



## 3.8 Kernenergie

### Autoren

Horst-Michael Prasser (Chair), ETH Zürich; Stefan Hirschberg, PSI; Wolfgang Kröger, ETH Zürich; Kurt Küffer, Ennetbaden; Michel Piot, Swisselectric, Bern; Ulrich Schmockler, Mönthal; Ralph Schulz, ENSI, Brugg; Pieter Zuidema, Nagra, Wettingen

Die fünf Kernkraftwerke in der Schweiz tragen mit jährlich etwa 26 TWh zu rund 40% zur schweizerischen Stromproduktion bei und decken so gut 10% des Gesamtenergieverbrauchs. Es sind Leichtwasserreaktoren der Generation II, die durch Nachrüstmassnahmen an die heutigen Sicherheitsanforderungen angepasst wurden. Aus Beteiligungen an französischen Kernkraftwerken stammen weitere 17 TWh. Kernkraftwerke mit den in der Schweiz eingesetzten Kernbrennstoffen verursachen gemäss Lebenszyklusanalysen CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 8 g CO<sub>2</sub>eq/kWh. Die produzierten radioaktiven Abfälle aller Kernkraftwerke sind mengenmässig in Relation zur produzierten Strommenge zwar gering; sie müssen jedoch von der Umwelt über Jahrtausende sicher ferngehalten werden. Für die geologische Tiefenlagerung sind ein Konzept und ein Umsetzungsplan vorhanden.

Da die Kernenergie in der Öffentlichkeit relativ kontrovers diskutiert wird, wird diese Technologie hier ausführlich behandelt.

### 3.8.1 Stand der Technologie

Der Begriff Kernenergie fasst die Energiegewinnung durch Kernspaltung und Kernfusion zusammen. Die Kernfusion ist im Gegensatz zur heute etablierten Kernspaltung noch im Stadium der Entwicklung. Sie wird bis 2050 keine massgebliche Rolle für die Energieversorgung spielen und wird deshalb hier nicht behandelt.

Weltweit gesehen dominieren heute Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren, unterschieden zwischen Druck- und Siedewasserreaktoren. Leichtwasserreaktoren benötigen schwach angereichertes

Uran.<sup>2</sup> Die bei der Kernspaltung anfallende Wärmeenergie wird in Dampfturbinen mit einem Nettowirkungsgrad von heute etwa 33% in mechanische und anschliessend in elektrische Energie umgewandelt. Alle Kernkraftwerke in der Schweiz arbeiten nach diesem Prinzip. Die heutigen Kernkraftwerke werden in Abgrenzung zu den ersten Prototypanlagen als Generation II bezeichnet. Neue Anlagen der Generation III unterscheiden sich von ihnen hauptsächlich in Bezug auf die Sicherheit. Das verbesserte Auslegungskonzept ermöglicht die Rückhaltung des radioaktiven Inventars in der Anlage bei allen

<sup>2</sup> In Kernkraftwerken wird schwach angereichertes Uran verwendet, während zur Herstellung von Kernwaffen hoch angereichertes Uran benötigt wird.

denkbaren Störfällen, also auch bei einer Kernschmelze, und sollte so ursprünglich externe Notfallschutzmassnahmen überflüssig machen. Es verbleibt jedoch ein sehr geringes Restrisiko, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass auch die hierfür notwendigen Einrichtungen versagen. Das Risiko einer grossen Freisetzung radioaktiven Materials ist um etwa zwei Grössenordnungen geringer als bei heute laufenden Anlagen.

Reaktoren der Generation IV sind Gegenstand heutiger Forschung und Entwicklung. Ziele sind, die Nutzung des Kernbrennstoffs sowie den Wirkungsgrad zu verbessern, die Wärmeenergie für die Erzeugung von Brenn- und Treibstoffen zu nutzen sowie die Sicherheit und den Proliferationsschutz zu erhöhen. Die Entwicklung von Reaktoren der Generation IV bis zur industriellen Serienreife wird voraussichtlich noch etliche Jahre bis Jahrzehnte beanspruchen. Parallel dazu verläuft die Entwicklung von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren oder modular aufgebauten Kernkraftwerken mit kleineren Reaktoren.

