zweifel, P.; Umbricht, R.: Verbesserte Deckung des Nuklearrisikos zu welchen Bedingungen? Mai 2002.

# Literaturverzeichnis

- [9-11 Commission 2004] National Commission On Terrorist Attacks Upon The United States (Hrsg.) : *The 9/11 Commission Report*. 22. Juli 2004. URL: <http://www.9-11commission.gov/report/911Report.pdf> (Abruf 01.04.2011).
- [Adelmeyer/Warmuth 2003] Adelmeyer, Moritz; Warmuth, Elke : *Finanzmathematik für Einsteiger*. Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 2003. ISBN 3-528-03185-9.
- [AGEB 2011 a] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (Hrsg.) : *Energieverbrauch hat sich 2010 kräftig erholt, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen*. pressedienst Nr. 1/2011, 23. Februar 2011, S. 51. URL: [http://www.ag-energiebilanzen.de/component/download.php?filedata=1298451813.pdf&filename=AGEB\\_Pressedienst\\_01\\_2011.pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/component/download.php?filedata=1298451813.pdf&filename=AGEB_Pressedienst_01_2011.pdf) (Abruf 28.02.2011).
- [AGEB 2011 b] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (Hrsg.) : *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2010*. Februar 2011. URL: [http://www.ag-energiebilanzen.de/component/download.php?filedata=1298302717.pdf&filename=AGEB\\_Jahresbericht2010\\_20110221.pdf&mimetype=application/pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/component/download.php?filedata=1298302717.pdf&filename=AGEB_Jahresbericht2010_20110221.pdf&mimetype=application/pdf) (Abruf 25.03.2011).
- [Albright/Brannan/Walrond 2010] Albright, David; Brannan, Paul; Walrond, Christina : *Did Stuxnet Take Out 1,000 Centrifuges at the Natanz Enrichment Plant?* Preliminary Assessment, Institute for Science and International Security (ISIS), 22. Dezember 2010. URL: [http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/stuxnet\\_FEP\\_22Dec2010.pdf](http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/stuxnet_FEP_22Dec2010.pdf) (Abruf 23.03.2011).
- [army-technology] army-technology.com (Hrsg.) : *Milan Anti-Tank Missile System*. URL: <http://www.army-technology.com/projects/milan/> (Abruf 01.04.2011).
- [BDEW 2011] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.) : *Entwicklung der Energie Versorgung 2010*. 23. Februar 2011. URL: [http://www.vewsaar.de/fileadmin/dokumente/Energie/pdf/energie\\_info\\_entwicklung\\_energieversorgung\\_23022011.pdf](http://www.vewsaar.de/fileadmin/dokumente/Energie/pdf/energie_info_entwicklung_energieversorgung_23022011.pdf) (Abruf 28.03.2011).
- [Becker 2005] Becker, Oda : *Risiko Restlaufzeit - Die Probleme und Schwachstellen der vier ältesten deutschen Atomkraftwerke - Schwerpunkt Biblis A*. Greenpeace Deutschland

- 
- e.V. (Hrsg.), Juli 2005. URL: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/greenpeace\\_studie\\_restrisiko\\_biblis\\_a.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/greenpeace_studie_restrisiko_biblis_a.pdf) (Abruf 23.03.2011).
- [Becker 2009] Becker, Oda : *Studie zu den Gefahren von Laufzeitverlängerungen*. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, August 2009. URL: [http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/atomkraft/20090806\\_atomkraft\\_studie\\_laufzeitverlaengerungen.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/atomkraft/20090806_atomkraft_studie_laufzeitverlaengerungen.pdf) (Abruf 21.03.2011).
- [Becker 2010 a] Becker, Oda : *Terrorangriffe aus der Luft auf (ältere) deutsche Atomkraftwerke - Bericht und Bewertung von Schwachstellen in der Luftsicherheit*. Greenpeace e.V. (Hrsg.), September 2010. URL: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/Bericht\\_und\\_Bewertung\\_von\\_Schwachstellen\\_in\\_der\\_Luftsicherheit\\_05092010.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/Bericht_und_Bewertung_von_Schwachstellen_in_der_Luftsicherheit_05092010.pdf) (Abruf 21.03.2011).
- [Becker 2010 b] Becker, Oda : *Terrorangriff mit einer panzerbrechenden Waffe (AT-14 Kornet-E) auf (ältere) deutsche Atomkraftwerke*. Greenpeace e.V. (Hrsg.), September 2010. URL: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/KURZ\\_Panzerbrechende\\_Waffen\\_14092010.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/KURZ_Panzerbrechende_Waffen_14092010.pdf) (Abruf 21.03.2011).
- [Becker/Hirsch 2005] Becker, Oda; Hirsch, Helmut : *Risiko Restlaufzeit - Die Probleme und Schwachstellen der vier ältesten deutschen Atomkraftwerke - Schwerpunkt Biblis A*. Greenpeace e.V. (Hrsg.), Hannover, August 2005. URL: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/greenpeace\\_studie\\_restrisiko\\_biblis\\_a.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/greenpeace_studie_restrisiko_biblis_a.pdf) (Abruf 21.03.2011).
- [Benzin 2005] Benzin, Arne : *Versicherbarkeit von Terrorismusrisiken*. Zeitschrift für die gesamte Versicherungswissenschaft, Bd. 94, 2005, S. 709ff.
- [BfS a] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Hrsg.) : *Systematik der internationalen Bewertungsskala (INES)*. URL: <http://www.bfs.de/de/kerntechnik/ereignisse/ines.html> (Abruf 22.02.2011).
- [BfS b] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Hrsg.) : *Multilaterale Vereinbarungen über nukleare Sicherheit und Strahlenschutz mit nationalen Ausführungsvorschriften*. URL: [http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/rechtsvorschriften\\_E35.html](http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/rechtsvorschriften_E35.html) (Abruf 3.03.2011).
- [BfS c] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Hrsg.) : *Positionsbestimmung des BfS zu Grundsatzfragen des Strahlenschutzes („Leitlinien Strahlenschutz“)*. URL: [http://www.bitkom.org/files/documents/Entwurf\\_Leitlinien\\_Strahlenschutz.pdf](http://www.bitkom.org/files/documents/Entwurf_Leitlinien_Strahlenschutz.pdf) (Abruf: 25.03.2011).
- [Blobel 2005] Blobel, Felix : *Das Protokoll von 2004 zum Pariser Übereinkommen - wesentliche Verbesserungen im internationalen Atomhaftungsrecht*. Zeitschrift Natur und Recht, Bd. 27, Nr. 3, März 2005, S. 137-143.

- 
- [BMU 2008 a] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) : *Empfehlung der Strahlenschutzkommission: Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden* 21. September 2008. URL: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/radiologische\\_grundlagen.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/radiologische_grundlagen.pdf) (Abruf 25.03.2011).
- [BMU 2008 b] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) : *Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke*. 2008. URL: [http://www.bmu.de/atomenergie\\_sicherheit/sicherheitsprinzipien/sicherheitsanforderungen/doc/42288.php](http://www.bmu.de/atomenergie_sicherheit/sicherheitsprinzipien/sicherheitsanforderungen/doc/42288.php) (Abruf 22.02.2011).
- [BMU 2009] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) : *Rechtsvorschriften / Technische Regeln und Regelungen*. 2009. URL: [http://www.bmu.de/atomenergie\\_sicherheit/rechtsvorschriften\\_technische\\_regeln/doc/40327.php](http://www.bmu.de/atomenergie_sicherheit/rechtsvorschriften_technische_regeln/doc/40327.php) (Abruf 23.02.2011).
- [BMU 2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) : *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Leitstudie 2010*. Dezember 2010. URL: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf) (Abruf 17.03.2011).
- [Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe 2011] Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe (Hrsg.) : *Karte der Epizentren der Schadenbeben (ab Intensität VI-VII) in der Bundesrepublik Deutschland Jahre 800 bis 2010*. Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe, 14. März 2011. URL: [http://www.bgr.bund.de/cln\\_169/nn\\_331926/DE/Themen/Seismologie/Downloads/karte-epizentren-schadenbeben-800-2010,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/karte-epizentren-schadenbeben-800-2010.pdf](http://www.bgr.bund.de/cln_169/nn_331926/DE/Themen/Seismologie/Downloads/karte-epizentren-schadenbeben-800-2010,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/karte-epizentren-schadenbeben-800-2010.pdf) (Abruf 23.03.2011).
- [Bundesministerium der Verteidigung 2010] Bundesministerium der Verteidigung (Hrsg.) : *Lenkflugkörpersysteme zur Panzerabwehr und deren Durchschlagsleistungen*. 15. März 2010.
- [Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.) : *Beantwortung der schriftlichen Fragen an die Bundesregierung im Monat Mai 2010 - Fragen Nr. 381 und 382*. 7. Juni 2010.
- [Bundesregierung 2006] Bundesregierung (Hrsg.) : *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Hans Josef Fell, Dr. Reinhard Loske, Sylvia Kotting-Uhl, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN - Gefahren der Atomenergie*. 19. April 2006. URL: <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/16/012/1601249.pdf> (Abruf 22.03.2011).

