

Arbeitsbericht/Working Paper

**Die Risiken der
Kernenergie in
Deutschland im
Vergleich
mit Risiken anderer
Stromerzeugungs-
technologien**

**P. Preiss, S. Wissel,
U. Fahl, R. Friedrich, A. Voß**

Bericht Nr. 11

Februar 2013

Inhaltsangabe

1	EINLEITUNG	1
1.1	BEGRIFFLICHKEITEN.....	2
1.2	ÜBERSICHT UND AUFBAU DES ARBEITSBERICHTS	3
2	METHODEN ZUR BERECHNUNG DER UMWELT- UND GESUNDHEITSAUSWIRKUNGEN	4
2.1	QUANTIFIZIERUNGSVERFAHREN ZUR BERECHNUNG DER UMWELT- UND GESUNDHEITSSCHÄDEN IM NORMALBETRIEB	4
2.1.1	<i>Berechnung der Gesundheitsschäden</i>	<i>4</i>
2.1.2	<i>Berechnung der Umweltschäden.....</i>	<i>10</i>
2.2	QUANTIFIZIERUNGSVERFAHREN ZUR BERECHNUNG DER RISIKEN DURCH SCHWERE UNFÄLLE.....	10
2.2.1	<i>Berechnung der Umwelt und Gesundheitswirkungen schwerer Unfälle.....</i>	<i>11</i>
2.2.2	<i>Monetäre Bewertung der Umwelt und Gesundheitswirkungen schwerer Unfälle.....</i>	<i>12</i>
3	UMWELT- UND GESUNDHEITSAUSWIRKUNGEN IM NORMALBETRIEB	13
3.1	GESUNDHEITSSCHÄDEN DURCH DEN NORMALBETRIEB VON STROMERZEUGUNGSSYSTEMEN	13
3.2	SCHADENSKOSTEN DURCH DEN NORMALBETRIEB VON STROMERZEUGUNGSSYSTEMEN	15
4	UMWELT- UND GESUNDHEITSRISIKEN DURCH SCHWERE UNFÄLLE	17
4.1	RISIKOABSCHÄTZUNG SCHWERER UNFÄLLE BEI KERNKRAFTWERKEN	17
4.2	RISIKEN DURCH SCHWERE UNFÄLLE IN DEN ANDEREN STROMERZEUGUNGSSYSTEMEN	22
5	ZUSAMMENFASSUNG.....	25
5.1	ERGEBNISSE DER QUANTIFIZIERUNG DER SCHADENSKOSTEN	25
5.2	SCHLUSSFOLGERUNG	26
6	LITERATUR.....	29
7	ANHANG	31

1 Einleitung

Seit der schweren Reaktorkatastrophe in Fukushima an der Ostküste Japans wird weltweit intensiv über die weitere sichere Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung diskutiert. Aufgrund teilweise schon bestehender gesellschaftlicher Zweifel und in Folge dieses Unfalls haben die Regierungen der europäischen Länder Belgien, Deutschland und der Schweiz den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen. Für Deutschland wird der Ausstieg aus der Kernenergie mit den vermeintlich hohen Risiken bzw. dem Restrisiko der Atomenergie begründet. Die von der deutschen Bundesregierung berufene Ethik Kommission (Ethik-Kommission 2011) stellt in ihrem Bericht dazu fest: „Die Risiken der Kernenergie haben sich mit Fukushima nicht verändert, wohl aber die Risikowahrnehmung“ und empfiehlt den schnellen Kernenergieausstieg, weil „die Kernenergie durch risikoärmere Technologien ökologisch, wirtschaftlich und sozial verträglich“ ersetzt werden kann und verweist dabei explizit auf „die Stromerzeugung aus Wind, Sonne, Wasser, Geothermie und Biomasse“.

Angesichts der bereits im Vorfeld von Fukushima umstrittenen Faktenlage zur Einordnung der Umwelt- und Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme, sowie der wirtschaftlichen Risiken der nuklearen Stromerzeugung im Vergleich zu anderen Technologien, ist es Ziel dieses Berichtes, einen Überblick zu den Risiken, die mit den einzelnen Stromerzeugungstechnologien verbunden sind, zu geben.

Die Gesundheits- und Umweltrisiken der Stromerzeugungssysteme können unter anderem mithilfe von Ökobilanzen und Wirkungsabschätzungen (Wirkungspfadansatz) und Risikoanalysen quantifiziert werden.

Mit dem im Folgenden dargestellten Vergleich der Risiken heute verfügbarer Stromerzeugungssysteme soll untersucht werden, ob die Feststellung eines ethisch gebotenen zügigen Ausstieges aus der Nutzung der Kernenergie aufgrund risikoärmerer Alternativen gut begründet ist. Hierbei werden vorhandene Studien zu diesem Thema gesichtet, die Ergebnisse zusammengeführt und ergänzende Berechnungen zur Risikoabschätzung der jeweiligen Stromerzeugungstechnologien durchgeführt.

Im Mittelpunkt dieses Berichtes steht die Gegenüberstellung der Umwelt- und Gesundheitseffekte der Kernenergie mit jenen der heute wichtigsten anderen Stromerzeugungstechnologien. Die hier betrachteten Stromerzeugungstechnologien sind:

- Nukleare Stromerzeugung
 1. Druckwasserreaktor

- Fossile Stromerzeugungstechnologien
 1. Braunkohle-Dampfkraftwerk
 2. Steinkohle-Dampfkraftwerke
 3. Erdgas-Kombi-Kraftwerk (GuD)

- Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energien
 1. Wind onshore und offshore
 2. Solarenergie (Photovoltaik)
 3. Wasserkraft

1.1 Begrifflichkeiten

Die Gesamtrisiken von technischen Systemen und somit auch von Stromerzeugungssystemen werden als Summenprodukt aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten und dem jeweiligem Schadensausmaß erfasst.

Die durchschnittlichen Schadenskosten in Euro pro kWh_{el} Strom einer bestimmten Technologie ergeben sich nach folgender Formel:

$$\frac{EUR}{kWh_{el}} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i \cdot p_i}{\sum kWh_{el}}$$

wobei D_i die Umwelt- und Gesundheitsschäden darstellen, die im Normalbetrieb und im Rahmen von Unfällen entstehen, und p_i deren jeweilige Wahrscheinlichkeit pro Jahr ist.

Mithilfe dieser Formel können die zwei Größen (Eintrittswahrscheinlichkeiten und Schadensausmaß) zum durchschnittlichen Erwartungswert (Risiko) Euro pro kWh_{el} zusammengefasst werden.

Weitere hier verwendete Begriffe im Zusammenhang mit der Risikoanalyse sind im Anhang A definiert.

In dem vorliegenden Papier werden Schäden und Risiken betrachtet, die durch Umwelteinwirkungen von Stromerzeugungssystemen im Normalbetrieb und bei Unfällen entstehen.

Im Normalbetrieb werden Emissionen von Stoffen oder Energie (z. B. elektromagnetische Strahlung) in Umweltmedien (Luft, Boden, Wasser) und Landnutzungsänderungen betrachtet. Die Umwelteinwirkungen führen zu Umweltauswirkungen, d. h. zu Schäden an Schutzgütern, wie z. B. die menschliche Gesundheit oder Ökosysteme. Des Weiteren kann es bei der Stromerzeugung während des Kraftwerkbetriebs und bei allen weiteren relevanten Prozessstufen des Stromerzeugungssystems zu Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten kommen.

Neben dem Normalbetrieb können Umwelt- und Gesundheitsrisiken durch schwere Unfälle verursacht werden. Schwere Unfälle definieren sich dadurch, dass sie zu erheblichen Schäden führen, bei denen mehrere Menschen auch außerhalb der Anlage verletzt oder getötet werden können, oder bei denen es zu erheblichen Freisetzungen von Schadstoffen kommt. Diese schweren Unfälle können u. a. durch ein Versagen der technischen Anlagen und der Sicherheitsmaßnahmen verursacht werden. Bei sehr großen Freisetzungen von

Schadstoffen können durch notwendige Evakuierungs- und Umsiedlungsmaßnahmen auch die wirtschaftliche Produktion, Kollektiv- und Privatgüter betroffen sein.

1.2 Übersicht und Aufbau des Arbeitsberichts

Im anschließenden *Kapitel 2* wird auf Methoden zur Berechnung der Schäden und Risiken eingegangen und es werden weitere begriffliche und inhaltliche Konventionen für die hier betrachtete Risikoabwägung vorgestellt. Danach erfolgt in *Kapitel 3* die Betrachtung der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen des Normalbetriebs der Stromerzeugungstechnologien. *Kapitel 4* behandelt die Risiken schwerer Unfälle unterschiedlicher Stromerzeugungstechnologien, wobei hier der Fokus auf der Kernenergie liegt. Im darauffolgenden fünften Kapitel werden die Risiken der Kernenergie mit den Risiken der anderen Stromerzeugungstechnologien verglichen und abschließend die Ergebnisse zusammengefasst. Im *Anhang A* finden sich Definitionen von verwendeten Begriffen, und im *Anhang B* eine Liste der verwendeten Abkürzungen. Wesentliche Eigenschaften der Sicherheitsanforderungen und des Sicherheitskonzepts von Kernkraftwerken werden im *Anhang C* erläutert.

2 Methoden zur Berechnung der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen

Im diesem Abschnitt werden die Wirkungsprozesse und Quantifizierungsverfahren zur Berechnung der Umwelt- und Gesundheitsschäden durch Stromerzeugungstechnologien dargestellt. Inhaltlich berücksichtigt werden Effekte im Normalbetrieb aufgrund der Folgen des Treibhauseffekts, des Schadstoffeintrags in die Umwelt und der Schadstoffwirkungen auf urbane Systeme, Ökosysteme, Feldfrüchte, Materialien und auf die menschliche Gesundheit. Zum Normalbetrieb zählen auch arbeitsbedingte Gesundheitsschäden durch Berufskrankheiten und Arbeitsunfälle (inklusive Wegeunfälle). Bei der Kernenergie stellt die Handhabung der konzentrierten radioaktiven Substanzen eine besondere potenzielle Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Daher werden im Rahmen des Berichts Risiken infolge schwerer Reaktorunfälle mitbetrachtet.

Die Umwelt- und Gesundheitsschäden werden z. B. in Form von Ernteverlust und der Anzahl zusätzlicher Fälle von tödlichem Krebs berechnet. Anschließend lassen sich diese Schäden durch die monetäre Bewertung auf eine gemeinsame Einheit beziehen. Somit können alle quantifizierbaren Risiken bzgl. verschiedener Schutzgüter (Gesundheit und Umwelt) aggregiert werden, und als Schadenskosten pro kWh_{el} Strom angegeben werden. Dies ermöglicht einen einheitlichen Vergleich der Umwelt- und Gesundheitsrisiken verschiedener Technologien.

2.1 Quantifizierungsverfahren zur Berechnung der Umwelt- und Gesundheitsschäden im Normalbetrieb

Die Quantifizierungsverfahren zur Berechnung der Umwelt- und Gesundheitsschäden werden im Folgenden dargestellt.

2.1.1 Berechnung der Gesundheitsschäden

Die Quantifizierung der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit berücksichtigt den Lebenszeitverlust durch vorzeitige Todesfälle und Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Krankheiten und Arbeitsunfälle. Schadstoffe verursachen Gesundheitseffekte in der Bevölkerung und arbeitsbedingte Gesundheitseffekte entstehen durch Berufskrankheiten und Arbeitsunfälle.

Um die Gesundheitsbeeinträchtigung durch verschiedene Krankheiten und den Lebenszeitverlust durch vorzeitige Todesfälle aggregieren zu können, müssen diese Schäden gewichtet, und in einer geeigneten Maßeinheit ausgedrückt werden. Dazu werden zwei unterschiedliche Konzepte angewendet. Mithilfe des Wirkungspfadansatzes soll auch eine Überführung der Schäden in monetäre Einheiten erfolgen. Dies ermöglicht einer vergleichenden

Bewertung der Stromerzeugungstechnologien bezüglich Umwelt- und Gesundheitseffekten und den Stromerzeugungskosten.

A) Das *DALY*-Konzept

Eine Möglichkeit, verschiedene Arten von Gesundheitsschäden und Lebenszeitverlust zu aggregieren, bietet das *DALY*-Konzept. Die Abkürzung *DALY* steht für „*Disability-Adjusted Life Years*“. Das *DALY*-Konzept erlaubt es, verschiedene Krankheiten entsprechend ihrer Dauer und ihrer Schwere zu gewichten, und auf eine Einheit, nämlich verlorene gesunde Lebenszeit, umzurechnen. Die insgesamt durch verschiedene Krankheiten in einer Bevölkerung verlorene Lebenszeit *YLD* (Years lost due disability) berechnet sich wie folgt:

$$YLD = \sum_{i=1}^n I_i \cdot DW_i \cdot L_i$$

wobei

I_i = in der Erfassungsperiode aufgetretene Fälle der Krankheiten i ,

DW_i = das Gewicht der funktionalen Beeinträchtigung durch die Krankheiten i ,

L_i = die durchschnittliche Dauer der Krankheiten i (in Jahren).