### 3.8.2 Stromproduktion in der Schweiz

Die fünf Kernkraftwerke in der Schweiz haben eine elektrische Nettoleistung von 3,2 GW, die jährlich produzierte Strommenge beträgt rund 26 TWh. Aus Beteiligungen an französischen Kernkraftwerken kommen pro Jahr weitere 17 TWh hinzu.

Die Schweizer Kernkraftwerke produzieren Bandenergie, d.h. Strom zur Deckung der Grundlast. Die Kraftwerksleistung ist mehr als 90 % der Zeit verfügbar. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ist es nicht sinnvoll, Kernkraftwerke zur Deckung von Spitzenlast zu nutzen. Dennoch betreiben einige Länder Kernkraftwerke im Lastfolgebetrieb, um das wechselnde Angebot aus erneuerbaren Energiequellen auszugleichen. Grundsätzlich kann bei Kernkraftwerken – wie in nennenswertem Umfang bei den Anlagen Beznau und Gösgen realisiert – auch Heiz- oder Prozesswärme ausgekoppelt werden. Die beschränkte Ausdehnung der wirtschaftlich attraktiven Fernwärmenetze erlaubt jedoch meist nur die Nutzung eines kleinen Teils der verfügbaren Wärmeleistung.

### 3.8.3 Ökologische und wirtschaftliche Aspekte, Risiken

#### Umwelteinflüsse im Normalbetrieb

Die Kernenergie verursacht praktisch keine betrieblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diese fallen in vor- und nachgelagerten Prozessen der Brennstoffkette sowie bei Errichtung und Rückbau der Anlagen an. Hauptbeitrag dazu liefert die Urananreicherung, wenn dafür Energie aus fossilen Quellen eingesetzt wird. Die Schweiz bezieht ihren Kernbrennstoff primär aus Ländern, in denen die Stromerzeugung mit geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgt oder aber Ultrazentrifugen im Einsatz sind, die deutlich weniger Energie verbrauchen als die veralteten Gasdiffusionsverfahren. Insgesamt ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 8 g CO<sub>2</sub>eq/kWh (Dones 2007).

In Bezug auf den Landbedarf ist bei der Kernenergie die Urangewinnung der dominierende Faktor. Im Vergleich zu anderen Energieerzeugungstechnologien ist der Landbedarf jedoch relativ gering, da Uranminen sehr kompakt sind. Auch der Verbrauch an nicht-energetischen Rohstoffen wie Kupfer, Eisen oder Aluminium beim Anlagenbau ist vergleichsweise gering.

Beim Abbau des radioaktiven Urans entstehen radioaktive Rückstände, die in Absetzbecken und auf Halden anfallen. Von Bedeutung ist insbesondere das gasförmige Radon, das durch radioaktiven Zerfall des abgebauten Urans entsteht. Dazu kommen weitere Umweltauswirkungen des Uranbergbaus: die Beeinflussung des Grundwassers, der Wasserverbrauch in den Minen sowie toxische chemische Abfälle und ihre Nebenprodukte. Durch den hohen Energiegehalt des Rohstoffs bleiben die Umwelteinflüsse bezogen auf die erzeugte Energiemenge verhältnismässig klein.

Das gesundheitliche Risiko, verursacht durch den Normalbetrieb von Kernkraftwerken, ist für das Personal und die Bevölkerung in der Umgebung bei Normalbetrieb gering (PSI Energie-Spiegel 2010). Als Mass für dieses Risiko dient die kollektive Lebenszeiteinbusse, d.h. die Einbusse an Lebensjahren bezogen auf die bereitgestellte Energiemenge.

## Versorgungssicherheit

Der Verbrauch an Kernbrennstoffen ist relativ gering. Zudem können Brennelemente leicht beliebig lange bevorratet werden. Damit lassen sich Versorgungsengpässe vermeiden und die kurz- und mittelfristige Energieabhängigkeit vom Ausland reduzieren.