- 
- [Bundesregierung 2010 a] Bundesregierung (Hrsg.) : *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kötting-Uhl, Hans-Josef Fell, Bärbel Höhn, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN - Drucksache 17/2403 - Nuklearer Katastrophenfall - Katastrophenschutz und Evakuierung*. 3. September 2010. URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/028/1702871.pdf> (Abruf 22.02.2011).
- [Bundesregierung 2010 b] Bundesregierung (Hrsg.) : *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kötting-Uhl, Hans-Josef Fell, Bärbel Höhn, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN - Drucksache 17/3156 - Nuklearer Katastrophenfall - Internationales Haftungsrecht bei Atomkraftwerken*. 20. Oktober 2010. URL: <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/033/1703371.pdf> (Abruf 22.02.2011).
- [Bundesregierung 2010 c] Bundesregierung (Hrsg.) : *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kötting-Uhl, Hans-Josef Fell, Bärbel Höhn, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN - Drucksache 17/2547 - Nuklearer Katastrophenfall - Ökonomische Folgen*. 27. Juli 2010. URL: <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/026/1702682.pdf> (Abruf 22.02.2011).
- [Büning/Trenkler 1994] Büning, Herbert; Trenkler, Götz : *Nichtparametrische statistische Methoden*. 2. Auflage, de Gruyter, Berlin und New York, 1994. ISBN 3-11-014105-1.
- [Büro für Atomsicherheit 2010] Büro für Atomsicherheit (Hrsg.) : *Risiken alter Atomkraftwerke, im Auftrag für die Bundestagsfraktion Bündnis 90 / Die Grünen, Bonn*. Juni 2010. URL: <http://www.atomsicherheit.de/app/download/4497095464/Risiken+alter+AKW+final+2010+06+22.pdf?t=1285189068> (Abruf 18.03.2011).
- [Czakainski et al. 1996] Czakainski, Martin; Butz, Heinz-Peter; Haug, Peter; Knapp, Sabine; Koelzer, Winfried; Pfrommer, Axel : *Tschernobyl - Der Reaktorunfall - Unfallhergang, Mittel- und langfristige Folgen, Perspektiven für die Stilllegung*. Informationskreis Kernenergie (Hrsg.), Bonn, 1996. URL: <http://www.blaulicht24.com/de/software/download/tschernobyl.pdf> (Abruf 22.03.2011).
- [Deutsches Atomforum e.V.] Deutsches Atomforum e.V. (Hrsg.) : *Deutsche Kernkraftwerke in Betrieb*. URL: [http://www.atomforum.de/kernenergie/Themen/Kernkraftwerke/Kernkraftwerke\\_in\\_Deutschland/index.php](http://www.atomforum.de/kernenergie/Themen/Kernkraftwerke/Kernkraftwerke_in_Deutschland/index.php) (Abruf: 23.02.2011).
- [Diekmann/Horn 2007] Diekmann, Jochen; Horn, Manfred : *Abschlussbericht zum Vorhaben „Fachgespräch zur Bestandsaufnahme und methodischen Bewertung vorliegender Ansätze zur Quantifizierung der Förderung erneuerbarer Energien im Vergleich zur Förderung der Atomenergie in Deutschland“*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin (DIW), Berlin, 2007. URL: <http://www.erneuerbare-energien.de>

---

de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/diw\_abschlussbericht.pdf (Abruf 3.03.2011).

- [Dietzel 2002] Dietzel, Wilhelm : *Untersuchungen zum gezielten Absturz eines großen Verkehrsflugzeuges auf Kernkraftwerke - Ergebnisse aus den Gutachten*. Internationale Länderkommission Kerntechnik, 29. November 2002. URL: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/ilk\\_frontal\\_21.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/ilk_frontal_21.pdf) (Abruf 23.03.2011).
- [DPA 2006] Deutsche Presseagentur (Hrsg.) : *Regierung in Südafrika: Sabotage in Atomkraftwerk*. Deutsche Presseagentur, 28. Februar 2006.
- [DPA 2010] Deutsche Presse Agentur (Hrsg.) : *Experte: Stuxnet dringt nicht in Kernsysteme eines Kraftwerks vor - Interview: Christoph Dernbach*. Deutsche Presse Agentur, 27. September 2010. URL: [http://www.greenpeace-magazin.de/index.php?id=55&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=88778&tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=23&cHash=31e346e4d6](http://www.greenpeace-magazin.de/index.php?id=55&tx_ttnews%5Btt_news%5D=88778&tx_ttnews%5BbackPid%5D=23&cHash=31e346e4d6) (Abruf 22.03.2011).
- [DSF 2009] Deutsche Strahlenschutz-Fachgesellschaften (Hrsg.) : *Konsequenzen aus den Empfehlungen der ICRP 103 für den Strahlenschutz in Deutschland - Gemeinsames Positionspapier der mit dem Strahlenschutz befassten deutschen Fachgesellschaften zu wesentlichen Schwerpunkten von ICRP 103*. Oktober 2009. URL: [http://osiris22.pi-consult.de/userdata/1\\_20/p\\_105/library/data/icrp103\\_positionspapier\\_ger.pdf](http://osiris22.pi-consult.de/userdata/1_20/p_105/library/data/icrp103_positionspapier_ger.pdf) (Abruf 28.03.2011).
- [Europäische Kommission 1991] Europäische Kommission (Hrsg.) : *COSYMA Report EUR 13028 EN*. Brüssel, 1991.
- [Europäische Kommission 1995] Europäische Kommission (Hrsg.) : *ExternE: Externalities of Energy, Vol. 5: Nuclear (Report EUR 16520 EN of the JOULE programme)*. Brüssel/Luxemburg, 1995. ISBN: 92-827-5214-3.
- [Europäische Kommission 2003] Europäische Kommission (Hrsg.) : *Protokoll zur Änderung des Übereinkommens vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie in der Fassung des Zusatzprotokolls vom 28. Januar 1964 und des Protokolls vom 16. November 1982*. Amtsblatt Nr. L 338 vom 23/12/2003. URL: [http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:22003A1223\(02\):DE:HTML](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:22003A1223(02):DE:HTML).
- [Ewers/Rennings 1991] Ewers, Hans-Jürgen; Rennings, Klaus : *Die volkswirtschaftlichen Kosten eines Super-Gau's in Biblis*. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht (ZfU) Nr. 4, S. 379-396, 1991.
- [Ewers/Rennings 1992 a] Ewers, Hans-Jürgen; Rennings, Klaus : *Die Kosten möglicher Schäden durch einen sogenannten Super-Gau - monetäre Bewertung und umweltpolitische*

---

*Implikationen*. Zeitschrift für angewandte Umweltforschung (ZAU) Sonderheft 3 (1992), S. 155-167.

- [Ewers/Rennings 1992 b] Ewers, Hans-Jürgen; Rennings, Klaus : *Abschätzung der Schäden durch einen sogenannten „Super-GAU“*. April 1992. URL: <http://www.zukunftslobby.de/Tacheles/prognstu.html> (Abruf 25.03.2011).
- [Fairlie/Sumner 2006] Fairlie, Ian; Sumner, David : *The other Report on Chernobyl (TORCH)*. Berlin/Brüssel/Kiew, 06. April 2006.
- [Farny 2006] Farny, Dieter : *Versicherungsbetriebslehre*. 4. Auflage, Verlag Versicherungswirtschaft, Karlsruhe, 2006.
- [Focus Online 2011] Focus Online (Hrsg.) : *Japan - Atom-Katastrophe in Fukushima 1 bedroht Tokio - Evakuierung unmöglich*. Focus Online, 15. März 2011. URL: [http://www.focus.de/panorama/welt/tsunami-in-japan/japan-atom-katastrophe-in-fukushima-1-bedroht-tokio-evakuierung-unmoeglich\\_aid\\_608895.html](http://www.focus.de/panorama/welt/tsunami-in-japan/japan-atom-katastrophe-in-fukushima-1-bedroht-tokio-evakuierung-unmoeglich_aid_608895.html) (Abruf 23.03.2011).
- [Fokken 2008] Fokken, Ulrike : *Ein Wert an sich*. Die Tageszeitung, 23. Mai 2008. URL: <http://www.taz.de/1/debatte/kommentar/artikel/1/ein-wert-an-sich/> (Abruf 18.03.2010).
- [Friedrich 2009] Friedrich, Reiner : *Wie hoch sind die „externen Kosten“ der verschiedenen Energie-Techniken bei der Stromerzeugung?*. 2009. URL: <http://www.energie-fakten.de/pdf/externe-kosten.pdf> (Abruf 25.03.2011).
- [Fürstenwerth/Weiß 2001] Fürstenwerth, Frank von; Weiß, Alfons : *Versicherungs-Alphabet (VA) - Begriffserläuterungen der Versicherung aus Theorie und Praxis*. 10. Auflage, Verlag Versicherungswirtschaft, Karlsruhe, 2001.
- [Global Security 2006] Global Security (Hrsg.) : *Hizballah rockets*. Global Security.org, 30. Juli 2006. URL: <http://www.globalsecurity.org/military/world/para/hizballah-rockets.htm> (Abruf 22.02.2011).
- [Goßner 2002] Goßner, Alfred : *Gibt es neue unversicherbare Risiken?*. In: Der Umgang mit den Risiken im Grenzbereich der Versicherbarkeit, Verlag Versicherungswirtschaft, Karlsruhe, 2002.
- [GRS 1989] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) (Hrsg.) : *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie*. 1989. URL: <http://www.grs.de/content/deutsche-risikostudie-kernkraftwerke-phase-b> (Abruf: 23.02.2011).
- [GRS 2000] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) (Hrsg.) : *Tschernobyl: Gesundheitliche Folgen - BMU-Sachstandsbericht Nr. 1. Eine Untersuchung im Auftrag des Bundesministers Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.