Hierfür werden Lebenszeiten während denen jemand krank ist, mit einem Faktor für die Schwere der Krankheit (DW_i = Disability Weight) gewichtet. Das Maß für die Schwere der Krankheit (DW_i) liegt je nach Krankheit zwischen 0, im Falle von vollständiger Gesundheit, und 1, im Falle einer Beeinträchtigung, die einer vollständig verlorenen Lebenszeit entspricht (also durch einen Todesfall). Ein Zeitraum, in dem man krank ist, gilt also je nach Schweregrad der Krankheit als äquivalent zu einer absolut verlorenen Lebenszeit. Das *DALY*-Konzept wird z. B. von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) verwendet, um die globalen Krankheitslasten zu quantifizieren. Eine entsprechende Liste von Faktoren für die Schwere der relevanten Krankheiten wurde von Gesundheitsexperten entwickelt (WHO 2004).

Durch tödliche Unfälle oder tödliche Krankheiten kommt es durch vorzeitiges Ableben zu einem direkten Verlust von Lebenszeit. Die Anzahl der durch vorzeitigen Tod verlorenen Lebensjahre *YOLL* (Years Of Lifetime Lost) in einer Bevölkerung berechnet sich nach der Formel

$$YOLL = \sum_{i=1}^n N_i \cdot T_i$$

wobei

N = Anzahl der Todesfälle durch Todesursache i und

T = Standardlebenserwartung minus Alter zum Zeitpunkt des Todes durch Todesursache i (in Jahren) ist.

Die durch Krankheiten beeinträchtigte Lebenszeit und die durch vorzeitige Mortalität verlorene Lebenszeit einer betrachteten Bevölkerungsgruppe kann in einer Summe für die Krankheitslast „Disability-Adjusted Life Years“ nach der folgenden Formel zusammengefasst werden

$$DALY = YOLL + YLD$$

B) Monetäre Bewertung

Über die ökonomische Bewertung der externen Effekte werden die verschiedenen Arten von Gesundheitsschäden und der Lebenszeitverlust in eine monetäre Größe überführt. Grundlage der ökonomischen Bewertung sind unter anderem Analysen zur Zahlungsbereitschaft, bestimmte kleine Risiken zu vermeiden. Die aus (Preiss, Friedrich et al. 2008) verfügbaren monetären Werte für Krankheiten reichen von 57 €₂₀₁₀ für einen Tag mit eingeschränkter Aktivität bis zu 300.000 €₂₀₁₀ für einen Fall von chronischer Bronchitis. Der Wert eines verlorenen Lebensjahres beläuft sich nach (Desaigues et al. 2011) auf umgerechnet ca. 60.000 €₂₀₁₀.

2.1.1.1 Gesundheitsschäden durch Schadstoffe im Normalbetrieb

Die von einer Stromerzeugungstechnologie im Normalbetrieb ausgehenden kumulierten Schadstoff- und Treibhausgasemissionen werden im Rahmen von Ökobilanzen ermittelt. In dem vorliegenden Bericht wurden die Ökobilanzergebnisse für moderne, heute verfügbare Stromerzeugungstechnologien aus dem Europäischen Gemeinschaftsprojekt *CASES* (Markandya et al. 2011) verwendet. Die von diesen Emissionen resultierenden zusätzlichen gesundheitlichen Auswirkungen und Umweltschäden werden mit dem Wirkungspfadansatz standortspezifisch berechnet.

Zu den Umweltschäden im Normalbetrieb zählen Schäden an Biodiversität, Feldfrüchten und Gebäudematerialien durch Luftschadstoffe. Darüber hinaus entstehen auch Schäden durch den Klimawandel. Dieser wird durch die Freisetzung von Treibhausgasen verursacht. Die aus der Umweltbelastung resultierenden Gesundheitsauswirkungen sowie die Umweltschäden sind für viele Menschen ein entscheidendes Kriterium bei der Risikobewertung von Energietechnologien. Frühere Studien haben gezeigt, dass die quantifizierbaren externen Effekte der Stromerzeugungssysteme durch Luftschadstoffe und Treibhausgase dominiert werden (NewExt 2004), (ExternE-Pol 2004), (Krewitt 2009).

Das jeweilige Stromerzeugungssystem setzt sich aus mehreren Prozessstufen zusammen, welche verschiedene Umwelteinwirkungen verursachen. Zu Umwelteinwirkungen kommt es bei Herstellung und Fertigung, beim Betrieb und Rückbau/Entsorgung

des Stromerzeugungssystems sowie der jeweiligen Prozessstufen. Hervorzuheben sind beispielsweise die direkten Schadstoffemissionen bei Verbrennungsprozessen in thermischen Kraftwerken. Dabei hat der Standort der einzelnen Prozessstufen Einfluss auf die vom Energiesystem verursachten Schäden. Gerade bei den Auswirkungen auf Ökosysteme und auf die menschliche Gesundheit sind die Wirkungsmechanismen sehr komplex, so dass standortspezifische Wirkungsmodellierungen vorgenommen werden müssen. Dieser Ansatz wird mit dem Wirkungspfadansatz verfolgt (siehe Abbildung 1).

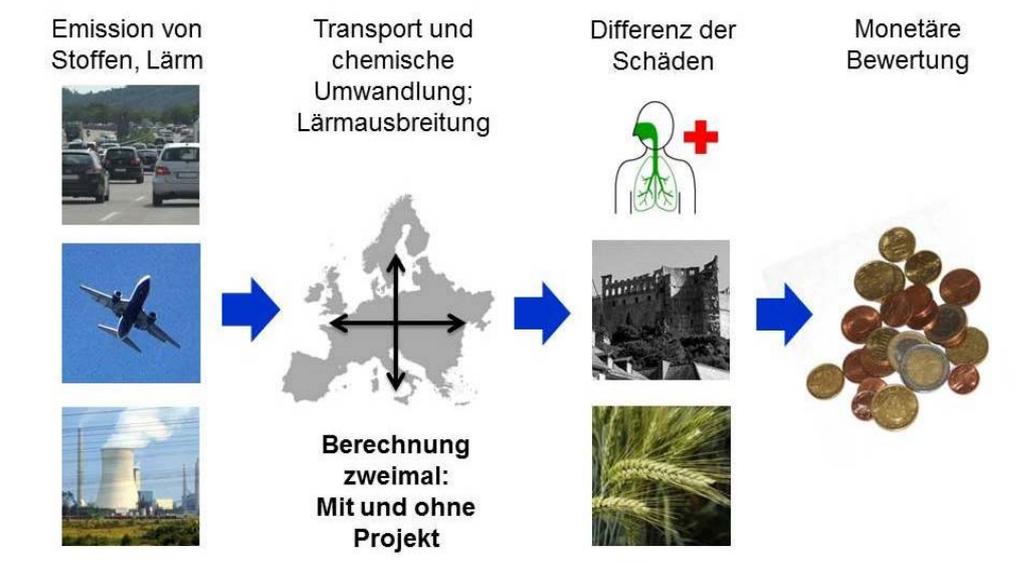


Abbildung 1: Wirkungspfadansatz

Der Wirkungspfadansatz modelliert die Ausbreitung von Schadstoffen und die sich daraus ergebende Exposition der Schutzgüter. Gesundheitsschäden werden dann basierend auf epidemiologischen Studien und entsprechenden Konzentrations-Wirkungs-Beziehungen berechnet. Anschließend lassen sich die Schäden gewichten und zu einem Gesamtschaden aggregieren¹. Die physischen Schäden sind z. B. Lebenszeitverlust durch tödliche Unfälle oder durch Krebs und Lebensqualitätsverlust durch verschiedene Krankheiten, wie z. B. zusätzliche Fälle von chronischer Bronchitis, Hustentage oder von Herzinfarkten. Diese Gesundheitsschäden lassen sich dann im nächsten Schritt bewerten.

2.1.1.2 Arbeitsbedingte Gesundheitsschäden

Arbeitsbedingte Gesundheitsschäden, die durch Berufskrankheiten und Arbeitsunfälle entstehen, werden auf Basis von durchschnittlichen statistischen Daten für Deutschland

¹ Die Methode ist in European Commission (2005) und UBA (2007) ausführlich beschrieben und wird daher nur kurz skizziert.

berechnet, und ebenfalls als *YOLL* und *YLD* dargestellt. Zu den arbeitsbedingten Unfällen zählen auch die sogenannte Wegeunfälle, d. h. Unfälle während des Weges von und zur Arbeitsstätte sowie Unfälle bei Transportprozessen notwendiger Güter und Rohstoffe für das jeweilige Stromerzeugungssystem. Die arbeitsbedingten Gesundheitsschäden werden anhand der inländischen Wirtschaftsleistung abgeschätzt, indem die Schäden mit der deutschen Wertschöpfung (Bruttoinlandsprodukt – *BIP*) ins Verhältnis gesetzt werden. Für die Berechnung wurden Daten aus (GBE 2011) und (DESTATIS 2011) für den Zeitraum von 1993 bis 2008 verwendet. Das durchschnittliche reale Bruttoinlandsprodukt für diesen Zeitraum beträgt 2.138 Mrd. €₂₀₀₅ pro Jahr (DESTATIS 2011).

Tödliche berufsbedingte Arbeitsunfälle

In Tabelle 1 sind die Anzahl der arbeitsbedingten tödlichen Unfälle und der daraus resultierende kumulierte Lebenszeitverlust in Jahren (*YOLL*) angegeben. Der gesamte Lebenszeitverlust ergibt sich aus der Annahme von 40 Jahren Lebenszeitverlust pro tödlichen Unfall. Durch eine monetäre Bewertung des Lebenszeitverlustes mit 60.000 € pro Lebensjahr (Desaigues et al. 2011) ergeben sich die Schadenskosten aufgrund tödlicher Arbeitsunfälle. Die Faktoren pro Mrd. €₂₀₁₀ *BIP* aus Tabelle 1 werden im Rahmen dieses Berichtes verwendet, um arbeitsbedingte Schäden je erzeugter Strommenge zu berechnen.

Tabelle 1: Arbeitsbedingte Gesundheitsschäden durch tödliche Unfälle (Durchschnitt für Deutschland von 1993 bis 2008)

	Anzahl tödlicher Unfälle	gesamte verlorene Lebenszeit	Schadenskosten durch tödliche Arbeitsunfälle	verlorene Lebenszeit pro Mrd. € ₂₀₁₀ <i>BIP</i>	Schadenskosten tödlicher Arbeitsunfälle pro Mrd. € ₂₀₁₀ <i>BIP</i>
	[-]	[<i>YOLL</i>]	[Mrd. € ₂₀₁₀]	[<i>YOLL</i> /Mrd. € ₂₀₁₀]	[in %]
Tödliche Wegeunfälle	727	29.100	1.7	13,8	0.08
Sonstige tödliche Arbeitsunfälle	1.211	48.400	2.9	23,2	0.14
Summe arbeitsbedingter tödlicher Unfälle	1.938	77.500	4.7	37,0	0.22

Nicht-tödliche berufsbedingte Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten

Es entstehen auch Gesundheitsschäden durch nicht-tödliche Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten. Zu den wichtigsten Berufskrankheiten zählen z. B. Lärmschwerhörigkeit, Asbestose und Meniskusschäden (Robert Koch-Institut 2007). Jährlich beträgt die mittlere Anzahl an verletzten Personen durch Arbeitsunfälle etwa 1,42 Millionen Personen und die Anzahl an Berufskrankheiten ca. 18.800 Fälle.

Um eine erste Abschätzung der physischen Gesundheitsauswirkungen in *YOLL*, *YLD* und deren ökonomische Bewertung zu erhalten, wurde wie folgt vorgegangen: Arbeitsunfälle mit verletzten Personen werden mit 3.000 €₂₀₁₀ pro Fall, und Berufskrankheiten mit

durchschnittlich 300.000 €₂₀₁₀ pro Fall bewertet. Diese Werte sind grobe Abschätzungen und basieren auf dem Vergleich mit Werten für verursachte Krankheiten durch Luftschadstoffe. Um *DALYs* zu berechnen wurden die Arbeitsunfälle mit verletzten Personen mit 30 Tagen Dauer und einem Disability Weight (*DW*) von 0,5 bewertet. Dies ergibt pro Fall 0,04 Jahre (*YLD*). Bei den Berufskrankheiten wurden eine Dauer von 20 Jahren und ein *DW* von 0,25 angenommen. Dies ergibt pro Fall 5 Jahre (*YLD*).