## Radioaktive Abfälle

Abgebrannte Brennelemente sowie hochaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung enthalten den weitest grossen Teil der anfallenden Radioaktivität. Zu den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen gehören radioaktiv belastetes Verbrauchsmaterial, zu ersetzende Anlagenteile und Abfälle aus dem Rückbau von Kernanlagen sowie radioaktive Abfälle aus der Medizin, der nichtenergetischen Industrie und der Forschung. Bei den Mengen überwiegen die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle deutlich. Die Schweiz hat sich gesetzlich dazu verpflichtet, die eigenen radioaktiven Abfälle im Inland zu entsorgen. Grundsätzlich liesse das Gesetz auch die Entsorgung im Ausland unter bestimmten Bedingungen zu. In der Schweiz wurden Entsorgungskonzepte erarbeitet und deren grundsätzliche Machbarkeit nachgewiesen. Die Konzepte der geologischen Tiefenlager bestehen aus einer Kombination von geologischen und technischen Barrieren. Diese sollen verhindern, dass radioaktive Stoffe in unzulässiger Menge in die Umwelt gelangen. Die Strahlenbelastung muss für den Menschen jederzeit unter einem festgelegten Grenzwert liegen. Dieser ist im Vergleich zur natürlichen Strahlenbelastung niedrig angesetzt und liegt bei wenigen Prozenten der Dosis, die jede Person in der Schweiz im Mittel durch die natürliche Strahlung erhält. Mit Hilfe entsprechender Szenarienanalysen wird untersucht, ob ein Standort auch unter Berücksichtigung verschiedener möglicher Entwicklungen (z.B. Erosion, Erdbeben) als sicher gelten kann, bis die Radioaktivität der Abfälle auf ein unbedenkliches Niveau

abgeklungen ist. Derzeit werden mehrere Standorte evaluiert.

## Sicherheitskonzept

Kernreaktoren enthalten, unabhängig vom Typ, grosse Mengen an radioaktiven Stoffen. Mit einem System von gestaffelten Barrieren wird verhindert, dass bei einem Störfall Radioaktivität in die Umgebung gelangen kann. Heutige Leichtwasserreaktoren der Generation II verfügen über drei Barrieren: 1. die keramischen Brennstofftablets und die Metallumhüllung der Brennstäbe; 2. die Wandungen des Reaktordruckgefässes und des primären Kühlkreislaufes; 3. die druckdichte Hülle der Reaktoranlage, das so genannte Containment. Dieses System von Barrieren wird mit aktiven und passiven Sicherheitseinrichtungen und -massnahmen vor einem Versagen geschützt. Eine besondere Rolle spielt die Nachzerfallswärme. Versagt die Kühlung der Brennelemente trotz redundanter, zum Teil unterschiedlich konzipierter Sicherheitssysteme, können sich die Brennstäbe auch nach Unterbrechung der Kettenreaktion so stark erhitzen, dass die Brennstabhülle zerstört wird und der Brennstoff schmilzt. Dabei entweicht ein erheblicher Teil der radioaktiven Stoffe aus den Brennelementen. Versagt in Folge noch der Reaktordruckbehälter bzw. der Primärkreis, so muss das Containment verhindern, dass die radioaktiven Stoffe in die Umgebung freigesetzt werden. Das Barrierensystem und die Sicherheitseinrichtungen werden ausgehend vom Stand der Technik entsprechend einer Liste von Auslegungsstörfällen<sup>3</sup> dimensioniert. Die Liste dieser Störfälle ist in der Kernenergieverordnung und in der Störfallverordnung des UVEK vorgegeben und schliesst auch externe Gefährdungen wie Erdbeben, Überflutungen und Flugzeugabstürze ein. Die Verordnung schreibt vor, dass bei allen Arten von Auslegungsstörfällen ein Kernschaden auch im Fall eines unabhängigen weiteren Einzelfehlers in einer Sicherheitseinrich-

---

<sup>3</sup> Auslegungsstörfälle eines Kernkraftwerks sind Störfälle, für deren Beherrschung die Sicherheitssysteme ausreichen müssen. Bei Eintreten eines Auslegungsstörfalles darf u.a. die Radioaktivität ausserhalb der Anlage den vorgegebenen Grenzwert der Strahlenbelastung nicht überschreiten. Die Liste der Auslegungsstörfälle in der Kernenergieverordnung wird aufgrund von weltweiten Erfahrungen kontinuierlich evaluiert und ergänzt (siehe dazu e.g. IAEA 2009).