- 
2000. URL: <http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-S-47.pdf> (Abruf: 24.03.2011).
- [GRS 2001] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) (Hrsg.) : *Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland*. GRS-175, Oktober 2001. URL: <http://www.grs.de/content/grs-175-bewertung-des-unfallrisikos-fortschrittlicher-druckwasser-reaktoren-deutschland> (Abruf 25.03.2011).
- [GRS] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) (Hrsg.) : *INES - International Nuclear Event Scale*. URL: <http://www.grs.de/content/ines-information-auf-einen-blick> (Abruf 22.02.2011).
- [Hahn/Sailer 1987] Hahn, Lothar; Sailer, Michael : *Charakterisierung von Sicherheitsphilosophien in der Kerntechnik*. Öko-Institut Darmstadt, 1987.
- [Harwood 2007] Matthew Harwood : *Sleeping on the Job, Security Management*. 10. Dezember 2007. URL: <http://www.securitymanagement.com/news/sleeping-job> (Abruf 22.03.2011).
- [Haubner 2009] Haubner, David : *Grenzen der Versicherbarkeit*. Anmerkungen zum Katastrophenrecht - Dokumentation der Arbeitsgruppe „Katastrophen und Recht“, 2. Gesellschaftswissenschaftliches Kolleg der Studienstiftung des deutschen Volkes, 2009. URL: [http://fzk.rewi.hu-berlin.de/Sammelband\\_Katastrophenrecht.pdf](http://fzk.rewi.hu-berlin.de/Sammelband_Katastrophenrecht.pdf) (Abruf 17.03.2011).
- [Hirsch 2001] Hirsch, Helmut : *Gefährdung deutscher Atomkraftwerke durch den Absturz von Verkehrsflugzeugen*. Greenpeace e.V., November 2001. URL: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/greenpeace\\_studie\\_gefaehrdung\\_akw\\_durch\\_verkehrsflugzeuge.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/greenpeace_studie_gefaehrdung_akw_durch_verkehrsflugzeuge.pdf) (Abruf 21.03.2011).
- [Hirsch et al. 2004] Hirsch, Helmut; Becker, Oda; Neumann, Wolfgang : *Terrorangriffe auf deutsche Atomkraftwerke - Bewertung der Gegenmaßnahmen - Unter besonderer Berücksichtigung der Gegebenheiten an den Standorten Biblis und Brunsbüttel*. Greenpeace e.V., Hannover, April 2004. URL: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/greenpeace\\_studie\\_terrorangriffe\\_auf\\_deutsche\\_akw.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/greenpeace_studie_terrorangriffe_auf_deutsche_akw.pdf) (Abruf 21.03.2011).
- [Hohmeyer 1989] Hohmeyer, Olav : *Soziale Kosten des Energieverbrauchs* 2. Auflage, Berlin/Heidelberg, 1989.
- [Honnellio/Rydell 2005] Honnellio, Antonio L.; Rydell, Stan : *Sabotage vulnerability of nuclear power plants*. Int. J Nuclear Governance, Economy and Ecology, Vol. 1, No. 3, 2007.

- URL: <http://inderscience.metapress.com/app/home/content.asp?referrer=contribution&format=2&page=1&pagecount=0> (Abruf 22.03.2011).
- [IAEA 1992] International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.) : *Joint protocol relating to the application of the Vienna convention and the Paris Convention*. Mai 1992. URL: <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/infcirc402.pdf> (Abruf 15.03.2011).
- [IAEA a] International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.) : *INES*. URL: <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp> (Abruf: 22.02.2011).
- [IAEA b] International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.) : *User's Manual 2008 Edition*. URL: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/INES-2009\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/INES-2009_web.pdf) (Abruf 22.02.2011).
- [ICRP 1991] International Commission on Radiological Protection : *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP Vol. 21 No. 1-3, Pergamon Press, Oxford/New York/Seoul/Tokyo, 1991.
- [Informationskreis KernEnergie] Informationskreis KernEnergie (Hrsg.) : *Reaktortypen - Worum geht es?* URL: <http://www.kernfragen.de/kernfragen/technik/04-Reaktortypen/4-01-Worum-geht-es.php> (Abruf 23.02.2011).
- [Irrek 2008] Irrek, Wolfgang : *Kernenergie - Haftung und Versicherung in Deutschland*. Wuppertal Institut, 2008.
- [Kelle/Schaper 2001] Kelle, Alexander; Schaper, Annette : *Bio- und Nuklearterrorismus - Eine kritische Analyse der Risiken nach dem 11. September 2001*. Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung, Oktober 2001. URL: [http://www.google.de/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=OCBkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fse2.isn.ch%2Fserviceengine%2Ffiles%2FESDP%2F29709%2Fpublicationdocument\\_singledocument%2F964D5B25-35F0-4023-8991-2E964178D980%2Fde%2Frep1001.pdf&ei=7n6HTd0oKs3XsgaD\\_JGwAw&usq=AFQjCNESDDjTOZFXcqhG3mNWK5DwhUwCHQ](http://www.google.de/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=OCBkQFjAA&url=http%3A%2F%2Fse2.isn.ch%2Fserviceengine%2Ffiles%2FESDP%2F29709%2Fpublicationdocument_singledocument%2F964D5B25-35F0-4023-8991-2E964178D980%2Fde%2Frep1001.pdf&ei=7n6HTd0oKs3XsgaD_JGwAw&usq=AFQjCNESDDjTOZFXcqhG3mNWK5DwhUwCHQ) (Abruf 21.03.2011).
- [Konstantin 2007] Konstantin, Panos : *Praxisbuch Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [Kotting-Uhl 2010] Kotting-Uhl, Sylvia : *Entwicklung der Anzahl an Bauteildefekten in den 17 AKWs, die heute noch eine Betriebsgenehmigung haben*. Büro Kotting-Uhl, Deutscher Bundestag, 29.04.2010.
- [Krieger 2009] Krieger, Hanno : *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. 3. Auflage, Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.