Daraus ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten jährlichen kumulierten Gesundheitsschäden von 228.000 *DALYs* bzw. in monetären Einheiten von 14,5 Mrd. € pro Jahr durch Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten. Spezifisch auf das Bruttoinlandsprodukt umgerechnet ergeben sich für Deutschland kumulierte mittlere arbeitsbedingte Gesundheitsschäden von 108 *DALY*/Mrd. €₂₀₁₀ und Schadenskosten in einer Höhe von etwa 0,7 % des jährlichen deutschen Bruttoinlandsprodukts, oder anders ausgedrückt, 7 Mio. Euro Schaden pro Mrd. Euro *BIP*.

Tabelle 2: Arbeitsbedingte Schäden durch tödliche Arbeitsunfällen, nicht-tödliche Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten

	<i>mittlerer Gesamt- schaden</i>	<i>ökonomische Bewertung Euro</i>	<i>DALY- Faktor</i>	Gesund- heits- schäden	Öko- nomischer Gesamt- schaden	Gesundheits- schäden <i>DALY</i> pro <i>BIP</i>	Schadens- kosten Euro pro <i>BIP</i>
				[a]	[Mrd. € ₂₀₁₀ /a]	[<i>DALY</i> /Mrd. € ₂₀₁₀]	[in %]
arbeitsbedingte tödliche Unfälle	77.500 <i>Jahre</i>	60.000 pro <i>Jahr</i>	1 pro <i>Jahr</i>	77.500	4,7	37	0.22
Arbeitsunfälle mit verletzten Personen	1.400.000 <i>Fälle</i>	3.000 pro <i>Fall</i>	0,04 pro <i>Fall</i>	57.000	4,3	27	0.20
Berufskrankheiten	18.800 <i>Fälle</i>	300.000 pro <i>Fall</i>	5 pro <i>Fall</i>	94.000	5,6	44	0.26
			Summe	228.000	14,6	108	0,70

Diese Schadensfaktoren pro Euro Wirtschaftsleistung sind nicht differenziert nach verschiedenen Branchen, sondern stellen einen Durchschnittswert über alle Wirtschaftszweige dar. Bei der Stromerzeugung spiegeln die Produktionskosten bzw. Stromerzeugungskosten den Verbrauch an Rohstoffen sowie den Arbeits- und Produktionsaufwand wieder. Es wird hier angenommen, dass mit steigenden Kosten auch die arbeitsbedingten Gesundheitsschäden ansteigen. Um die arbeitsbedingten Gesundheitsschäden der unterschiedlichen Stromerzeugungsoptionen pro *MWh_{el}* abzuschätzen, werden der Schadensfaktor *DALY* pro *BIP* bzw. der Schadensfaktor Euro pro *BIP* aus Tabelle 2 mit den Produktionskosten der Stromerzeugung multipliziert.

2.1.2 Berechnung der Umweltschäden

Umweltschäden an Ökosystemen, Gebäudematerialien und Feldpflanzen entstehen vorwiegend durch Versauerung und Eutrophierung. Dies wird verursacht durch Emissionen von Vorläufersubstanzen wie SO_2 , NO_x und NH_3 , welche durch chemische Umwandlung zu Nitraten und Sulfaten reagieren, und dann durch feuchte und trockene Deposition in den Boden eingetragen werden. Weitere Schäden an Ökosystemen und Feldpflanzen entstehen durch Ozon, welches aufgrund von NO_x und $NM VOC$ Emissionen gebildet wird. Diese Schäden lassen sich ebenfalls über den Wirkungspfadansatz ermitteln.

Treibhausgase tragen zum Klimawandel bei, und in Folge dessen entstehen Schäden an verschiedenen Schutzgütern. Klimaschadensmodelle, wie z. B. das *FUND*-Modell², helfen die ökonomischen Auswirkungen an Schutzgütern³ zu quantifizieren. Die Effekte des Klimawandels entstehen unabhängig vom Ort der Emission der Treibhausgase, da diese eine sehr lange Halbwertszeit in der Atmosphäre haben und sich entsprechend gleichmäßig verteilen. Die Effekte sind global sehr unterschiedlich und zeitlich weit in die Zukunft verteilt. Die Abschätzung der Schadenskosten ist daher mit großen Unsicherheiten behaftet, und das Ergebnis hängt stark von Bewertungsparametern, wie z. B. der Höhe der Diskontrate für zukünftige Schäden oder der globalen Einkommensverteilung ab. Die Bandbreite der Ergebnisse reicht von leicht negativen Kosten bis zu mehreren 100 € pro Tonne CO_2 -Äquiv. (Anthoff 2007). Daher wird zur ökonomischen Bewertung von Treibhausgasemissionen zusätzlich der Ansatz der Vermeidungskosten zur Erreichung eines gesellschaftlich/politisch vereinbarten Emissionszieles verwendet. Eine zuverlässige Differenzierung der Ergebnisse nach Schutzgütern ist zurzeit nicht verfügbar. Daher können auch Gesundheitsschäden durch Treibhausgasemissionen nicht als zusätzliche Todesfälle (*YOLL*) und Krankheiten (*YLD*) separat angegeben werden. Für die ökonomische Bewertung der Emissionen von Treibhausgasen wurde im Rahmen dieses Berichts der mittlere Wert aus (UBA, 2007) von 70 € pro Tonne CO_2 -Äquiv. verwendet.

2.2 Quantifizierungsverfahren zur Berechnung der Risiken durch schwere Unfälle

Im Hinblick auf die Bewertung der von Stromerzeugungstechnologien ausgehenden Risiken werden von der Öffentlichkeit insbesondere schwere Unfälle diskutiert. Die gesellschaftliche Wahrnehmung der Risiken schwerer Unfälle bei der Nutzung der Kernenergie führt bei diesem Technologiesystem zu einer Polarisierung in der Gesellschaft zu Gegnern und Befürwortern.

² <http://www.fund-model.org/>

³ Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Meeresspiegelanstieg, kardiovaskuläre und respiratorische Beschwerden im Zusammenhang mit Kälte- und Hitzestress, Malaria, Denguefieber, Bilharziose, Diarrhöe, Energieverbrauch, Wasserhaushalt und Einflüsse auf natürliche Ökosysteme.

Nach (PSI 2005) ist ein Unfall ein schwerer Unfall, wenn mindestens eines der folgenden Kriterien zutrifft.

1. mindestens 5 Todesfälle,
2. mindestens 10 Verletzte,
3. mindestens 200 Evakuierte,
4. ein weitreichendes Verbot des Verzehrs, von Lebensmitteln,
5. eine Freisetzung von mindestens, 10.000 Tonnen Kohlenwasserstoffen,
6. die Säuberung einer Land- oder Wasserfläche von mindestens 25 km²,
7. wirtschaftliche Schäden von mindestens, 5 Millionen USD (Preisstand 2000).

Während für die Berechnung der Schadenshöhe von schweren Unfällen durch die Stromerzeugung aus Kernenergie im Rahmen dieser Studie eigene Untersuchungen durchgeführt werden, werden für die weiteren Stromerzeugungssysteme Ergebnisse zu den Schadenshöhen aus dem *NewExt-Projekt* (NewExt 2004) übernommen.

2.2.1 Berechnung der Umwelt und Gesundheitswirkungen schwerer Unfälle

Die Berechnung der Schäden aufgrund der Freisetzung großer Mengen radioaktiver Stoffe durch schwere Unfälle in Kernkraftwerken erfolgt in Anlehnung an die Vorgehensweise der Arbeiten des Paul Scherrer Instituts in den konsekutiven Projekten *CETP*, *NEEDS* und *SECURE*⁴. Im Rahmen des *CETP*-Projekts wurde eine vereinfachte Methode zur Berechnung der physischen Folgen eines schweren Unfalls für ein Kernkraftwerk entwickelt. Diese vereinfachte Methode der Schadensbetrachtung stützt sich auf Ergebnisse, die mit dem Programmsystem *MACCS*⁵ (*MELCOR Accident Consequence Code System*) im Rahmen des Projekts *CETP* für einen mitteleuropäischen Standort berechnet wurden. Auf Basis der Modellrechnungen wurde festgestellt, dass die Folgen der Freisetzung von Radioaktivität einer bestimmten radioaktiven Substanz - vereinfacht betrachtet - insbesondere abhängig von der Bevölkerungsdichte und dem Bodenanteil an der Gesamtfläche (Land- und Wasserfläche) um die Anlage sind. Mithilfe der Berechnungen werden unmittelbare und latente Todesfälle aufgrund der erhöhten Strahlenbelastung ermittelt, wobei unmittelbare Todesfälle nach dieser Modellvorstellung in naher Entfernung zum Kraftwerk erwartet werden (bis zu 8 km). Latente Todesfälle aufgrund von tödlich verlaufenden Krebserkrankungen und chronisch tödlichen Erkrankungen werden in einem deutlich weiteren Umfeld der Anlage erwartet (bis zu 800 km). Der hypothetische Standort des hier betrachteten Kernkraftwerks liegt in

⁴ Siehe auch: Projektberichte: *SECURE* - Burgherr, P., P. Eckle, et al. (2011), *NEEDS* - Burgherr, P., S. Hirschberg, et al. (2008). und *CETP* - Eliasson, B. und Y. Y. Lee (2003).

⁵ *MACCS* ist ein Programmsystem, welches die radiologische Bedeutung und damit den Schaden einzelner Radionuklide jenseits der Anlagengrenzen probabilistisch ermittelt. Dabei werden auch die unterschiedlichen Wettersequenzen statistisch ausgewertet. Diese Vorgehensweise ist typisch für die Unfallfolgenabschätzung.

Mitteleuropa mit einer vergleichbaren Bevölkerungsdichte wie sie am Kernkraftwerksstandort Biblis in Deutschland vorzufinden ist.

Mit dem im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ansatz werden nur Todesfälle und Bodenkontamination ermittelt. Deshalb werden hier zusätzlich die Gesundheitsschäden durch Krankheiten, insbesondere nicht-tödlicher Krebs, basierend auf dem Verhältnis von tödlichen und nicht-tödlichen Gesundheitsschäden nach den Empfehlungen der „International Commission on Radiological Protection“ (ICRP 60 1991) abgeschätzt. Die Empfehlung stellt Wirkungsbeziehungen pro Strahlendosis dar. Danach ist die Anzahl nicht-tödlicher Krebsfälle 2,4 und die Anzahl genetischer Effekte 0,2 mal so hoch wie die Anzahl tödlicher Krebsfälle. Mit den Gewichtungsfaktoren für die gesundheitlichen Auswirkungen nach (Huijbregts et al. 2005) von 11,5 *YOLL* pro tödlichem Krebsfall und 0,5 *YLD* für nicht-tödliche Krebsfälle sowie 61 *YLD* (Frischknecht et al. 2000) für genetische Effekte lassen sich die unterschiedlichen Gesundheitseffekte zusammenfassen.

2.2.2 Monetäre Bewertung der Umwelt und Gesundheitswirkungen schwerer Unfälle

Die anschließende monetäre Bewertung der jeweiligen Gesundheitsauswirkungen wird über die monetären Schadensfaktoren nach (Preiss, Friedrich and Klotz 2008) durchgeführt.

Weitere relevante Kostenfaktoren zur Abschätzung der ökonomischen Schadenshöhe durch die Freisetzung von Radioaktivität verursachten Gesundheitsschäden, volkswirtschaftlichen Verlusten, Produktionsverluste und Umsiedlungskosten werden wie folgt angenommen:

- Kosten für Gesundheitsschäden:
 1. Tödliche Krebsfälle: 1,3 Mio. Euro pro Fall (Annahme: Verlust von durchschnittlich 11.5 Lebensjahren und 60.000 Euro pro Jahr plus 606.000 Euro Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung nach (Preiss et al. 2008)
 2. Morbidität: *YLD*: 60,000 Euro pro verlorenem Jahr
- Kosten für den Anlageninhaber bzw. –betreiber:
 4. Wiederbeschaffungswert: 4,48 Mrd. Euro (2.800 Euro/kW)
 5. Entgangene Gewinne: 1,64 Mrd. Euro (Vitázková and Cazzoli 2011)
 6. Rückbaukosten: 4,48 Mrd. Euro (2.800 Euro/kW)
- Volkswirtschaftliche Kosten durch den Wegfall des wirtschaftlichen Einkommens im Gebiet der kontaminierten Fläche für fünf Jahre (Bruttoinlandsprodukt in 2010: 33.300 Euro pro Einwohner (DESTATIS 2011))
- Umsiedlungskosten: 250.000 Euro je Einwohner⁶ (Hofmeister 2006)

⁶ In (Hofmeister, 2006) werden aktuelle Umsiedlungskosten im Zusammenhang von Umsiedlungsfällen mit dem Braunkohletagebau, Flughafenbau und Hochwasser für Deutschland gegenübergestellt. Die maximalen Kosten in einer Höhe von 250.000 Euro/Einwohner (inkl. Haushalte und Gewerbebetriebe und öffentlichen Einrichtungen) werden im Rahmen dieser Arbeit den Kostenberechnungen zugrunde gelegt.