## **Grosse Kernenergieunfälle**

**Harrisburg (1979):** Am Reaktor des US-amerikanischen Kernkraftwerks «Three Mile Island 2» mit Druckwasserreaktor kam es zu einem kleinen Kühlmittelleck. Die Operateure bemerkten das Fehlen von Kühlmittel im Reaktor nicht und schalteten die Notkühlsysteme ab. Die Folge war eine über Stunden fortschreitende Kernschmelze. Diese wurde durch spät getroffene, aber richtige Entscheidungen im Reaktordruckbehälter gestoppt. Es wurden keine signifikanten Mengen radioaktiver Stoffe freigesetzt. Die Menschen in der Umgebung waren einer zusätzlichen Strahlenbelastung ausgesetzt, die weit unterhalb der natürlichen lag. Evakuierungen erwiesen sich als nicht notwendig.

**Tschernobyl (1986):** Um ein Experiment durchführen zu können, schalteten die Operateure des russischen Kernkraftwerks vom Typ RBMK mehrere Sicherheitskreise des Reaktorschutzsystems ab. Dies war möglich, weil die Anlage über eine veraltete Automatisierung verfügte. Weitere gravierende Verstösse der Operateure führten zu einer unkontrollierten Kettenreaktion, zu der es aufgrund von Auslegungsdefiziten kommen konnte. Die resultierende Leistungsexkursion führte zur sofortigen explosionsartigen Zerstörung des Reaktors und aller Barrieren, die den Austritt radioaktiver Stoffe verhindern sollten. Das Fehlen eines Containments und der Brand des als Moderator verwendeten Graphits verschlimmerten die Situation weiter. Bei den Einsatzkräften kam es zu einer grossen Anzahl akut tödlicher Strahlenkrankungen. Da die Bevölkerung erst 36 Stunden nach der ersten grossen Freisetzung radioaktiver Stoffe evakuiert wurde, konnte auch sie nicht mehr effektiv gegen Spätschäden geschützt werden.

**Fukushima (2011):** Nach einem schweren Erdbeben und einem darauffolgenden Tsunami wurde beim japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi mit Siedewasserreaktoren die gesamte Stromversorgung einschliesslich aller Notstromdieselgeneratoren lahmgelegt. Dadurch war über mehrere Tage keine Kühlung der Reaktoren und der Brennelementlagerbecken mehr möglich. Die Überhitzung der Brennelemente in den Reaktoren führte zu deren Zerstörung sowie zum Schmelzen eines Teils des Kernbrennstoffs. Als Nebenprodukt entstand Wasserstoff, der aus dem Containment entweichen und sich im Reaktorgebäude entzünden konnte. Drei der sechs Einheiten am Standort wurden durch solche Explosionen stark beschädigt. Durch das Entweichen flüchtiger Spaltprodukte, vorrangig Jod 131 und Cäsium 137, aus den beschädigten Brennstäben kam es zum starken Anstieg der Strahlung am Kraftwerksstandort und in der weiteren Umgebung. Zudem sammelte sich kontaminiertes Wasser an, das teilweise ins Meer gelangte. Mit Hilfe von Notfallmassnahmen wurden die Emissionen in die Luft und die Freisetzungen über das Wasser reduziert. Anschliessend wurden Massnahmen ergriffen, um die Kühlung wieder zu normalisieren, die atmosphärischen Emissionen zu reduzieren und das kontaminierte Wasser aufzubereiten. Ein Gebiet von mehreren Hundert Quadratkilometern ist so kontaminiert, dass zumindest grosse Teile davon voraussichtlich für lange Zeit unbewohnbar bleiben werden. Erschwerend kam bei diesem Störfall hinzu, dass die Infrastruktur im Umland des Kernkraftwerks durch den Tsunami zerstört wurde. Dadurch war es einige Tage lang schwierig, die technischen Mittel zur Begrenzung des Schadens an den Kraftwerksstandort heranzubringen. Erste Analysen lassen vermuten, dass ein Tsunami dieses Ausmasses am Standort mit einer wesentlich höheren Häufigkeit zu erwarten war als ein Mal in 10 000 Jahre, weshalb dieses störfallauslösende Ereignis als Auslegungsstörfall zu behandeln gewesen wäre (vgl. Abschnitt «Risiko: Schwere Störfälle»). Dies wurde im Vorfeld unterlassen. Zudem waren die technischen, logistischen und organisatorischen Vorkehrungen zur Handhabung des auslegungsüberschreitenden Ereignisses ungenügend und nicht auf dem Stand der Technik (Morbach 2011). Gravierenden Einfluss hatten weiterhin unvollständige Richtlinien für den anlageninternen Notfallschutz bei schweren Störfällen, was zu einzelnen Fehlern der Mannschaft und Verzögerungen bei einigen wichtigen Einzelmassnahmen geführt hat. Dies hat zur weiteren Eskalierung des Störfalls beigetragen.