- 
- [Küppers/Pistner 2007] Küppers, Christian; Pistner, Christoph : *Analyse des Bedrohungspotenzials „gezielter Flugzeugabsturz“ am Beispiel der Anlage Biblis-A*. Öko-Institut e.V. Darmstadt, 20. November 2007. URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/623/2007-163-de.pdf> (Abruf 21.03.2011).
- [Ladurner/Pham 2010] Ladurner, Ulrich; Pham, Khuê : *Stuxnet - Iran im Krieg 2.0*. Die Zeit Online, 30. September 2010. URL: <http://www.zeit.de/2010/40/Stuxnet-Computerwurm> (Abruf 23.03.2011).
- [Leadbetter et al. 1983] Leadbetter, Malcolm R.; Lindgren, Georg; Rootzén, Holger : *Extremes and Related Properties of Random Sequences and Processes*. Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin, 1983. ISBN: 3-540-90731-9.
- [LTBW 2009] Landtag Baden-Württemberg (Hrsg.) : *Antrag der Abg. Franz Untersteller u. a. GRÜNE und Stellungnahme des Umweltministeriums - Vertuschung eines Korruptionsfalls im Atomkraftwerk Philippsburg, Drucksache 14 / 4334*. 08. April 2009. URL: [http://www.landtag-bw.de/wp14/drucksachen/4000/14\\_4334\\_d.pdf](http://www.landtag-bw.de/wp14/drucksachen/4000/14_4334_d.pdf) (Abruf 22.03.2011).
- [Marcus 2006] Marcus, Jonathan : *Tough lessons for Israeli armour*. BBC News, 15. August 2006. URL: [http://news.bbc.co.uk/2/hi/middle\\_east/4794829.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/middle_east/4794829.stm) (Abruf 22.03.2011).
- [Nguyen 2007] Nguyen, Tristan : *Grenzen der Versicherbarkeit von Katastrophenrisiken - Erweiterungsmöglichkeiten durch Rückversicherung, Katastrophenanleihen und Versicherungsderivate*. Habilitationsschrift FernUniversität Hagen, 1. Auflage, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, Juni 2007.
- [Nguyen 2009] Nguyen, Tristan : *Versicherbarkeit von Katastrophenrisiken und staatliche Risikoübernahme*. WHL Wissenschaftliche Hochschule Lahr, Lahr, Februar 2009. URL: [http://www.akad.de/fileadmin/akad.de/assets/PDF/WHL\\_Diskussionspapiere/WHL\\_Diskussionspapier\\_Nr\\_21.pdf](http://www.akad.de/fileadmin/akad.de/assets/PDF/WHL_Diskussionspapiere/WHL_Diskussionspapier_Nr_21.pdf) (Abruf 25.03.2011).
- [Obiko Pearson/Bandel 2011] Obiko Pearson, Natalie; Bandel, Carolyn : *Atomic Cleanup Cost goes to Japan's Taxpayers, May Spur Liability Shift*. Artikel auf Bloomberg.com, 23. März 2011. URL: [http://www.bloomberg.com/news/2011-03-23/nuclear-cleanup-cost-goes-to-japan-s-taxpayers-may-spur-liability-shift.html?utm\\_source=newsletter&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=sendNuclearHeadlines](http://www.bloomberg.com/news/2011-03-23/nuclear-cleanup-cost-goes-to-japan-s-taxpayers-may-spur-liability-shift.html?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=sendNuclearHeadlines) (Abruf 25.03.2011).
- [OECD 2003] Organisation for Economic Co-operation and Development : *Nuclear Electricity Generation: What are the External Costs?*. 2003. ISBN 92-64-02153-1.
- [ORNL 1993] Oak Ridge National Laboratory ORNL/RFF : *Draft Report: Damages and benefits of the Fuel Cycle: Estimation Methods, Impacts and Values*. Oak Ridge, 1993.

- 
- [Ottinger et al. 1990] Ottinger, Richard L.; Wooley, David R.; Robinson, Nicholas A.; Hodas, David R.; Babb, Susan E.; Buchanan, Shepard C.; Chernick, Paul L.; Caverhill, Emily; Krupnick, Alan; Harrington, Winston; Radin, Seri; Fritsche, Uwe : *Environmental Costs of Electricity*. Oceana Publications Inc., New York, 1990.
- [Paulitz 2008] Paulitz, Henrik : *Das Atomkraftwerk Biblis B ist nicht für die am Standort möglichen Erdbeben ausgelegt - Eine „bestmögliche Gefahrenabwehr und Risikovorsorge“ nach dem Stand von Wissenschaft und Technik ist nicht gewährleistet, Anlage B der Klagebegründung zur Stilllegung des Atomkraftwerkblocks Biblis B in dem Verwaltungsstreitverfahren vor dem Hessischen Verwaltungsgerichtshof Lauerwald u.a. ./.* Land Hessen beigeladen: RWE Power AG - 6 C 164/08.T. Deutsche Sektion der Internationalen Ärzte für die Verhütung des Atomkrieges Ärzte in sozialer Verantwortung e.V. (IPPNW), August 2008. URL: [http://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Anlage\\_B\\_-\\_Biblis\\_B\\_ist\\_unzureichend\\_gegen\\_Erdbeben\\_ausgel...pdf](http://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/Anlage_B_-_Biblis_B_ist_unzureichend_gegen_Erdbeben_ausgel...pdf) (Abruf 23.03.2011).
- [Paulitz 2010] Henrik Paulitz : *AKW-Störfallauswertung der IPPNW*. International Physicians for the Prevention of Nuclear War (IPPNW), 2. Juni 2010. URL: [http://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/2010-06-02\\_AKW-Stoerfallauswertung\\_der\\_IPPNW.pdf](http://www.ippnw.de/commonFiles/pdfs/Atomenergie/2010-06-02_AKW-Stoerfallauswertung_der_IPPNW.pdf) (Abruf 21.03.2011).
- [Pick 2010] Pick, Ulrich : „*Stuxnet*“ *schlich sich auch ins Atomkraftwerk Buschehr*. Tagesschau.de, Nachrichten der ARD, 26. September 2010. URL: <http://www.tagesschau.de/ausland/stuxnet108.html> (Abruf 23.03.2011).
- [Posser/Schmans/Müller-Dehn 2002] Posser, Herbert; Schmans, Malte; Müller-Dehn, Christian : *Atomgesetz - Kommentar zur Novelle 2002*. Heymanns Taschenkommentare, Köln u.a., 2002. ISBN: 978-3-452-25274-6.
- [Reiss/Thomas 2007] Reiss, Rolf-Dieter; Thomas, Michael : *Statistical analysis of extreme values*. Birkhäuser, Basel Berlin, 2007. ISBN 3-7643-7230-3.
- [Roos 2010] Roos, Joachim : *ExternE - Introduction*. 5. Oktober 2010. URL: <http://www.externe.info/> (Abruf 25.03.2011).
- [Rosenbaum/Wagner 2006] Rosenbaum, Markus; Wagner, Fred : *Versicherungsbetriebslehre*. 3. Auflage, Verlag Versicherungswirtschaft GmbH, Karlsruhe, 2006. ISBN: 3-89952-238-9.
- [SÄBL 2011] Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hrsg.) : *Gebiet und Bevölkerung - Fläche und Bevölkerung*. 14. Februar 2011. URL: [http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de\\_jb01\\_jahrtab1.asp](http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb01_jahrtab1.asp) (Abruf 25.03.2011).
- [SBD 2010] Statistisches Bundesamt Deutschland (Hrsg.) : *Basisdaten Bruttoinlandsprodukt je Einwohner*. 19. Oktober 2010. URL: <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Internationales/>

---

InternationaleStatistik/Thema/Tabellen/Basistabelle\_\_BIPproKopf,  
templateId=renderPrint.psml (Abruf: 25.03.2011).

- [Schneider et al. 2009] Schneider, Mycle; Thomas, Steve; Groggatt, Antony; Koplow, Doug : *Der Welt-Statusreport Atomindustrie 2009 - Unter besonderer Berücksichtigung wirtschaftlicher Fragen*. im Auftrag des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Paris, Berlin, August 2009. URL: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/welt\\_statusbericht\\_atomindustrie\\_0908\\_de.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/welt_statusbericht_atomindustrie_0908_de.pdf) (Abruf 17.03.2011).
- [Schweizerischer Erdbebendienst 2011] Schweizerischer Erdbebendienst (Hrsg.) : *Seismologische Analyse der jüngsten Erdbebenkatastrophen in Neuseeland und Japan: 10 Rückschlüsse für die Schweiz*. 17. März 2011. URL: [http://www.seismo.ethz.ch/Earthquake\\_Talk\\_2011\\_03\\_17\\_de](http://www.seismo.ethz.ch/Earthquake_Talk_2011_03_17_de) (Abruf 23.03.2011).
- [Spiegelberg Planer 2010] Spiegelberg Planer, Rejane : *Public Communications: Communicating the safety significance of events - INES - Part 1*. International Atomic Energy Agency (IAEA), 24. November 2010. URL: [https://iaea.org/inis/nkm/nkm/pages/2010/NEM\\_Trieste\\_Italy\\_2010/topics/docs/Nov\\_24/3a\\_Spiegelberg\\_Public\\_Communications\\_INES.pdf](https://iaea.org/inis/nkm/nkm/pages/2010/NEM_Trieste_Italy_2010/topics/docs/Nov_24/3a_Spiegelberg_Public_Communications_INES.pdf) (Abruf 15.03.2011).
- [Spiegel-Online 2006] Spiegel-Online (Hrsg.) : *Dübel legen AKW Biblis lahm*. Spiegel Online Politik, 17. Oktober 2006. URL: <http://www.spiegel.de/politik/deutschland/0,1518,443082,00.html> (Abruf: 01.04.2011).
- [Spiegel-Online 2009] Spiegel-Online (Hrsg.) : *Das amerikanische Tschernobyl*. einestages - Zeitgeschichten auf Spiegel Online, 25. März 2009. URL: [http://einestages.spiegel.de/static/topicalbumbackground/3849/das\\_amerikanische\\_tschernobyl.html](http://einestages.spiegel.de/static/topicalbumbackground/3849/das_amerikanische_tschernobyl.html) (Abruf: 23.02.2011).
- [Steeb 2011] Niko Steeb : *Die vergessenen Erdbeben - Deutsche Atomkraftwerke in der Gefahrenzone*. Augsburger Allgemeine, 17. März 2011. URL: <http://www.augsburger-allgemeine.de/politik/Deutsche-Atomkraftwerke-in-der-Gefahrenzone-id14315666.html> (Abruf 23.03.2011).
- [Strahlenschutzkommission 1994] Strahlenschutzkommission (SSK) : *Ionisierende Strahlung und Leukämieerkrankungen von Kindern und Jugendlichen, Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 124. Sitzung der Strahlenschutzkommission*. 21. April 1994. URL: <http://www.ssk.de/de/werke/1994/volltext/ssk9401.pdf> (Abruf 25.03.2011).
- [Strahlenschutzkommission 2003] Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit : *Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen*. Berichte der

---

Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 37, Bonn, September 2003.