3 Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen im Normalbetrieb

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Gesundheitsschäden durch Emissionen und arbeitsbedingte Gesundheitsschäden, die aus dem Normalbetrieb der Stromerzeugungstechnologien resultieren, in Form von *YOLL* und *YLD* gegenübergestellt. Danach werden die arbeitsbedingten Risiken ermittelt und in die Analyse integriert. Damit werden sämtliche Auswirkungen auf die Schutzgüter beim Normalbetrieb der Stromerzeugungstechnologien erfasst. Im zweiten Abschnitt werden die Schadenskosten dargestellt.

3.1 Gesundheitsschäden durch den Normalbetrieb von Stromerzeugungssystemen

Wie bereits erläutert, können die Gesundheitsschäden durch Treibhausgase nicht separat ausgewiesen werden, da die aktuellen Schadenkosten bzw. Vermeidungskosten nur in Form aggregierter Kosten in €/pro Tonne $CO_{2\ddot{a}qui}$ vorhanden sind. Daher sind die Gesundheitsschäden durch Treibhausgase in den folgenden Abbildungen nicht enthalten.

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die Ergebnisse zu den Gesundheitsschäden. Dabei sind der Kategorie Kraftwerksbetrieb auch die direkten Emissionen aus dem Einsatz/Verbrennung von energetischen Rohstoffen zugeordnet. Es wird sowohl bei der Betrachtung der Mortalität als auch der Morbidität deutlich, dass im Normalbetrieb die von den fossilen Kraftwerkstechnologien ausgehenden Gesundheitsrisiken um ein Vielfaches über den Risiken der Bereitstellung elektrischer Energie aus Kernenergie oder Windenergie liegen. Gesundheitsschäden durch die Erzeugung elektrischer Energie aus fossilen Energieträgern werden vor allem durch die von Kraftwerken direkt emittierten Luftschadstoffe verursacht. Aufgrund des direkten Ausstoßes von Feinstaub, Schwefeldioxid und Stickoxiden kommt es zu gesundheitlichen Auswirkungen in der belasteten Bevölkerung. So führt zum Beispiel der Betrieb der Kohlekraftwerke zu 295 *DALY* (Steinkohle) bzw. 345 *DALY* (Braunkohle) pro Mio. MWh_{el} . Bei dem Erdgas GuD-Kraftwerk sind die Auswirkungen für die Bevölkerung mit etwa 80 *DALY* pro Mio. MWh_{el} aufgrund der niedrigeren Emissionen geringer. Die Bandbreite tödlich verlaufender Erkrankungen aufgrund der Stromerzeugung in fossilen Kraftwerken liegt zwischen 90 und 223 *YOLL* pro Mio. MWh_{el} . Die von der Photovoltaik ausgehenden Gesundheitsrisiken sind nahezu in derselben Größenordnung wie die Gesundheitsrisiken der Stromerzeugung aus Erdgas. Dies macht deutlich, dass auch bei erneuerbaren Energiesystemen die hohe Materialintensität und die energetischen Aufwendungen insbesondere bei der Anlagenherstellung zu Schadstoffemissionen führen, die erhebliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. Arbeitsbedingte Gesundheitsschäden haben vor allem bei Technologien Auswirkungen, welche die elektrische Energie zu hohen Kosten bereitstellen. Einen substantiellen Beitrag an den kumulierten Gesundheitsschäden ergibt sich daher bei den Technologiesystemen zur Nutzung erneuerbarer Energien und hier insbesondere bei der Photovoltaik.

Im Vergleich dazu sind die Gesundheitsrisiken während des Normalbetriebs bei der Kernenergie niedrig und bei der Wasserkraft am geringsten.

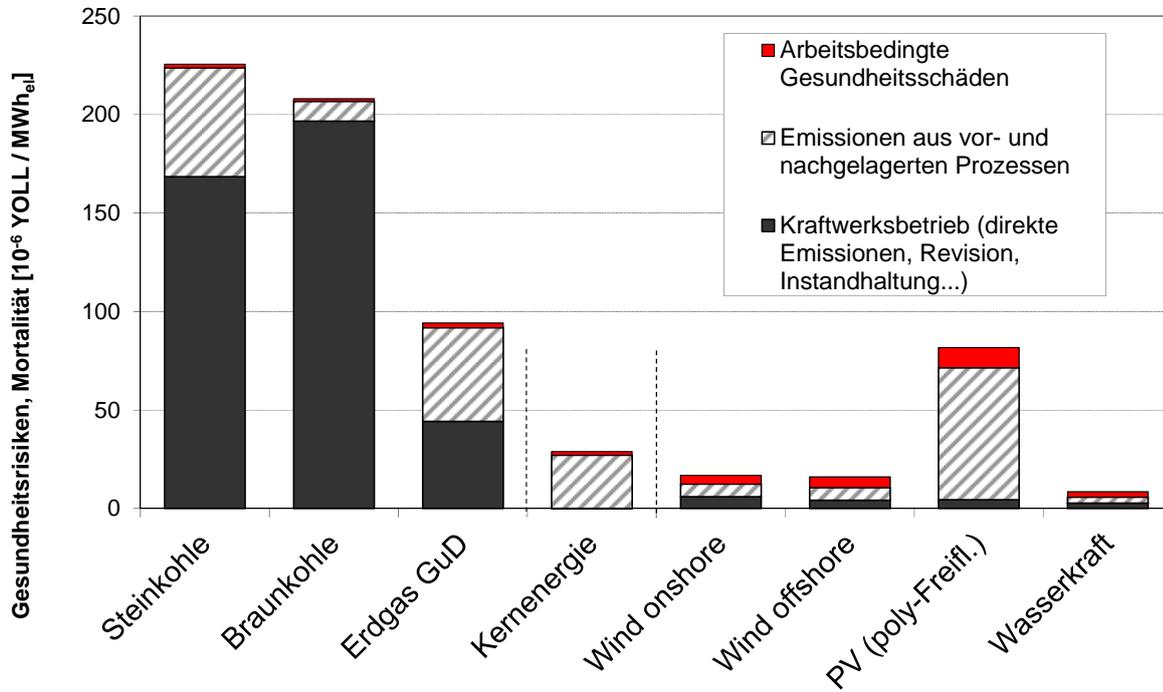


Abbildung 2: Verlorene Lebensjahre (Years of Lifetime Lost – YOLL) im Normalbetrieb - arbeitsbedingt und durch Schadstoffemissionen

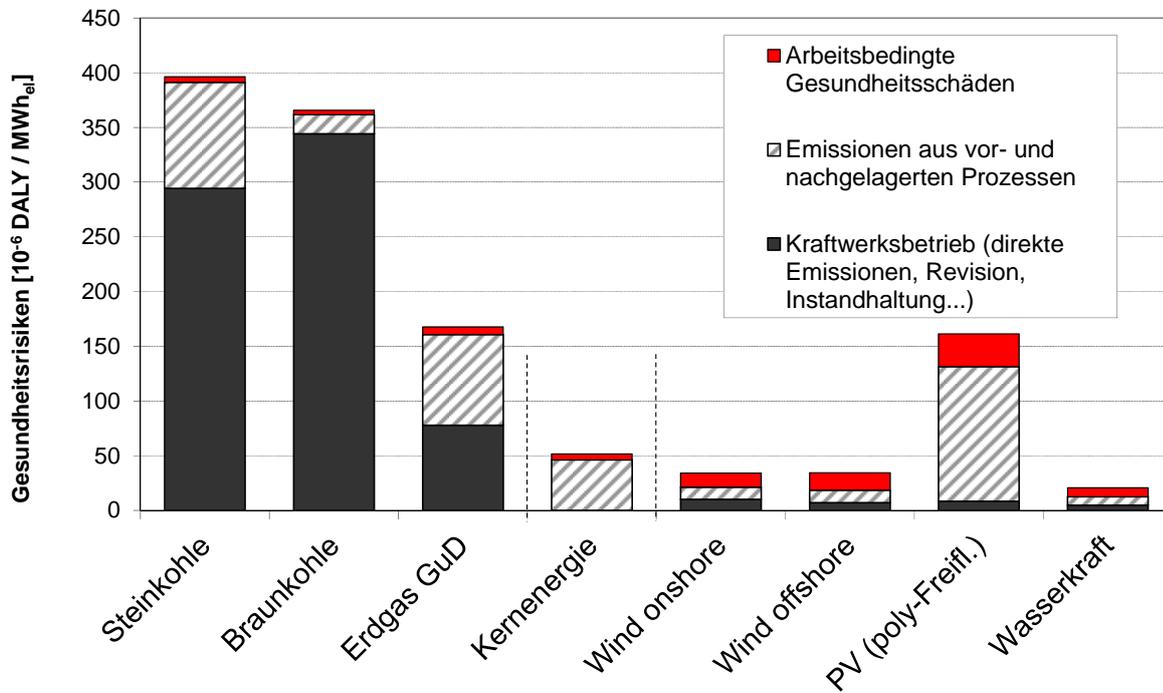


Abbildung 3: DALYs (Morbidity plus Mortality) im Normalbetrieb - arbeitsbedingt und durch Schadstoffemissionen

3.2 Schadenskosten durch den Normalbetrieb von Stromerzeugungssystemen

Bei der Abschätzung der Schadenskosten durch die Stromerzeugung der einzelnen Technologieoptionen werden neben den Kosten für Gesundheitsschäden, Materialschäden Ernte- und Biodiversitätsverluste, auch die Kosten des Klimawandels, und der arbeitsbedingten Gesundheitsschäden berücksichtigt (Abbildung 4). Während des Normalbetriebs der Anlagen haben bei allen Technologien die Gesundheitsschäden einen wesentlichen Beitrag an den Schadenskosten. Materialschäden, Ernte- und Biodiversitätsverluste durch Luftschadstoffe tragen technologieübergreifend zu etwa zehn Prozent an den gesamten Schadenskosten bei. Während der Anteil arbeitsbedingter Schäden bei den kumulierten Schadenskosten fossiler Stromerzeugungstechnologien nahezu vernachlässigbar ist, beträgt der Anteil bei den Systemen zur Nutzung erneuerbarer Energien bis zu gut 40 %.

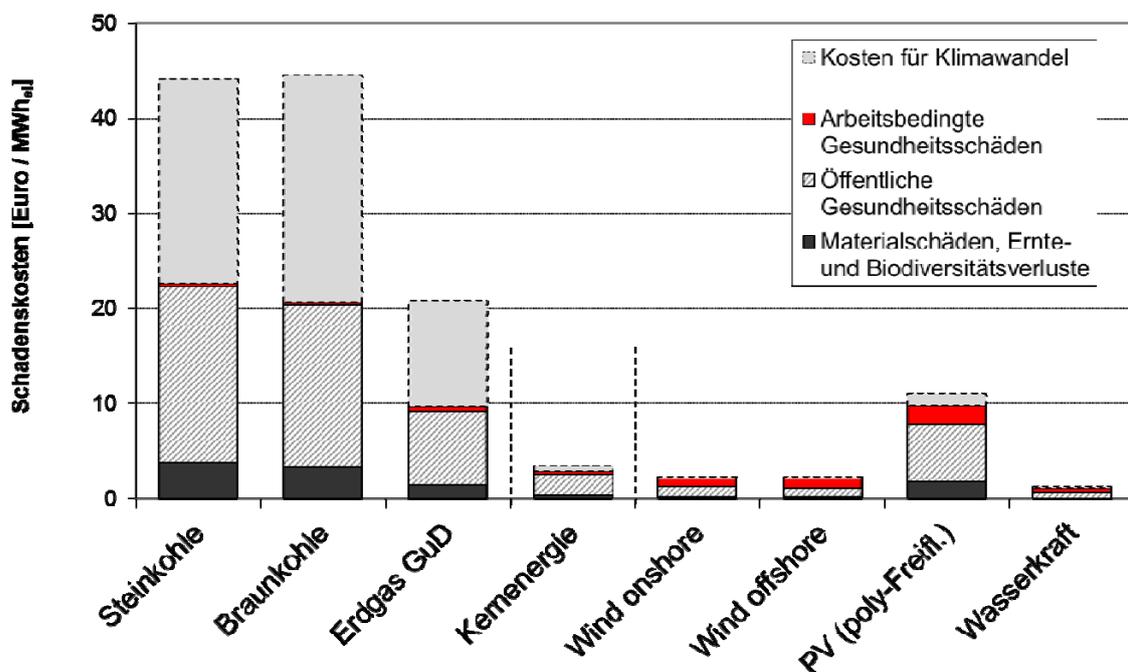


Abbildung 4: Schadenskosten (Normalbetrieb)

Fossile Stromerzeugungssysteme emittieren in großen Mengen Treibhausgase. Die angenommenen Kosten des Klimawandels haben einen hohen Einfluss auf die Schadenskosten dieser Technologiesysteme. Die Treibhausgase führen zu einer Verdoppelung der Schadenskosten fossiler Stromerzeugungssysteme.