- [Stritar et al. 1993] Stritar, A.;Mavko, B.; Susnik, J.; Sarler, B. : *Some Aspects of Nuclear Power, Plant Safety under War Conditions*. Nuclear Technology, Vol. 101, Februar 1993, S. 193-201.
- [Stuttgarter Zeitung 2006] Stuttgarter Zeitung (Hrsg.) : *Schlüssel im Kernkraftwerk Philippsburg verschwunden*. Stuttgarter Zeitung, 29. März 2006.
- [UBA 2007] Umweltbundesamt (Hrsg.) : *Ökonomische Bewertung von Umweltschäden - Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten*. Dessau, 2007.
- [Umweltlexikon Online a] KATALYSE Institut für angewandte Umweltforschung e.V. (Hrsg.) : Umweltlexikon Online. URL: <http://www.umweltlexikon-online.de/RUradioaktivitaet/RadioaktivitaetundStrahlung.php> (Abruf am 25.03.2011).
- [UNSC 1988] United Nations Scientific Committee (Hrsg.) : *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation 1988 Report*. New York, 1988.
- [USNRC 2009] United States Nuclear Regulatory Commission (Hrsg.) : *Three Mile Accident, Backunder, United States Nuclear Regulatory Commission, Office of Public Affairs*. August 2009. URL: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.pdf> (Abruf 22.03.2011).
- [Weil 2003] Weil, Leopold : *Charakterisierung der Risiken der Kernenergienutzung*. Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Lehrgebiet Stilllegung von kerntechnischen Anlagen, Habilitationsschrift, Aachen, 2003. URL: [http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/AKE2004H/AKE2004H\\_Vortraege/AKE2004H\\_05Weil\\_Charakterisierung\\_derKernenergieRisiken/AKE2004H\\_05aWeil\\_habil2002\\_Risiken-derKernenergienutzung.pdf](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/AKE2004H/AKE2004H_Vortraege/AKE2004H_05Weil_Charakterisierung_derKernenergieRisiken/AKE2004H_05aWeil_habil2002_Risiken-derKernenergienutzung.pdf) (Abruf 15.03.2011).
- [Welt Online 2010] Welt Online (Hrsg.) : *Al-Qaida-Terrorist arbeitete in US-Atomkraftwerk*. 13. März 2010. URL: <http://www.welt.de/politik/ausland/article6754850/Al-Qaida-Terrorist-arbeitete-in-US-Atomkraftwerk.html> (Abruf 01.04.2011).
- [Wuppertal Institut 2007] Wuppertal Institut (Hrsg.) : *Kernenergie im energiepolitischen Zielreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit*. Wuppertal, März 2007. URL: [http://www.wupperinst.org/uploads/tx\\_wibeitrag/Kernenergie-FactSheet.pdf](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/Kernenergie-FactSheet.pdf) (Abruf 17.03.2011).

# Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Abb.	Abbildung
Abs.	Absatz
AFB	Allgemeine Bedingungen für die Feuerversicherung
KKW	Kernkraftwerk
Art.	Artikel
AtDeckV	Verordnung über die Deckungsvorsorge nach dem Atomgesetz (kurz: Atomrechtliche Deckungsvorsorge-Verordnung)
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (kurz: Atomgesetz)
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BIP	Bruttoinlandsprodukt
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
DeckRV	Verordnung über Rechnungsgrundlagen für die Deckungsrückstellungen (kurz: Deckungsrückstellungsverordnung)
DM	Deutsche Mark
DWR	Druckwasserreaktor
e.V.	eingetragener Verein
ECU	European Currency Unit
et al.	et alia (und andere)
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EW	Einwohner
ExternE	Externalities of Energy
f.	und folgende Seite
ff.	und folgende Seiten
GAU	größter anzunehmender Unfall

---

GbR	Gesellschaft bürgerlichen Rechts
ggf.	gegebenenfalls
GKN	Kernkraftwerk Neckarwestheim
Gy	Gray
Hrsg.	Herausgeber
i.H.v.	in Höhe von
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection (Internationale Strahlenschutzkommission)
INES	International Nuclear Event Scale
IQ	Intelligenzquotient
IT	Informationstechnologie
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
LNT	Linear-no-Threshold
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
mSV	Millisievert
MWe	MegaWatt electrical
Nr.	Nummer
o.ä.	oder ähnliches
OECD/NEA	Nuclear Energy Agency of the Organization for Economic Cooperation and Development
PJ	PetaJoule
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalysen
rem	roentgen equivalent in man
resp.	respektive
RODOS	Real-time On-line DecisiOn Support system for off-site emergency management
RPG	rutschnoi protiwotankowij granatomjot, (etwa: Hand-Granatwerfer zur Panzerabwehr)
S.	Seite
StrlSchV	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (kurz: Strahlenschutzverordnung)
Sv	Sievert
SWR	Siedewasserreaktor
TORCH	The Other Report on Chernobyl
u.a.	unter anderem

---

UdSSR	Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
URL	Uniform Resource Locator
USA	United States of America
US-Dollar	US-amerikanische Dollar
vgl.	vergleiche
vs.	versus
VSL	Value of a statistical Life
VVG	Gesetz über den Versicherungsvertrag (kurz: Versicherungsvertragsgesetz)
z.B.	zum Beispiel

# Symbolverzeichnis

$\text{€}$	Euro
$\mu Sv$	Mikrosievert
$\mathbb{P}$	Wahrscheinlichkeitsmaß
$X$	Schadenart (ist als Zufallsgröße zu verstehen)
$X_i, Y$	Zufallsgrößen, wobei $i = 1, \dots, n$
$X_{(i)}$	Ordnungsstatistik bzgl. der Zufallsgröße $X_i$
$n$	natürliche Zahl
$\min(X_1, \dots, X_n)$	minimalster Wert von $X_1$ bis $X_n$
$\max(X_1, \dots, X_n)$	maximalster Wert von $X_1$ bis $X_n$
$\mathbb{P}(X)$	Wahrscheinlichkeit von $X$
$F$	Verteilungsfunktion
$f$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von $F$
$m_n$	$n$ -tes Moment
$\mu_n$	$n$ -tes zentrales Moment
$\mathbb{E}X$	Erwartungswert der Zufallsgröße $X$
$\sigma(X)$	Standardabweichung der Zufallsgröße $X$ , auch Streuung genannt
$Var(X)$	Varianz der Zufallsgröße $X$ , entspricht $\sigma^2$
$VarK(X)$	Variationskoeffizient der Zufallsgröße $X$
$\nu(X)$	Schiefe der Zufallsgröße $X$
$f_{Beta}$	Dichte der Betaverteilung auf dem Intervall $[0, 1]$
$B(\alpha, \beta)$	Betafunktion im Intervall $[0, 1]$ bezüglich der Parameter $\alpha$ und $\beta$
$f_{Beta,[a,b]}$	Dichte der Betaverteilung auf dem Intervall $[a, b]$
$B(a, b, \alpha, \beta)$	allgemeine Betafunktion im Intervall $[a, b]$ bezüglich der Parameter $\alpha$ und $\beta$
$\Gamma(\alpha)$	Gammafunktion von $\alpha$
$\nu_n$	Extremenschadenerwartung
$\varsigma_n$	Standardabweichung des Extremenschadens

# Glossar

## **Aktivität / Radioaktivität**

Aktivität ist die Anzahl der pro Zeiteinheit in einem radioaktiven Stoff auftretenden Kernumwandlungen. Die Maßeinheit der Aktivität ist das Becquerel (Kurzzeichen: Bq), mit der die Anzahl der radioaktiven Kernumwandlungen pro Sekunde angegeben wird. Da die Radionuklide in Stoffmengen unterschiedlicher Konfiguration enthalten sein können, wird die Aktivitätsangabe auch häufig auf diese bezogen, z.B. Becquerel pro Gramm (Bq/g) in Feststoffen, Becquerel pro Liter (Bq/l) in Flüssigkeiten oder Becquerel pro Kubikmeter (Bq/m<sup>3</sup>) in Luft. Die alleinige Angabe der Aktivität ohne Kenntnis des Radionuklids lässt keine Aussage über die Strahlenexposition zu.

## **Alpha-, Beta- und Gammastrahlen**

Manche Atomkerne von chemischen Elementen sind instabil und zerfallen deshalb. Sie werden als radioaktiv bezeichnet. Die Zerfallsprozesse können unterschiedlicher Natur sein. Die Strahlung, die zerfallende Elemente aussenden, wird in drei Arten unterschieden: Während Alpha- und Betastrahlung aus Partikeln bestehen, handelt es sich bei Gammastrahlung um elektromagnetische Wellen, ähnlich der Röntgenstrahlung. Allerdings ist ihre Wellenlänge viel kleiner und die Strahlen sind somit extrem energiereich. Alphastrahlung besteht aus positiv geladenen Helium-Kernen, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen aufgebaut sind. Betastrahlen bestehen aus Elektronen. Sie entstehen, wenn sich ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umwandelt, das vom Atomkern abgestrahlt wird.

## **Äquivalentdosis**

Äquivalentdosis die Messgröße für die biologische Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen. Gemessen wird die Äquivalentdosis in Joule/Kg bzw. Sievert.

## **Atompool**

Die deutsche Kernreaktor-Versicherungsgemeinschaft (DKVG) ist eine Versicherungsgemeinschaft, welche in Form eines Pools Haftpflicht- und Sachversicherungsschutz gegen die mit der Errichtung und dem Betrieb von Kernreaktoren und ähnlichen Anlagen verbundenen Gefahren bietet.

## **Auslegungsstörfall**

Auslegungsstörfälle eines KKW sind Unfälle, für deren Beherrschung die Sicherheitssysteme noch ausgelegt sein müssen. Außerhalb der Anlage dürfen bei ihrem Eintritt die nach der Strahlenschutzverordnung geltenden Störfallgrenzwerte der Strahlenbelastung nicht überschritten werden.

## **Becquerel**

Einheit der Aktivität: Eine Substanz ist dann radioaktiv, wenn sie zerfällt und dabei Strahlung aussendet. Um anzugeben, wie stark eine radioaktive Substanz strahlt, benutzt man den Begriff der Aktivität ( $A$ ). Sie wird in Becquerel (Bq) gemessen und gibt die Strahlung an, die eine Substanz innerhalb einer bestimmten Zeit durch Zerfall erzeugt. Per Definition entspricht ein Becquerel einem Zerfall pro Sekunde. Je schneller eine Probe zerfällt, desto intensiver strahlt sie also.

## **Bereitstellungszeitraum**

Ist der angenommene Zeitraum, nach dem die Auswirkungen des Schadenereignisses durch die Versicherung abgedeckt werden können.

## **Betaverteilung**

Die Betaverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über dem Intervall  $[0, 1]$ . Die allgemeine Betaverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über dem beliebigen Intervall  $[a, b]$ .

## **Brennelement**

Anordnung, in der eine Vielzahl von Brennstäben zu einer Baueinheit zusammengefasst sind und mit der der Kernbrennstoff in den Kernreaktor eingesetzt wird.

## **Brennstab**

Geometrische Form, in der Kernbrennstoff, ummantelt mit Hüllmaterial, in einem Reaktor eingesetzt wird. Meistens werden mehrere Brennstäbe zu einem Brennelement (BE) zusammengefasst. Beim Kernkraftwerk Krümmel mit einem Siedewasserreaktor bilden 72 Brennstäbe ein Brennelement, beim Druckwasserreaktor des Kernkraftwerks Emsland sind 300 Brennstäbe zu einem Brennelement zusammengefasst.

## **Deckungssumme**

Wird auch als Versicherungssumme bezeichnet. Es handelt sich hierbei um den nach versicherungsmathematischen Grundsätzen ermittelten Kapitalwert der bestehenden Verpflichtungen zur Zahlung von Versicherungsleistungen und Rückgewährbeträgen in der Lebens-, Kranken-, Haftpflicht- und Unfallversicherung.

## **Druckwasserreaktor (DWR)**

Bei Druckwasserreaktoren wird das Wasser durch den vorherrschenden Druck nicht verdampft, sondern das im flüssigen Aggregatzustand bleibende Wasser heizt einen weiteren Wasserkreislauf an und der dabei entstehende Dampf treibt die Turbinen an.

## **effektive Dosis**

Diese Dosis berücksichtigt die verschiedenen Empfindlichkeiten der Organe und Gewebe bezüglich stochastischer Strahlenwirkungen durch die Multiplikation spezifizierten Organdosen mit einem Gewebe-Wichtungsfaktor. „Die effektive Dosis erhält man durch Summation der gewichteten Organdosen aller spezifizierten Organe und Gewebe, wobei die Summe der Gewebe-Wichtungsfaktoren 1 ergibt. Die Gewebe-Wichtungsfaktoren bestimmen sich aus den relativen Beiträgen der einzelnen Organe und Gewebe zum gesamten stochastischen Strahlenschaden (Detriment) des Menschen bei homogener Ganzkörperbestrahlung. Die Einheit der effektiven Dosis ist J/kg mit dem speziellen Namen Sievert (Sv).“

## **Eingreifrichtwert**

Bei Unfallsituationen wird die Dosis durch sogenannte Eingreifrichtwerte begrenzt. Diese dienen einerseits der Planung von Maßnahmen des Katastrophenschutzes und stellen andererseits die Obergrenzen dar, die die Durchführung dieser Maßnahmen in einer Unfallsituation zwingend im Sinne des Katastrophenschutzes begründen.

## **Energiedosis**

Diese Dosis gibt die absorbierte Strahlungsenergie pro Masse an. Sie wird angegeben in Joule pro Kg bzw. Gy (Gray).

## **Erstversicherung**

Ist ein Versicherungsgeschäft zwischen Unternehmen und natürlichen Personen einerseits und Versicherern andererseits, es wird auch selbst abgeschlossenes oder „direktes Geschäft“ genannt.

## **erwarteter Leistungsbarwert**

Ist der Deckungsbeitrag für die erwarteten Schadenkosten des Risikos, d.h. die erwartete Höhe der Versicherungsverpflichtungen.

## **Erwartungswert / Schadenerwartungswert**

Der mit den Wahrscheinlichkeiten gewichtete Durchschnitt aller Ergebnismöglichkeiten. Der Schadenerwartungswert ist der Erwartungswert aller möglichen Schäden.

## **Extremwerttheorie / Extremwertstatistik**

Die Extremwerttheorie beschäftigt sich mit den maximalen bzw. minimalen Werten von Stichproben.

## **GAU**

Abkürzung für größter anzunehmender Unfall. Umgangssprachlich wird insbesondere in Bezug auf die Folgen von Auslegungsstörfällen bzw. auslegungsüberschreitenden Störfällen häufig vom GAU gesprochen.

## **Gray**

Einheit der Energiedosis: Weiß man, wie stark eine radioaktive Substanz strahlt, sagt das noch nichts darüber aus, wie sich die Strahlung auf den Körper auswirkt. Dafür ist es wichtig zu bestimmen, wie viel Energie von einer bestimmten Masseneinheit des Körpers absorbiert wird. Angegeben wird die absorbierte Energiedosis (D) in der Einheit Gray (Gy), wobei ein Gray der Energiemenge von einem Joule pro Kilogramm entspricht.

## **Fahrlässigkeit**

Nach § 276 Abs. 2 BGB ist Fahrlässigkeit das Außer-Acht-Lassen „der im Verkehr erforderlichen Sorgfalt“. Die Fahrlässigkeit grenzt sich vom Vorsatz dadurch ab, dass die Folge der Handlung nicht willensmäßig herbeigeführt worden ist. Damit Fahrlässigkeit überhaupt vorliegen kann, bedarf es der Vermeidbarkeit, der Vorausssehbarkeit des rechts- beziehungsweise pflichtwidrigen Handelns und der sich daraus ergebenden Folge. Darüber hinaus muss ein alternatives Verhalten in der jeweiligen Situation zumutbar sein. Der Fahrlässigkeitsmaßstab ist die objektive erforderliche Sorgfalt, nicht die übliche Sorgfalt.

Das Zivilrecht unterscheidet zwei Arten der Fahrlässigkeit. Grobe Fahrlässigkeit liegt vor, wenn die erforderliche Sorgfalt im besonderen Maße nicht beachtet wurde. Die einfache Fahrlässigkeit liegt vor, wenn die erforderliche Sorgfalt nicht beachtet werden konnte bzw. nicht mit absichtlicher Unachtsamkeit beachtet wurde.

## **Haftung und Gefährdungshaftung**

Unter Haftung versteht man im engeren Sinne das Unterworfensein eines Rechtssubjekts unter den Vollstreckungszugriff des Staates (staatliche Gewalt).