Die Kernenergie hat gemeinsam mit der Windenergie und der Wasserkraftnutzung die geringsten Schadenskosten. Bei der Kernenergie wird die Schadenshöhe wesentlich von den vor- und nachgelagerten Prozessstufen des Brennstoffkreislaufs verursacht. Im Normalbetrieb verursacht insbesondere der Uranabbau den größten Anteil an den Schadstoff-

emissionen sowie an den radioaktiven Emissionen, die größtenteils in Form von Radon-Emissionen an die Umwelt abgegeben werden. Der Beitrag externer Kosten der klassischen Luftschadstoffe aus den Prozessstufen und Hintergrundsystemen, überwiegt sowohl bei den Systemen zur Nutzung erneuerbarer Energien als auch bei der Kernenergie.

4 Umwelt- und Gesundheitsrisiken durch schwere Unfälle

Zunächst werden die Risiken, die mit der Stromerzeugung aus Kernenergie verbunden sind, vorgestellt und anschließend die Risiken, die mit schweren Unfällen der anderen betrachteten Stromerzeugungstechnologien einhergehen, diskutiert.

4.1 Risikoabschätzung schwerer Unfälle bei Kernkraftwerken

Im Rahmen der Risikoabschätzung des nuklearen Stromerzeugungssystems werden nur die Risiken des Kernkraftwerks berücksichtigt, da von hier die größten Risiken der Kernenergie ausgehen⁷.

Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken

Durch die Verkettung ungünstiger Umstände können Sicherheitssysteme in Kernkraftwerken versagen und Schutzziele dann nicht eingehalten werden. Auch können sich durch Fehlhandlungen der Betriebsmannschaft Gefährdungen für die Umwelt und die Gesundheit ergeben. Aus beiden Umständen können sich daraus Störfallsequenzen mit der Folge von Kernschäden und anschließender Freisetzung großer Mengen an radioaktiven Stoffen entwickeln.

Durch Risikoanalysen werden Stör- und Unfallabläufe unter Berücksichtigung des Verhaltens des gesamten Kraftwerks untersucht. Dabei ist ein zentrales Ergebnis der Risikoanalyse, wie häufig in einem vorgegebenen Zeitraum bestimmte Schadenszustände einer Anlage erreicht werden und welche Freisetzungsraten für radioaktive Substanzen bzw. Strahlenexpositionen vorliegen⁸.

Risikoanalysen werden als anlagenspezifische „*Probabilistische Sicherheitsanalyse*“ (PSA) durchgeführt. Probabilistische Sicherheitsanalysen haben in Abhängigkeit ihres Analyseumfangs drei Stufen. Nach der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für Kernschäden bzw. eines Gefährdungszustandes der Anlage in der ersten Stufe wird in der zweiten Stufe die Wahrscheinlichkeit für die Freisetzung von Radioaktivität und in der dritten Stufe die Strahlenexposition für die umliegende Bevölkerung ermittelt. Für deutsche Anlagen liegen aktuelle PSA der Stufe 1 und für einige Anlagen auch der Stufe 2 vor. Die einzige durchgehende PSA der Stufe 3 wurde in der Deutschen Risikostudie *Phase A* im Jahre 1979 (GRS 1980) durchgeführt.

⁷ Nach Erdmann, R. C. (1979) geht das integrale Unfallrisiko der Kernenergie fast vollständig vom Kernkraftwerk aus, und nicht von den weiteren Anlagen des Brennstoffkreislaufs. Für diese Anlagen wird daher nur deren Normalbetrieb hier berücksichtigt.

⁸ Die Prüfung und Bewertung von Kernkraftwerken erfolgt primär über einen deterministischen Ansatz, bei dem das Verhalten der Anlage oder einzelner Komponenten unter konkreten Annahmen für ein Ereignis untersucht werden.

Ergebnisse von *PSA* unter Berücksichtigung interner und externer auslösender Ereignisse für deutsche Anlagen zeigen, dass die Kernschadenshäufigkeit bei deutschen Reaktoren zwischen $2 \cdot 10^{-7}$ bis $5,3 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr je Reaktor liegt (BfS 2002) und (Berg 2004)⁹. Für bestehende Anlagen gilt nach einer Empfehlung der Internationalen Atomenergiebehörde (*IAEA*) als Ziel die Einhaltung eines Richtwerts für die Kernschadenshäufigkeit von $1 \cdot 10^{-5}$ pro Reaktorjahr (*IAEA* 2006). Damit unterschreiten die Häufigkeiten für deutsche Anlagen zum Teil deutlich den von der *IAEA* geforderten Richtwert. Diese Wahrscheinlichkeiten werden durch die Ereignisse in Fukushima nicht in Frage gestellt, da es sich in Fukushima um einen Auslegungsfehler und nicht um ein Restrisiko (siehe Glossar im Anhang A) gehandelt hat. Dort lag die Hochwasserauslegung (als ein mögliches externes auslösendes Ereignis) bei zehn Metern Wellenhöhe. An einem japanischen Küstenabschnitt treten im Durchschnitt alle 30 Jahre Wellen aufgrund von Tsunamis mit mindestens zehn Meter Höhe auf. Abschätzungen für den Standort Fukushima zeigen, dass dort etwa alle 100 bis 1.000 Jahre mit Wellenhöhen von größer als zehn Meter gerechnet werden musste (Kuzcera et al. 2011). Die Wahrscheinlichkeit für die Freisetzung großer Mengen an Radioaktivität in Folge einer Kernschadens ist nach (European Commission 1995) und *INSAG-3* (*IAEA* 1988) mindestens um den Faktor 5 bis 10 geringer als die Wahrscheinlichkeit für einen Kernschaden.

Risikoabschätzung schwerer Unfälle bei deutschen Kernkraftwerken

In der deutschen Risikostudie Kernkraftwerke *Phase B* aus dem Jahre 1989 (GRS 1989) wurde im Rahmen einer umfassenden Risikoanalyse, die Spaltproduktfreisetzungen für verschiedene Unfallabläufe berechnet (siehe Tabelle 3). In der Risikostudie *Phase B* werden jedoch keine allgemein anerkannten Angaben zur Eintrittshäufigkeit der untersuchten Unfallabläufe gegeben. Damit trotzdem eine Abschätzung der Schadenskosten möglich ist, werden die in (Krewitt 1996) verwendeten Schätzwerte zur Eintrittshäufigkeit der verschiedenen Unfallabläufe hier genutzt. Bei diesen verwendeten Schätzwerten zur Eintrittshäufigkeit werden keine weiteren Angaben gemacht in welchem Umfang Maßnahmen zur Begrenzung des Schadensausmaßes¹⁰ berücksichtigt wurden. Der Vergleich mit den bereits weiter oben erwähnten Werten ($2 \cdot 10^{-7}$ bis $5,3 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr je Reaktor für deutsche Anlagen) zeigt jedoch, dass die Ergebnisse in einer plausiblen Größenordnung liegen¹¹.

⁹ Für neue Reaktorkonzepte (z. B. EPR) liegt die Wahrscheinlichkeit für einen Kernschaden unterhalb von $1 \cdot 10^{-7}$ pro Reaktorjahr (Burgherr, Hirschberg und Cazzoli 2008).

¹⁰ z. B. Accident-Management Maßnahmen

¹¹ Bei neuen Reaktorkonzepten ist durch die Verbesserungen bzgl. des Sicherheitskonzeptes von einer Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Kernschmelze von unter 10^{-7} pro Reaktorjahr auszugehen.

Tabelle 3: Unfallkategorien nach der Deutschen Risikostudie Phase B

Unfallkategorien	
1	Großflächiges Sicherheitsbehälterversagen
2	Primärkreisleck im Ringraum
3	Dampferzeuger-Heizrohrleck ohne Wasservorlage im defekten Dampferzeuger
4	Dampferzeuger-Heizrohrleck mit Wasservorlage im defekten Dampferzeuger
5	Erhöhte Leckage des Sicherheitsbehälters über Ringraum und Hilfsanlagegebäude
6	Gezielte Druckentlastung bei 0,6 MPa und Freisetzung über Kamin

Die ermittelten Werte für Quellterme und Wahrscheinlichkeiten der sechs untersuchten Ereignisabläufe bzw. Unfallkategorien mit großer Freisetzung an Radioaktivität (siehe Tabelle 4) bilden die Grundlage für die Betrachtung in der vorliegenden Untersuchung. Der Quellterm gibt an, welcher Anteil der im Reaktor vorhandenen radioaktiven Stoffe beim Unfall freigesetzt wird (1 heißt also, dass der gesamte Stoff zu 100 % freigesetzt wird).

Tabelle 4: Quellterme, bezogen auf das Kerninventar für verschiedene Ereignisabläufe mit Freisetzung radioaktiver Stoffe nach der Deutschen Risikostudie Phase B (GRS 1989), Eintrittswahrscheinlichkeit nach (Krewitt 1996), Häufigkeit pro Reaktorjahr (Ry)

Unfallkategorie	Quellterm des radioaktiven Stoffs									Häufigkeit [1/Ry]
	Xe	I	Cs	Te	Sr	Ru	La	Ce	Ba	
1	1,0E+00	7,5E-01	7,5E-01	7,5E-01	4,0E-01	1,0E-05	2,0E-02	4,0E-02	3,0E-01	1,0E-07
2	1,0E+00	3,7E-01	3,7E-01	2,3E-01	1,7E-01	2,5E-06	6,4E-03	1,4E-02	1,1E-01	1,0E-07
3	1,7E-01	1,5E-01	1,5E-01	5,0E-02	6,7E-05	8,8E-08	7,0E-09	0,0E+00	1,4E-03	1,0E-08
4	1,7E-01	2,5E-02	2,5E-02	1,5E-02	1,3E-05	1,7E-08	1,3E-09	0,0E+00	2,7E-04	1,0E-08
5	1,0E+00	7,8E-03	3,5E-04	2,1E-03	1,5E-04	3,6E-07	5,6E-06	1,3E-05	1,3E-04	1,0E-06
6	9,0E-01	2,0E-03	3,3E-07	3,5E-06	2,0E-07	6,4E-10	6,3E-08	2,0E-08	1,7E-07	1,0E-06

Tabelle 5 zeigt die für die betrachteten Ereignisabläufe berechneten Gesundheitsschäden und Todesfälle, sowie den durch Bodenkontamination verlorenen menschlichen Lebensraum.

Tabelle 5: Physische Folgen der Freisetzung radioaktiver Stoffe bei schweren Reaktorunfällen

Unfall- kategorie	Todesfälle		Krankheiten nicht-tödliche Krebsfälle und genetische Effekte [YLD]	Kontaminierte Fläche [km ²]
	unmittelbar [Fälle]	latent [Fälle]		
1	1,6E+03	1,2E+05	1.67E+06	6,1E+04
2	5,8E+02	5,8E+04	7.91E+05	3,1E+04
3	1,1E+02	1,2E+04	1.66E+05	2,3E+03
4	3,2E+01	2,2E+03	3.05E+04	4,6E+02
5	5,0E+00	2,9E+02	3.94E+03	4,9E+01
6	2,4E-01	1,3E+02	1.80E+03	7,1E-02

Bezogen auf die jährliche Stromerzeugung eines Kernkraftwerks mit einer Leistung von 1.200 MW_{el} und einer jährlichen Auslastung von 85 % ergeben sich spezifische Gesundheitsschäden von etwa $1 \cdot 10^{-7} \text{ YOLL/MWh}_{el}$ durch Mortalität (Todesfälle) bzw. ca. $2 \cdot 10^{-7} \text{ DALY/MWh}_{el}$ durch Mortalität und Morbidität (Todesfälle und Krankheiten).