In einem weiteren Sinn bezeichnet Haftung die Übernahme eines Schadens durch einen anderen als den unmittelbar Betroffenen, also die Verpflichtung zum Schadensersatz (Haftpflicht).

Gefährdungshaftung ist die Haftung für Schäden, welche sich aus einer erlaubten Gefahr (z. B. Betrieb einer gefährlichen Einrichtung, Halten eines Haustieres) ergeben. Im Unterschied zur Haftpflicht wegen unerlaubter Handlung kommt es bei einer Gefährdungshaftung auf die Widerrechtlichkeit der Handlung oder ein Verschulden des Schädigers nicht an.

## **Haftungsgrenze**

Wer einen Unfall verschuldet, haftet unbegrenzt. In der Gefährdungshaftung, wenn also kein Verschulden vorliegt, gelten bestimmte Haftungsgrenzen.

## **Haftpflichtversicherung**

Eine Haftpflichtversicherung ist ein Versicherungsvertrag, der einen Versicherer zum Ausgleich von Vermögensnachteilen infolge der gegen den Versicherungsnehmer gerichteten Schadensersatzansprüche verpflichtet. Ein Anspruch auf Versicherungsleistungen besteht, wenn der Versicherungsnehmer eine Sorgfaltspflicht schuldhaft verletzt hat (deliktische Haftung) bzw. sich gefahrerhöhend verhalten hat (Gefährdungshaftung) und dadurch einem Dritten Schaden zugefügt hat. Eine Haftpflichtversicherung kann in Form einer unbegrenzten Interessenversicherung, die keinerlei Begrenzung der Versicherungssumme vorsieht oder in Form einer Erstrisikoversicherung, bei der eine obere Leistungsgrenze für den Schadenersatz festgelegt wird, auftreten. Vorgeschrieben ist auch eine Haftpflichtversicherung für Atomanlagen, Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe, eine Haftpflichtversicherung für Flugzeuge und für bestimmte Berufe (Wirtschaftsprüfer, Steuerberater, Notare, Schausteller, Jäger). Ärzte, Zahnärzte, Tierärzte, Apotheker u. a. können sich der Mitgliedschaft in berufsständischen Versorgungseinrichtungen nicht entziehen.

## **INES**

Die Internationale Bewertungsskala für nukleare Ereignisse (Abkürzung INES von engl. International Nuclear Event Scale) ist eine Festlegung für sicherheitsrelevante Ereignisse, im speziellen Störfälle und Atomunfälle in kerntechnischen Anlagen, insbesondere für solche, die die Sicherheit von Kernkraftwerken betreffen. Diese Bewertungsskala wird in 8 INES-Stufen (Stufe 0 bis Stufe 7) gegliedert.

## **Kalkulationszeitraum**

Ist der angenommene Zeitraum, in dem das Schadenereignis theoretisch einmal eintritt.

## **Kandidaten**

Hierbei handelt es sich um Näherungen für einen bestimmten Wert, sogenannte Schätzer.

## **Kapitalanlagen**

Die Versicherer, insbesondere die Lebensversicherungsunternehmen, haben das zur Erfüllung ihrer Verpflichtungen angesammelte Vermögen nach den Vorschriften des Versicherungsaufsichtsgesetzes (VAG) sicher, rentabel und liquide anzulegen. Sie sind dabei zu einer angemessenen Mischung und Streuung der Anlagen verpflichtet.

## **Katastrophe**

Eine Katastrophe im versicherungstechnischen Sinn ist eine länger andauernde und meist großräumige Schadenlage, die mit der normalerweise vorgehaltenen Gefahrenabwehr (Feuerwehr, Rettungsdienst, Polizei) nicht angemessen bewältigt werden kann und die nur mit überregionaler (oder internationaler) Hilfe und zusätzlichen Ressourcen (Militär sowie nicht-organisierte Bevölkerungsteile) unter Kontrolle gebracht werden kann.

## **Kernspaltung**

Spaltung schwerer Atomkerne durch Beschuss mit Neutronen, wobei große Energiemengen freigesetzt werden. Bei der Kernspaltung entstehen jeweils zwei mittelgroße Kerne, die radioaktiven Spaltprodukte. Außerdem werden neue Neutronen frei, die weitere Kernspaltungen auslösen können. Kernspaltung kann auch spontan, d.h. ohne Anregung von außen auftreten. Die in KKW auftretende Kernspaltung ist hingegen kontrolliert.

## **Kernkraftwerk**

Wird abgekürzt mit KKW, auch als Atomkraftwerk bezeichnet. Ist ein Wärmekraftwerk, überwiegend zur Stromversorgung, bei dem die bei der Kernspaltung in einem Reaktor freigesetzte Kernbindungsenergie in Wärme und über einen Wasser-Dampf-Kreislauf mittels Turbine und Generator in elektrische Energie umgewandelt wird.

## **Kollektivdosis**

Die Kollektivdosis wird verwendet, um die Gesamtstrahlenbelastung von Bevölkerungsgruppen (Kollektiv) anzugeben. Den Annahmen eines linearen Zusammenhangs folgend, nach denen es gleichbedeutend ist, ob eine kleine Zahl von Personen eine hohe Dosis erhält oder eine große Zahl eine sehr kleine, lässt sich aus der Summe der Individualdosen die Kollektivdosis einer Bevölkerungsgruppe berechnen, indem das Produkt aus dem Mittelwert der effektiven Äquivalentdosis in dieser Bevölkerungsgruppe und der Anzahl der Personen dieser Gruppe gebildet wird. Die Kollektivdosis in einer Bevölkerung ist die Summe der Kollektivdosen der einzelnen Bevölkerungsgruppen und wird in Personen-Sievert angegeben. Die Kollektivdosis in einer Bevölkerung ist die Summe der Kollektivdosen der einzelnen Bevölkerungsgruppen.

## **Kompositversicherer**

Versicherungsunternehmen, das verschiedene Zweige der Schadenversicherung (einschließlich Unfallversicherung) betreibt. Im Gegensatz dazu Unternehmen der Lebens-, Kranken-, Rechtsschutz und Kreditversicherung.

## **Kreditversicherung**

Diese schützt den Versicherungsnehmer vor dem Ausfall versicherter Forderungen aus Warenlieferungen und Dienstleistungen aufgrund der Zahlungsunfähigkeit seiner Abnehmer. Zum weiteren Umfeld der Kreditversicherung zählen ferner die Kautionsversicherung sowie die Vertrauensschadenversicherung.

## **Kumulschaden**

Als Kumul bezeichnete man mehrere beim selben Versicherungsunternehmen versicherte oder rückversicherte Risiken, die von einem Schadenereignis gemeinsam betroffen werden können. Beispiel: 1. Feuerversicherung: Auf benachbarte Gebäude übergreifende Brände oder die gemeinsame

Betroffenheit von Feuerversicherung und Feuer-Betriebsunterbrechungsversicherung. 2. Sturmversicherung und sonstige Elementarschadenversicherungen: Räumliche Kumule können innerhalb der Zugrichtung eines Sturms, innerhalb eines Erdbebengebietes oder entlang eines Flusses eintreten.

### **nukleares Ereignis**

Jedes einen Schaden verursachende Geschehnis, sofern es oder dessen Schaden von radioaktiven Eigenschaften oder einer Verbindung radioaktiver Eigenschaften mit giftigen, explosiven oder sonstigen gefährlichen Eigenschaften von Kernbrennstoffen bzw. radioaktiven Erzeugnissen oder Abfällen oder von den von einer anderen Strahlenquelle innerhalb der Kernanlage ausgehenden ionisierenden Strahlungen herrührt.

### **nuklearer Katastrophenfall**

Ein nuklearer Katastrophenfall ist ein auslegungsüberschreitender Unfall und damit gleichsam eine Realisation des verbleibenden Restrisikos. Mit Restrisiko wird das Risiko bezeichnet, das die getroffenen Sicherheitsvorkehrungen übersteigt bzw. das bei deren Aufstellung nicht mit berücksichtigt und bewusst oder unbewusst eingegangen wurde. In der Presse wird der nukleare Katastrophenfall oft mit dem Begriff Super-GAU bezeichnet; der Zusatz „Super“ deutet an, dass dieser Unfall über einen GAU hinausgehende Auswirkungen nach sich zieht.

### **Personen-Sievert**

Einheit für die Kollektivdosis in einer Bevölkerung.

### **Pflichtversicherung**

Pflicht zum Abschluss einer Versicherung aufgrund eines Gesetzes oder einer Satzung. So muss jeder Kraftfahrzeughalter eine Haftpflichtversicherung abschließen (§ 1 Pflichtversicherungsgesetz für Kfz-Halter).