Für die unterschiedlichen Unfallkategorien ergeben sich die Schadenskosten in Tabelle 6. Der Verlust der Anlage, der bei allen 6 Unfallkategorien unterstellt wird, hat in den Unfallkategorien 5 und 6 den größten Beitrag an den Kosten. Bei stärkeren Freisetzungen an Radioaktivität mit entsprechenden Bodenkontaminationen sind insbesondere die volkswirtschaftlichen Verluste im Umkreis sowie die Kosten für die Umsiedlung von großer Bedeutung. Die Kosten für die Gesundheitsschäden tragen maximal zu 6 % an den gesamten Kosten schwerer Unfälle bei.

Die schwersten ökonomischen Auswirkungen entstehen in der Unfallkategorie 1 und betragen etwa 14,1 Bio. Euro, also ca. das 6-fache des deutschen Bruttoinlandsprodukts. Die Wahrscheinlichkeit der Unfallkategorie 1 liegt etwa bei $1 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr. Dies führt dazu, dass die spezifischen ökonomischen Konsequenzen je erzeugter MWh_{el} bei dieser Unfallkategorie trotzdem nur bei $0,15 \text{ €/MWh}_{el}$ liegen (siehe Tabelle 6)

Tabelle 6: Schäden in €je MWh_{el} und absolute Schadenshöhe in Mrd. € bei schweren Reaktorunfällen

Unfall- kategorie	Gesundheits- schäden Mortalität [€/MWh _{el}]	Gesundheits- schäden Morbidity [€/MWh _{el}]	Umsiedlung [€/MWh _{el}]	Wirtschafts- leistung [€/MWh _{el}]	Anlage [€/MWh _{el}]	Summe [€/MWh _{el}]	absolute Schadens- höhe [Mrd. €]
1	4,1E-05	9,2E-04	9,1E-02	6,1E-02	1,1E-04	1,5E-01	14.100
2	1,5E-05	4,3E-04	4,6E-02	3,0E-02	1,1E-04	7,7E-02	7.075
3	2,9E-07	9,2E-06	3,4E-04	2,3E-04	1,1E-05	5,9E-04	545
4	8,2E-08	1,7E-06	6,8E-05	4,5E-05	1,1E-05	1,3E-04	115
5	1,3E-06	2,2E-05	7,3E-04	4,8E-04	1,1E-03	2,4E-03	22
6	6,2E-08	9,9E-06	1,1E-06	7,0E-07	1,1E-03	1,2E-03	11
Σ	5,8E-05	1,4E-03	1,4E-01	9,2E-02	2,5E-03	2,3E-01	-

Die spezifischen Schäden liegen in Abhängigkeit der Unfallkategorie zwischen $1,3 \cdot 10^{-4}$ (Unfallkategorie 3) bis $1,5 \cdot 10^{-1}$ €/MWh_{el} Unfallkategorie 1). Insgesamt beträgt der Erwartungswert der Schadenskosten 0,23 €/MWh_{el} bzw. 0,02 €/Ct./kWh_{el}.

Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien

Die hier ermittelten Auswirkungen und Wahrscheinlichkeiten von schweren Unfällen der Kernenergie zeigen grobe Abschätzungen zur Größenordnung der Folgen schwerer Unfälle in Kernkraftwerken. In der Berechnung konnten nicht alle Kosten mitberücksichtigt werden. Beispielsweise fehlen die Kosten für Konsumverbote von Nahrungsmitteln. Auch sind die Kosten für Dekontamination und Entsorgung gefährlicher Abfallstoffe nicht mit einbezogen worden. Die Kosten für Konsumverbote von Nahrungsmittel werden in (European Commission 1995) in Abhängigkeit von der Freisetzung radioaktiver Strahlung ermittelt und betragen dort zwischen 0,02 und 37,9 Mrd. Euro. In (Günther et al. 2011) sind die Schäden nicht-tödlicher Erkrankungen in etwa auf dem gleichen Niveau wie für die tödlich verlaufenden Krankheiten und betragen dort etwa 80 Mrd. Euro. Im Projekt SECURE (Burgherr, Eckle and S. Hirschberg 2011) wurden die Auswirkungen eines Reaktorunfalls an einem Standort an der amerikanischen Ostküste berechnet. Die gesamten Schadenskosten lagen bei vergleichbaren Freisetzungsraten zwischen 13 und 88 Mrd. Euro. In einer frühen Studien der ExternE-Reihe (European Commission 1995) wurden die Auswirkungen verschiedener Reaktorunfälle an einem Standort in Zentraleuropa untersucht. Der maximale Schaden belief sich dort umgerechnet auf etwa 83 Mrd. Euro.

Bei den hier durchgeführten Berechnungen entstehen besonders hohe Schäden durch den angenommenen fünfjährigen Ausfall der Wertschöpfung im Umkreis der Anlage und durch die Kosten für die Umsiedlung. Im Vergleich mit den oben zitierten Ergebnissen dürfte

diese Berechnungen damit eine konservative Abschätzung der Gesamtschäden pro Unfall darstellen.

Die spezifischen ökonomischen Auswirkungen pro MWh_{el} sind stark davon abhängig, mit welcher Häufigkeit ein Unfall einer jeweiligen Unfallkategorie stattfindet. Da die Eintrittshäufigkeit linear in die Berechnung der resultierenden Schäden eingeht, ist der Einfluss einer Änderung der Eintrittshäufigkeit leicht nachzuvollziehen. Weiterhin spielt der Standort eine entscheidende Rolle. An küstennahen und an weniger dicht bevölkerten Standorten reduzieren sich die Konsequenzen.

4.2 Risiken durch schwere Unfälle in den anderen Stromerzeugungssystemen

Schwere Unfälle im Bereich der biogenen fossilen Energieketten, d. h. Biomasse, Öl, Erdgas und Kohle, betreffen überwiegend die Arbeiter in den Anlagen, und nicht die Bevölkerung (NewExt 2004). Wohingegen beispielsweise beim Bruch eines Staudamms vorwiegend Anwohner flussabwärts stark betroffen sind. Seit Anfang der 1990er Jahre werden vom Paul Scherrer Institut in der *ENSAD-Datenbank (Energy-Related Severe Accident Database)* die Folgen von Unfällen bei Energiesystemen dokumentiert. Die Datenaufzeichnung wurde rückwirkend bis zum Jahre 1970 ergänzt. In der Datenbank werden nicht nur schwere Unfälle bei der Energieerzeugung, sondern auch schwere Unfälle entlang der gesamten Energiekette bzw. der Prozessstufen des jeweiligen Systems (Exploration, Förderung, Aufarbeitung, Lagerung, Verteilung und Entsorgung) berücksichtigt (siehe hierzu <http://gabe.web.psi.ch/research/ra/>). Für alle der hier betrachteten Stromerzeugungstechnologien liegen Daten in der *ENSAD-Datenbank* vor. Abbildung 5 zeigt die spezifische Anzahl an Todesopfern pro Gigawattjahr ($GW_{a_{el}}$) bzw. die maximale Anzahl an Todesopfern der Stromerzeugungssysteme für den Zeitraum 1970 bis 2008.

Bei der Gegenüberstellung der Daten fällt auf, dass in den weniger entwickelnden Staaten (Nicht-*OECD* Staaten) Anzahl und Ausmaß von Unfällen bei fossilen Energieträgern und der Wasserkraft höher sind als in den *OECD*-Staaten und den Ländern der EU-27. Die spezifische Anzahl an Todesopfern ist bei den zentralen Stromerzeugungstechnologien für die Wasserkraft (*OECD*) und für die Nutzung der Kernenergie in einem Kernkraftwerk der zweiten Generation (Ergebnisse dieser Studie) am geringsten. Auf der anderen Seite ist das potenzielle Schadensausmaß bei diesen beiden Stromerzeugungssystemen am größten. Zum Beispiel verursachte der Dammbbruch am Wasserkraftwerk Banqiao/Shimantan alleine schon rund 26.000 Todesopfer. Mit 2.500 Todesopfern liegt der zweitgrößte schwere Unfall bei der Wasserkraftwerknutzung zur Energieerzeugung um etwa das Zehnfache unterhalb der Anzahl der Todesopfer in Banqiao/Shimantan. Auch der Reaktorunfall von Tschernobyl ist insgesamt für mehrere tausend Todesopfer verantwortlich (untere Abschätzung: 9.000 Todesopfer, obere Abschätzung: 33.000 Todesopfer {Burgherr et al. 2011}). Bei der Kernenergie sind die Todesfallraten aus den im vorliegenden Bericht erzielten Resultaten

derzeit höher als die historischen Werte aus dem Unfall von Tschernobyl. Dies hängt damit zusammen, dass keine empirischen Daten zu Unfällen in westlichen Kernkraftwerken mit großer Freisetzung an Radioaktivität vorliegen¹². Die hier angegebenen Zahlen für die Kernenergie beziehen sich auf die hier berechneten Ergebnisse mithilfe probabilistischer Sicherheitsanalysen. Bei den kohlebefeuerten Stromerzeugungstechnologien wurden die schweren Unfälle aus China nicht miteinbezogen, da dort in der Vergangenheit eine hohe Anzahl im Kohlebergbau zu einer Vervielfachung der Todesfallraten in den Nicht-*OECD*-Staaten führte. Bei dezentralen Stromerzeugungssystemen zur Nutzung erneuerbarer Energien, wie Wind und Solarenergie, ist generell die Gefahr schwerer Unfälle geringer.

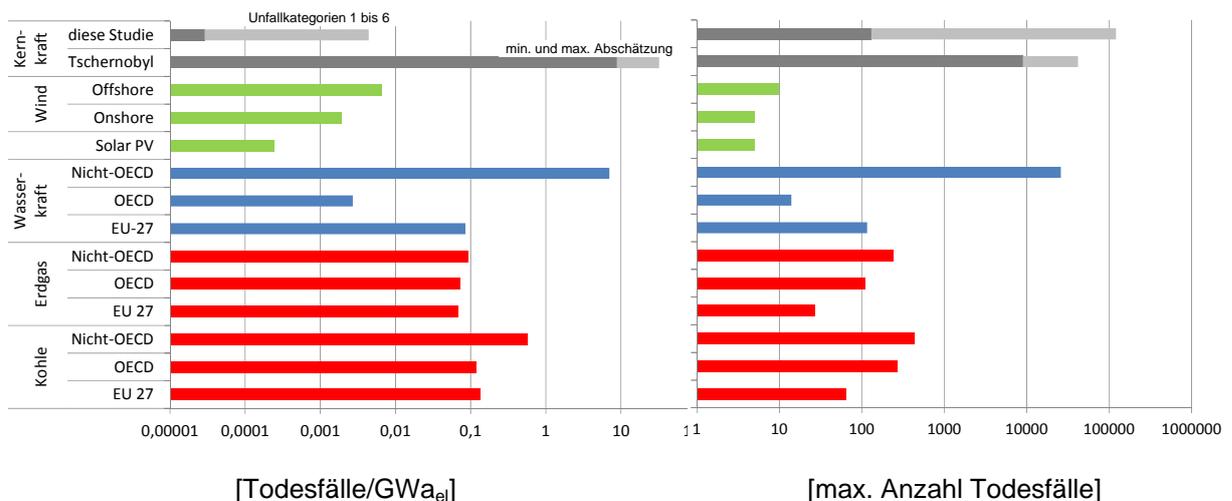


Abbildung 5: Todesopfer infolge schwerer Unfälle bei Stromerzeugungssystemen zwischen 1970 und 2008 (ENSAD-Datenbank, und eigene Resultate)

Im Rahmen der ExterneE-Projektreihe wurden in dem Projekt *NewExt* (NewExt 2004) die schweren Unfälle von Stromerzeugungssystemen monetär bewertet. Dies wurde getrennt nach Industrieländern (*OECD*) und *Nicht-OECD*-Staaten durchgeführt. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der monetären Bewertung der schweren Unfälle von Stromerzeugungssystemen dargestellt. Die monetäre Bewertung der schweren Unfälle bezieht sich auf die Auswertung der *ENSAD-Datenbank* über den Zeitraum 1970 bis 2000, sowie bei der Kernenergie auf die eigenen Ergebnisse dieses Berichts. Mit einer Bandbreite von 0,01 bis 15 €Ct./MWh_{el} sind die ökonomischen Auswirkungen eines schweren Unfalls bei der Kernenergie entweder am geringsten oder mit am höchsten im Vergleich zu den anderen Technologiesystemen. Die untere Grenze der hier ermittelten Bandbreite der Kernenergie liegt unterhalb der Werte der anderen Technologiesysteme in *NewExt*. An nächster Stelle folgen die spezifischen Schadenskosten der hydroelektrischen Anlagensysteme in den *OECD*-Staaten. Die obere

¹² Bis heute kam es in drei nuklearen Anlagenkomplexen zu Kernschmelzen (Three Mile Island (USA, 1979), Tschernobyl (Ukraine, 1986) und Fukushima Daiichi (Japan, 2011)) wobei in Three Mile Island kaum Radioaktivität nach außen gelang und für den Unfall in Fukushima Daiichi noch keine gesicherten Daten vorliegen. Jedoch wurde dort im Vergleich zu Tschernobyl bedeutend weniger Radioaktivität freigesetzt.