### **Rechnungszins**

Für die Bilanz der Versicherungsunternehmen werden jährlich die anteiligen Leistungsverpflichtungen ermittelt. Bei dieser Berechnung wird ein kalkulatorischer Zins, der Rechnungszins angesetzt, der bei Vertragsabschluss entsprechend der Deckungsrückstellungsverordnung festgelegt wird. Der gesetzlich vorgeschriebene Höchstrechnungszins liegt derzeit bei 2,25 Prozent und wird ab 2012 auf 1,75 Prozent gesenkt.

### **reine Risikoprämie**

Die reine Risikoprämie entspricht dem Deckungsbeitrag für die erwarteten Schadenkosten des Risikos.

**Rem**

Ist die ehemalige Einheit für Sievert. Dabei entspricht  $1 \text{ Rem} = 0,01 \text{ Sievert}$ .

**Risiko**

Qualitative und/oder quantitative Charakterisierung eines Schadens hinsichtlich der Möglichkeit seines Eintreffens (Eintrittswahrscheinlichkeit) und der Tragweite der Schadenswirkung (Schadensausmaß).

**Sicherheitszuschlag**

Der Sicherheitszuschlag dient als Deckungsbeitrag für mögliche Überschäden - aufgrund der Streuung der erwarteten Schäden.

**Rückversicherung**

Entlastet den Erstversicherer; Teile des vom Kunden übernommenen Risikos werden auf einen Rückversicherer gegen Zahlung eines Rückversicherungsbeitrags abgewälzt, vereinfacht „Versicherung der Versicherer“.

**Schaden**

Schaden ist ein Nachteil durch Minderung oder Verlust an Gütern und damit das Gegenteil von Nutzen oder auch negativer Nutzen. Schaden kann materiell oder immateriell sowie tatsächlich oder erwartet sein.

**Schadenversicherung**

Bei der Schadenversicherung ist der Versicherer verpflichtet, den durch den Versicherungsfall eingetretenen Vermögensschaden nach Maßgabe des Versicherungsvertrages zu ersetzen (§ 1 Abs. 1 Satz 1 VVG a.F.). Entscheidend für die Höhe der Versicherungsleistung ist der konkret zu berechnende Schaden, welcher durch die Versicherungssumme begrenzt ist.

**Siedewasserreaktor (SWR)**

Bei Siedewasserreaktoren wird der durch Verdunsten des Kühlwassers entstehende Wasserdampf direkt zum Antrieb der Turbinen genutzt.

**Sievert**

Ist die Einheit der Äquivalentdosis für den Menschen. Da 1 Sievert eine relativ große Äquivalentdosis darstellt, werden praktisch vorkommende Werte meist mit Hilfe eines SI-Präfixes in Millisievert oder Mikrosievert angegeben. 1 Sievert (Sv) sind 1000 Millisievert (mSv). 1 Millisievert sind 1000 Mikrosievert ( $\mu\text{Sv}$ ).

## **Sievert pro Zeit**

Einheit der Strahlenbelastung: Um die Auswirkungen von radioaktiver Strahlung auf den Körper genauer einschätzen zu können, ist es wichtig zu wissen, wie lange eine bestimmte Dosis auf den Körper einwirkt. Daher wird die Strahlenbelastung meist in Sievert pro Zeiteinheit gemessen. Also etwa Millisievert pro Jahr oder Mikrosievert pro Stunde. Die durchschnittliche natürliche Strahlenbelastung liegt in Deutschland bei 2,1 Millisievert pro Jahr, also 0,24 Mikrosievert pro Stunde. Im Schnitt kommen zwei Millisievert pro Jahr durch künstliche Quellen von Radioaktivität hinzu. Den Löwenanteil dazu steuert die Medizin bei.

## **Störfall**

Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Betrieb der Anlage oder die Tätigkeit aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann und für den die Anlage auszulegen ist oder für den bei der Tätigkeit vorsorglich Schutzvorkehrungen vorzusehen sind.

## **Streuung**

Auch als Standardabweichung bezeichnet. Sie beschreibt die Streubreite einer Wahrscheinlichkeitsverteilung um einen Lageparameter.

## **Stromerzeugung**

Unter Stromerzeugung versteht man umgangssprachlich die Erzeugung elektrischer Energie. Physikalisch gesehen ist dies immer eine Umwandlung von Energie aus verschiedenen Energiequellen in elektrische Energie. Die elektrische Energie wird dann zumeist über ein Stromnetz zu den angeschlossenen Geräten geleitet, um deren Strombedarf zu decken. Der Großteil der Stromerzeugung geschieht im industriellen Maßstab in Kraftwerken.

Der Begriff „Nettostromerzeugung“ bezeichnet dabei genauer die Differenz zwischen der insgesamt erzeugten Energiemenge (Bruttostromerzeugung) und dem Eigenbedarf der verschiedenen Kraftwerke. Beispielsweise liegt der Eigenbedarf von Kohlekraftwerken bei etwa 10 Prozent und der von Kernkraftwerken um die 5 Prozent der von ihnen selbst erzeugten Energie.

## **Summenversicherung**

Ist das Gegenstück zur Schadensversicherung. Der Versicherungsgeber verpflichtet sich bei Summenversicherungen im Versicherungsfall exakt die vereinbarte Leistung zu erbringen.

## **Unfall**

Ereignisablauf, der für eine oder mehrere Personen eine effektive Dosis von mehr als 50 mSv zur Folge haben kann.

### **versicherte Gefahr**

Art der Gefahr (z.B. Elementargefahren, Brand, Explosion, Diebstahl), die durch den Versicherungsschutz gedeckt ist. Versicherte Gefahren sind die in den jeweiligen Versicherungsvertrag einbezogenen und bedingungsgemäß gedeckten Gefahren. Konkret ist eine Versicherte Gefahr das Ereignis, dessen Eintritt den Versicherungsfall auslöst. Versicherte Gefahren werden im Versicherungsvertrag beschrieben.

### **versichertes Risiko**

Das versicherte Risiko ist die Bezeichnung des versicherten Gegenstandes in der jeweiligen Versicherung, in der Lebensversicherung also die versicherte Person.

### **Versicherung**

Leistungsversprechen für den Schadenfall, bspw. in der Lebensversicherung für den Todes- und Erlebensfall. Die Unternehmen der Versicherungswirtschaft nehmen ihren privaten und gewerblichen Kunden Risiken ab und ermöglichen planvolles Wirtschaften. Im Gegenzug zahlen die Versicherungsnehmer eine entsprechende Versicherungsprämie.

### **versicherungsmathematisches Äquivalenzprinzip**

Gemäß dem versicherungsmathematischen Äquivalenzprinzip bemisst sich die Versicherungsprämie nach der Art und Größe des Risikos oder der entsprechenden Risikogruppe.

### **Versicherungsnehmer**

Person, die mit dem Versicherer einen Versicherungsvertrag abgeschlossen hat und den Versicherungsbeitrag schuldet. Muß nicht mit dem Versicherten oder Bezugsberechtigten identisch sein.

### **Versicherungspool**

Ein Versicherungspool wird von Versicherern als eine Art Rückversicherung zur Deckung großer oder schwer kalkulierbarer Risiken, z. B. für Atom- oder Terrorismus-Katastrophen gebildet. Die Versicherer verpflichten sich, alle im Poolvertrag bezeichneten Risiken nach einem vorher festgelegten Beteiligungsschlüssel zu zeichnen. Üblicherweise werden Pools zur Deckung großer oder schwer kalkulierbarer Risiken gegründet. Die Einzelrisiken stehen bei der Gründung des Pools noch nicht fest. Jeweils ein Versicherer versichert einen Versicherungsnehmer und zediert das Risiko an den Pool. Jedes Poolmitglied ist an jedem Risiko des Pools beteiligt.

### **Versicherungsprämie**

Die Versicherungsprämie, welcher häufig auch als „Prämie“ bezeichnet wird, ist der Preis für den Versicherungsschutz. Sie ist meist jährlich zu zahlen. Bestandteile der Versicherungsprämie sind neben der reinen Risikoprämie der Sicherheitszuschlag, der Betriebskostenzuschlag, der Deckungsbeitrag für die Versicherungssteuer sowie der Gewinnzuschlag.

**Wagnis**

Als Wagnis wird der vom Versicherungsunternehmen übernommene Teil des bestehenden gesamten Risikos mit all seinen Gefahren und möglichen Schäden bezeichnet. Da Versicherer in den Verträgen meist gewisse Gefahren und Schäden, wie u.a. Schäden aufgrund von Krieg, Atomunfall oder Computerviren ausschließen, sind Wagnis und Risiko oft nicht deckungsgleich.

**Wahrscheinlichkeitsverteilung**

In der Wahrscheinlichkeitstheorie gibt die Wahrscheinlichkeitsverteilung an, wie sich die Wahrscheinlichkeiten auf die möglichen Zufallsergebnisse, insbesondere die möglichen Werte einer Zufallsvariablen, verteilen.