Grenze der Bandbreite der Kosten schwerer Unfälle bei der Kernenergie liegt damit im Bereich der Kosten schwerer Unfälle der weltweiten Nutzung der Wasserkraft und der Nutzung der Kohle in China. Damit weisen die Nutzung der Wasserkraft und die der Kernenergie ähnliche Charakteristiken bei dem monetären Ausmaß schwerer Unfälle auf.

Tabelle 7: Schadenskosten aufgrund von schweren Unfällen in €-Ct./MWh_{el} (NewExt 2004)*

Energieträger	Region	€-Ct./MWh_{el}
Kohle	<i>OECD</i>	1,73
	Nicht- <i>OECD</i> w/o China	6,58
	China (1994-1999)	12,20
Erdgas	<i>OECD</i>	0,81
	Nicht- <i>OECD</i>	1,00
Wasserkraft	<i>OECD</i>	0,20
	Nicht- <i>OECD</i>	123,00
	Nicht- <i>OECD</i> ohne Banqiao/Shimantan	16,10
Kernenergie	Deutschland	0,01 bis 15,00

*Summe aus (NewExt 2004), Kernenergie aus eigener Berechnung

5 Zusammenfassung

5.1 Ergebnisse der Quantifizierung der Schadenskosten

Bis heute ist es noch nicht möglich, alle durch die verschiedenen Prozessstufen eines Energiesystems verursachten Effekte auf die Umwelt und auf die betroffene Bevölkerung zu quantifizieren. Dies trifft sowohl für die Kernenergie als auch für die anderen Technologien zu. Vor dem Hintergrund der Risikobewertung und Einordnung der Kernenergie im Vergleich zu anderen Stromerzeugungstechnologien wurde eine ausführliche Literaturauswertung zu den Risiken von Stromerzeugungstechnologien vorgenommen sowie eine quantitative Abschätzung der Risiken schwerer Unfälle von Kernkraftwerken durchgeführt.

Im Rahmen dieses Berichts wurden folgende Aspekte zur Abschätzung der Risiken von Stromerzeugungstechnologien betrachtet:

- Öffentliche Gesundheitsschäden
- Arbeitsbedingte Gesundheitsschäden
- Materialschäden
- Ernte- und Biodiversitätsverluste
- Auswirkungen schwerer Unfälle

Berücksichtigt wurden somit wesentliche Kriterien, die für einen Vergleich unterschiedlicher Energiesysteme im Hinblick auf ihr Risikopotenzial erforderlich sind. Die Ergebnisse der quantifizierten Schadenskosten für die betrachteten Stromerzeugungstechnologien werden in Abbildung 6 zusammengefasst.

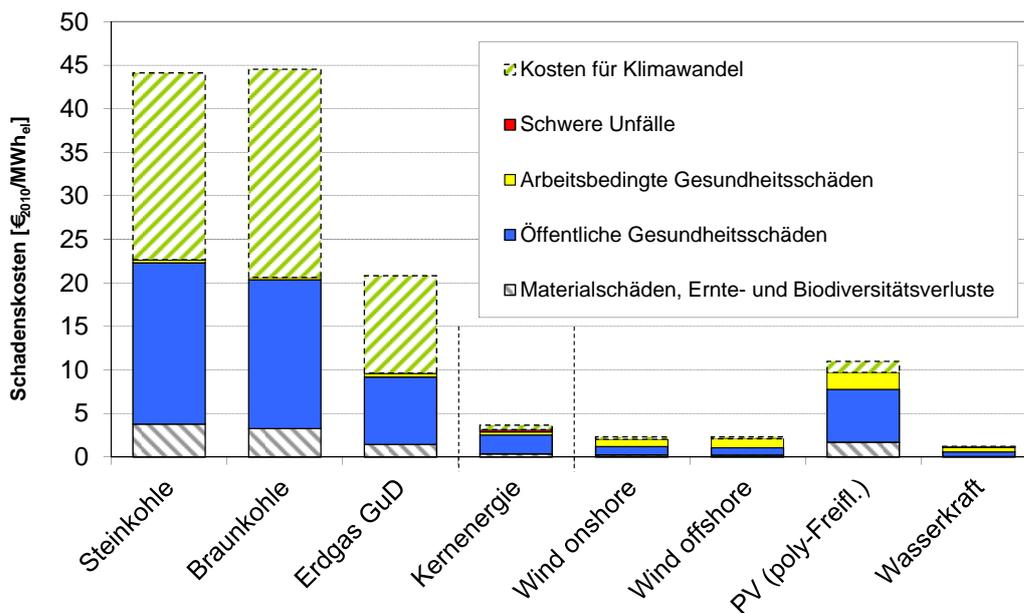


Abbildung 6: Schadenskosten der Kernenergie im Vergleich mit anderen Stromerzeugungstechnologien

Beim Vergleich der Kernenergie mit den anderen Stromerzeugungstechnologien fällt auf, dass die durchschnittlichen Schadenskosten der Kernenergie eher im Bereich der erneuerbaren Energien liegen und damit deutlich unterhalb der Schadenskosten für fossile Kraftwerke sind. Es zeigt sich, dass bei allen Stromerzeugungstechnologien, und damit auch bei der Kernenergie, die Einbeziehung schwerer Unfälle kaum einen Einfluss auf die quantitative Höhe der durchschnittlichen Schadenskosten haben.

5.2 Schlussfolgerung

Ohne Zweifel kann das radioaktive Inventar eines Kernreaktors ein ganz erhebliches Schadenpotenzial für die Umwelt und Gesundheit in einem Land über eine lange Zeit darstellen. Die Kenntnis hierzu zwingt zu erheblichen Vorsorge- und Sicherheitsmaßnahmen, die verhindern müssen, dass es zu größeren Freisetzungen an Radioaktivität in die Umwelt kommt. Auch nach dem schweren Unfall im japanischen Kernkraftwerk Fukushima kann davon ausgegangen werden, dass die berechneten Wahrscheinlichkeiten für schwere Unfälle in deutschen Kernkraftwerken den tatsächlichen Wahrscheinlichkeiten in etwa entsprechen. Die in Deutschland relevanten auslösenden internen und externen Ereignisse (z. B. Erdbeben, Hochwasser) sind in den Risikoanalysen und Vorsorgemaßnahmen berücksichtigt. Gegen die hohe Tsunamiwelle war das japanische Kernkraftwerk *Fukushima-Daiichi* nicht ausgelegt, obwohl das Auftreten solch eine Wellenhöhe für den Standort sehr wahrscheinlich ist. Daher ist der schwere Unfall nicht auf ein Restrisiko zurückzuführen.

Die vorausstehenden Ausführungen zeigen, dass keine Art der Stromgewinnung gefahrlos und ohne Einfluss auf die Umwelt ist. In welchem Verhältnis die Kernenergie zu anderen Energiesystemen steht, zeigt der Vergleich der Umwelt- und Gesundheitsrisiken und der Schadenskosten der Kernenergie mit den anderen Möglichkeiten zur Stromerzeugung. Die Gesundheitsrisiken der Kernenergie sind um ein Vielfaches geringer als die der fossilen Stromerzeugungssysteme. Dabei wurden im Vergleich fossile Technologiesysteme mit den höchsten heute verfügbaren Wirkungsgraden und wirksamsten Rauchgasreinigungssystemen betrachtet.

Zur Erfassung sämtlicher heute quantifizierbarer Risiken, die mit der Stromerzeugung verbunden sind, wurden die Schadenskosten für die unterschiedlichen Technologien berechnet. Insgesamt zeigt sich, dass die mit der Nutzung der Kernenergie verbundenen Gesundheitsrisiken und ökonomischen Risiken tendenziell auf einer Höhe mit den Schadenskosten von Systemen zur Nutzung regenerativer Energien liegen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kernenergie in Deutschland weniger Umwelt- und Gesundheitsrisiken verursacht als der heute noch vorhandene Strommix mit seinem hohen Anteil fossiler Energieträger. Die durch externe Effekte und arbeitsbedingte Schäden entstehenden Schadenskosten, insbesondere bei den fossilen Stromerzeugungstechnologien sollten nicht vernachlässigt werden. Es sollten aber auch die

Stromerzeugungskosten berücksichtigt werden. Nach (Wissel et al. 2010) liegen die privaten Stromerzeugungskosten für die Kernenergie bei rund 50 €/MWh_{el} und für Systeme zur Nutzung erneuerbaren Energien im günstigsten Fall bei rund 80 €/MWh_{el} bzw. in der Regel deutlich oberhalb von 100 €/MWh_{el} (ohne den erforderliche Ausbau des Stromnetzes). Damit ist die Summe aus Schadenskosten und privaten Stromgestehungskosten bei Systemen zur Nutzung regenerativer Energien mindestens doppelt so hoch wie bei der Kernenergie.

Es stellt sich auch die Frage, ob es durch den verstärkten Einsatz teurer Systeme zur Stromerzeugung zu negativen Auswirkungen bei der Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung kommt, und es dadurch zu inakzeptablen volkswirtschaftlichen Belastungen kommt.

Abschließend sei festgestellt, die mit den hier vorgelegten Ergebnissen, die Aussage der Ethik Kommission, dass „die Kernenergie durch risikoärmere Technologien ökologisch, wirtschaftlich und sozialverträglich“ ersetzt werden kann, nicht bestätigt wird.

6 Literatur

- Anthoff, D. 2007. Report on marginal external costs inventory of greenhouse gas emissions. In *NEEDS Deliverable D5.4, RS1b - Project no: 502687*.
- Berg, H. P. (2004) *PSA Guidance for the Comprehensive Review of Nuclear Power Plants*. 4. Bieleeschweig Workshop "Systems Engineering": Risiko-Analyse und Unfall-Ursachen-Analyse. TU Braunschweig.
- BfS (2002) Convention on Nuclear Safety 2002, Second Review Process. RESPONSES TO THE QUESTIONS AND COMMENTS ON THE NATIONAL REPORT OF GERMANY. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) Salzgitter, 2002.
- Burgherr, P., P. Eckle & S. Hirschberg (2011) Deliverable n° 5.7.2a "Final Report on Severe Accident Risks including Key Indicators". SECURE - Security of Energy Considering its Uncertainty, Risk and Economic implications, E. Cazzoli. Villigen, 2011.
- Burgherr, P., S. Hirschberg & E. Cazzoli. 2008. Final report on quantification of risk indicators for sustainability assessment of future electricity supply options. In *NEEDS project, FP6, Rs2b_D7.1 - Project no: 502687*.
- Desaigues, B., D. Ami, A. Bartczak, M. Braun-Kohlová, S. Chilton, M. Czajkowski, V. Farreras, A. Hunt, M. Hutchison, C. Jeanrenaud, P. Kaderjak, V. Máca, O. Markiewicz, A. Markowska, H. Metcalf, S. Navrud, J. S. Nielsen, R. Ortiz, S. Pellegrini, A. Rabl, R. Riera, M. Scasny, M.-E. Stoeckel, R. Szántó & J. Urban (2011) Economic valuation of air pollution mortality: A 9-country contingent valuation survey of value of a life year (VOLY) *Ecological Indicators*, 11, 902–910.
- DESTATIS. 2011. Lange Reihen ab 1950 -Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen- Bruttoinlandsprodukt, Bruttonationaleinkommen, Volkseinkommen
- Ethik-Kommission. 2011. Ethik-Kommission, 2011. Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft. Vorgelegt von der Ethik-Kommission "Sichere Energieversorgung" - im Auftrag der Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel, Berlin.
- European Commission. 1995. ExternE – Externalities of Energy Vol. 5 Nuclear. eds. M. Dreicer, V. Tort & P. Manen. EUR 16524, Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN).
- ExternE-Pol. 2004. Externalities of Energy: Extension of accounting framework and Policy Applications. In *Project funded by the European Community under the 'EESD' Programme, CONTRACT N° : ENGI-CT2002-00609*.
- Frischknecht, R., A. Braunschweig, P. Hofstetter & P. Suter (2000) Modelling human health effects of radioactive releases in Life Cycle Impact Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 20, 159-189.
- GBE. 2011. Berufskrankheiten. http://www.gbe-bund.de/gbe10/trecherche.prc_them_rech?tk=8500&tk2=14000&p_uid=gast&p_aid=23841907&p_sprache=D&cnt_ut=1&ut=14000.
- GRS (1980) Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) GmbH. Deutsche Risikostudie. Eine zusammenfassende Darstellung. Köln, 1980.
- (1989) Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, 1989. Deutsche Reaktorstudie Kernkraftwerke *Phase B*. Eine zusammenfassende Darstellung. GRS-72.
- Günther, B., T. Karau, E. Kastner & W. Warmuth. (2011) Berechnung der risikoadäquaten Versicherungsprämie zur Deckung der Haftpflichtrisiken, die aus dem Betrieb von Kernkraftwerken resultieren. Eine Studie im Auftrag des Bundesverband Erneuerbare Energien e. V. (BEE), 2011.
- Hofmeister, F. (2006) "Die Rückgewinnung von Feuchtgebieten als eine Lösung für aktuelle Umweltprobleme: Hemmnisse und Möglichkeiten". Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.) an

- der Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.”, Universitätsbibliothek, 2006.
- Huijbregts, M. A. J., L. Rombouts, A. Ragas & D. Van de Meent (2005) Human-toxicological effect and damage factors for lifecycle impact assessment of carcinogenic and noncarcinogenic chemicals. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1, 181-244.
- IAEA (1988) International Atomic Energy Agency (IAEA). International Nuclear Safety Advisory Group. Basic Safety Principles of Nuclear Power Plants. Safety Series No. 75 - INSAG 3. Vienna, 1988.
- (2006) International Atomic Energy Agency (IAEA). Promoting Safety in Nuclear Installations. Wien.
- ICRP 60. 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 60. Annals of the ICRP Volume 21/1-3. International Commission on Radiological Protection.
- ILK (2008) Grundlegende Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke. (Beilage zur ILK-31), ILK- Internationale Länderkommission Kerntechnik Baden-Württemberg-Hessen. Augsburg, 2008.
- Krewitt, W. 1996. Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme. Stuttgart: IER Band 33.
- . 2009. External costs from emerging electricity generation technologies, NEEDS project, FP6, Rs1a_D6.1 - Project no: 502687.
- Kuzcera, B., L. Mohrbach, W. Tromm & J. Knebel. (2011) “Fukushima auch in Deutschland?” *Spektrum der Wissenschaft*: August (2011), pp. 76–83.
- Markandya, A., A. Bigano, F. Eni Enrico & R. Porchia (2011) “The Social Cost Of Electricity - Scenarios and Policy Implications. Italy: EDWARD ELGAR Publishing.
- NewExt. 2004. Final Report to the European Commission, DG Research, Technological Development and Demonstration (RTD) - NewExt - New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies. eds. R. Friedrich, A. Rabl, S. Hirschberg, B. Desaiques, A. Markandya & L. d. Nocker, 333. Universitaet Stuttgart, Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER).
- Preiss, P., R. Friedrich & V. Klotz. 2008. Report on the procedure and data to generate averaged/aggregated data, including ExternalCosts_per_unit_emission_080821.xls, NEEDS project, FP6, Rs3a_D1.1 - Project no: 502687. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart.
- PSI (2005) Schwere Unfälle im Energiebereich. *Energie-Spiegel* 13.
- UBA. 2007. Umweltökonomie und Umweltmanagement, Erfassung und Bewertung als Baustein des Umweltmanagementsystems
- Vitázková, J. & E. Cazzoli (2011) Estimate of Consequences from the Fukushima Disaster, PROCEEDINGS Nordic PSA Conference - Castle Meeting 2011. Johannesbergs Slott, Göttröra, Sweden, 2011.
- Weiß, F. P. & H. G. Willschütz (2007) Wie sicher sind Kernkraftwerke? - Stand der Sicherheitsforschung. Seiten 91-114. Berlin, 2007. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, FZD.
- WHO. 2004. Global Burden of Disease 2004 Update: Disability Weights for Disease and Conditions.
- Wissel, S., U. Fahl, M. Blesl & A. Voß. 2010. Erzeugungskosten zur Bereitstellung elektrischer Energie von Kraftwerksoptionen in 2015. In *IER Working Paper 7*. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart.

7 Anhang

Anhang A

Tabelle 8: Definition von verwendeten Begriffen

Arbeitsbedingte Gesundheitsschäden	Beinhalten Arbeitsunfälle, Wegeunfälle und Berufskrankheiten.
Arbeitsbedingte Gesundheitskosten	In monetären Werten ausgedrückte berufsbedingte Gesundheitsschäden
Externe Kosten	Umwelt- und Gesundheitskosten, die nicht internalisiert sind
Gefahr*	Zustand, Umstand oder Vorgang, durch dessen Einwirkung ein Schaden an einem Schutzgut entstehen kann
Gefährdung*	Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass an einem konkreten Ort aus einer Gefahr ein Ereignis mit einer bestimmten Intensität erwächst, das Schaden an einem Schutzgut verursachen kann
Normalbetrieb	Geplanter Ablauf von Prozessen; Umwelteinwirkungen werden in LCI erfasst
Restrisiko	Restrisiko ist das trotz technischer Vorsorge verbleibende Risiko des Versagens einer technischen Anlage. Das Restrisiko besteht in unvorhersehbaren Störfällen, Kombination von unglücklichen Umständen, die zu Störfällen führen, und im menschlichen Fehlverhalten. Das Restrisiko besteht aus einem abschätzbaren und einem unbekanntem Anteil.
Risiko*	Maß für die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines bestimmten Schadens an einem Schutzgut unter Berücksichtigung des potentiellen Schadensausmaßes.
Schaden*	Negativ bewertete Auswirkung eines Ereignisses auf ein Schutzgut

Schutzgut*	Alles, was aufgrund seines ideellen oder materiellen Wertes vor Schaden bewahrt werden soll, inklusive Gesundheit
Schwere Unfälle	Bezeichnet Unfälle, bei denen es zu einer wesentlichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen kommt die nicht nur das Personal sondern auch die Bevölkerung betreffen. Nach (PSI 2005) (ENSAD Datenbank) ist ein schwerer Unfall, wenn mindestens eines der folgenden Kriterien zutrifft. <ol style="list-style-type: none"> 1. mindestens 5 Todesfälle 2. mindestens 10 Verletzte 3. mindestens 200 Evakuierte 4. ein weit reichendes Verbot des Verzehrs von Lebensmitteln 5. eine Freisetzung von mindestens 10 000 Tonnen Kohlenwasserstoffen 6. die Säuberung einer Land- oder Wasserfläche von mindestens 25 km² 7. wirtschaftliche Schäden von mindestens 5 Millionen USD (Preisstand 2000)
Störfall	Nach der INES Skala der IAEA kommt es bei Störfällen zu keinen radioaktiven Freisetzungen außerhalb der Anlage
Umwelt- und Gesundheitskosten	In monetären Werten ausgedrückte Umwelt- und Gesundheitsschäden
Umweltauswirkungen	Durch Umwelteinwirkungen verursachte Schäden an Schutzgütern
Umwelteinwirkungen im Normalbetrieb	Im Rahmen von Risikoanalysen werden insbesondere Unfälle bewertet. Umwelteinwirkungen die im Normalbetrieb entstehen werden im Rahmen von Ökobilanzierungen (LCA) erfasst.
Umwelteinwirkungen**	Unter Umwelteinwirkungen werden generell alle belastenden Wirkungen auf die Umwelt verstanden, die sich auf die menschlichen Tätigkeiten (Wirtschaft, Bevölkerung) zurückführen lassen. Zu den wichtigsten Umwelteinwirkungen zählen

	<ul style="list-style-type: none"> - Emissionen stofflicher Art - Schallemissionen, - Ressourcenverbrauch bzw. die Ressourcenbeanspruchung (fossile Energieträger, Rohstoffe, Wasser), die Flächenbeanspruchung - optische Wirkungen durch die Dominanz baulicher Strukturen.
Unfall	Bei einem Unfall können durch direkt physische Einwirkungen und durch Umwelteinwirkungen Schäden an Umwelt und Gesundheit entstehen

*Definition nach (Deutscher Bundestag, Drucksache 17/4178, 2010), ** (UBA 2007)

Anhang B

Tabelle 9: Abkürzungen

Abk.	Bedeutung
Ba	Barium
Ce	Cer
Cs	Cäsium
<i>DALY</i>	Disability Adjusted Life Years
I	Iod
La	Lanthan
Ru	Ruthenium
Sr	Strontium
Te	Tellur
Xe	Xenon
<i>YLD</i>	Years of Life Lost Due to Disability
<i>YOLL</i>	Years of Life Lost

Anhang C

Sicherheitsanforderungen und Sicherheitskonzepte von Kernkraftwerken

Das internationale Sicherheitskonzept der Kernkraftwerke dient zur Gewährleistung der Schadensverhütung und zur Beherrschung von Schadensereignissen bzw. zur Begrenzung von Schadensfolgen. Mithilfe der Sicherheitsvorkehrungen sind insbesondere die drei Schutzziele Kontrolle der Radioaktivität, Kühlung des Reaktors und Rückhaltung der Radioaktivität einzuhalten. Ein vierstufiges Sicherheitskonzept (vgl.) sowie Barrieren zur Rückhaltung der Aktivität umfassen diese Sicherheitsvorsorge. Bis zur dritten Sicherheitsebene sind die Anlagen so ausgelegt, dass die Freisetzung an Radioaktivität nicht

die Grenzwerte des bestimmungsgemäßen Betriebs überschreitet¹³. Dabei werden repräsentative Ereignisse für die Anlage berücksichtigt. Zu diesen Ereignissen gehören anlageninterne, anlagenexterne und allgemein übergreifende Vorkommen (wie z. B. Brand und Hochwasser).

In der Sicherheitsebene 4 sind Vorkehrungen vorgesehen, die das verbleibende Risiko durch spezielle seltene Ereignisse (wie zum Beispiel Flugzeugabsturz $<10^{-6}$ pro Jahr, Hochwasser $<10^{-4}$ pro Jahr, Erdbeben $<10^{-5}$ pro Jahr) oder durch auslegungüberschreitende Anlagenzustände mit oder ohne Kernschäden vermindern sollen¹⁴. Damit sind zum Beispiel die deutschen Anlagen gegen weit seltenere Ereignisse (intern und extern) als die japanischen Kernkraftwerke bei denen im Schnitt alle 30 Jahre ein Tsunami mit einer Wellenhöhe von mindestens zehn Meter auf einen Küstenabschnitt trifft. ausgelegt als das japanische Kernkraftwerk Fukushima-Daiichi, an dessen Standort durchschnittlich alle 30 Jahre ein Tsunami von mehr als 10 m Wellenhöhe an einem Küstenabschnitt zu erwarten ist (Kuzcera et al. 2011).

Tabelle 10: Gestaffeltes Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke (nach (ILK 2008) und (Weiß und H. G. Willschütz 2007))

Sicherheits-ebene			Häufigkeiten ^{a)} der Anlagenzustände bzw. Ereignisse	technische Einrichtungen ^{b)}				
1	bestimmungsgemäßer Betrieb	Normalbetrieb und Revision	andauernd	Betriebssystem		betriebliche Systeme	Einhaltung Grenzwerte	Auslegungsbereich / Vorsorge
2		anormaler Betrieb	gelegentlich ¹⁾		c)	Begrenzung und Schutzsysteme		
3		Störfälle	selten ²⁾	Sicherheitssystem				
4a		spezielle sehr seltene Ereignisse	sehr selten ^{*)}	Spezielle Maßnahmen				
4b		auslegungüberschreitende Anlagenzustände ohne schwere Kernschäden	sehr selten ³⁾	Anlageninterner Notfallschutz	Präventiv	Maßnahmen zum Vermeiden von Kernschäden	präventive bzw. mitigative Maßnahmen	auslegungüberschreitender Bereich
4c		Anlagenzustände mit Versagen aller präventiven Maßnahmen, schwere Kernschäden	Extrem selten ⁴⁾		Mitigativ	Maßnahmen zur Minderung radioaktiven Freisetzung		

¹³ Zur sicherheitstechnischen Auslegung des Kernkraftwerks werden sogenannte repräsentative Ereignisse berücksichtigt.

¹⁴ Die Auswirkungen der Ereignisse von außen tragen zur Gesamthäufigkeit ($<10^{-5}$ pro Reaktor und Jahr) systemtechnisch nicht beherrschbarer Zustände der Anlage einen kleineren Anteil bei als die Auswirkungen anlageninterner Ereignisse.

-
- a) Orientierungswerte für Häufigkeiten von Ereignissen/Zuständen pro Jahr und Anlage
1) $\geq 10^{-2}$; 2) 10^{-2} - 10^{-5} ; 3) 10^{-5} – 10^{-6} ; 4) $< 10^{-6}$
 - b) Beispiele mit Einordnung nach sicherheitstechnischer Bedeutung bzw. Anforderung
 - c) Einzelne Sicherheitseinrichtungen können bereits auf Sicherheitsebene 2 eingreifen