### **Sicherheitskultur von grosstechnischen Anlagen**

Die Sicherheit von grosstechnischen Anlagen (z. B. Wasser-, Kern- und Gaskraftwerke) wird nicht allein durch deren technische Auslegung gewährleistet, sondern auch durch das Verhalten der Menschen geprägt, welche die Anlage betreiben. Sicherheit als höchstes Gut muss deshalb als Grundwert in der Betreiberfirma verankert sein. Da es eine absolute Sicherheit nicht gibt, muss sich die Organisation auszeichnen durch

- Abneigung gegen vereinfachende Interpretationen und Selbstgefälligkeit,
- Sensibilität für betriebliche Abläufe,
- Bereitschaft aus Erfahrungen zu lernen und Streben nach Flexibilität,
- Respekt vor fachlichem Wissen, Können und neuen Erkenntnissen.

Flexibilität ist eine Mischung aus der Fähigkeit, Fehler frühzeitig zu entdecken, und der Fähigkeit, das System durch flexibles Handeln wieder in den Normalzustand zurückzuführen. Flexibilität ist ein heikles Thema, sollten doch alle Tätigkeiten nach klar vorgegebenen Regeln durchgeführt werden. Für Auslegungstörfälle sind dazu auch spezifische Vorschriften mit klaren Vorgaben für die einzelnen Schritte zur Beherrschung des Störfalls vorhanden. Für auslegungsüberschreitende Störfälle gibt es symptomorientierte Vorgaben zur Beherrschung resp. Milderung der Unfallkonsequenzen. Bei diesen Störfällen ist aber auch ein situatives Handeln erforderlich. Die Organisation darf sich in diesem Moment nicht durch formale Vorgaben lähmen lassen.

Der Betreiber einer Anlage mit hohem Gefahrenpotenzial hat seine Tätigkeiten dauernd zu hinterfragen. Nicht was primär gut gelaufen ist, erhält die höchste Aufmerksamkeit, sondern Aktivitäten, bei denen Fehler gemacht oder beinahe gemacht wurden. Eine offene Informations- und Kommunikationskultur unterstützt Querdenker und Skeptiker innerhalb des Betriebes. Das Melden von Fehlern und Beinahe-Fehlern wird verlangt und nicht bestraft und ist ein wichtiges Element der Organisationskultur. Um eine gute Sicherheitskultur zu schaffen, braucht es das Engagement der obersten Führung

Es ist die Aufgabe der Aufsicht, sich ein Bild über die gelebte Sicherheitskultur des Betreibers zu machen. Dies geschieht aufgrund von Gesprächen auf allen Hierarchiestufen, durch Beobachtungen bei Inspektionen, durch Aufsichtsgespräche und durch die Überprüfung eingereicherter Betriebsprotokolle und Dokumente. Im Falle der Kernkraftwerke ist die Aufsichtsbehörde das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). (siehe auch Naegelin 2007)

Da gemäss Gesetz der Betreiber für die Sicherheit allein verantwortlich ist, muss die Aufsichtsbehörde den Betreiber in seinem Bemühen nach einer hinterfragenden Haltung unterstützen und zur Selbstreflexion über die Sicherheitskultur anregen. Eine gute Sicherheitskultur des Betreibers ist auch geprägt durch eine offene Informations- und Meldekultur gegenüber der Behörde und den andern Kraftwerkbetreibern.

tung sicher beherrscht werden muss, selbst wenn eine weitere Sicherheitseinrichtung wegen Instandhaltung nicht verfügbar ist.

Trotz dieser Vorkehrungen kann ein Kernschaden nicht vollständig ausgeschlossen werden, da es keine absolute Sicherheit dafür gibt, dass nicht mehrere oder gar alle Sicherheitssysteme gleich-

zeitig ausfallen. Beispielsweise können extreme externe störfallauslösende Ereignisse eintreten, gegen die die Anlage nicht vollständig ausgelegt ist und die mehrere redundante Stränge eines Sicherheitssystems gleichzeitig unwirksam machen. Speziell für die Beherrschung seltener externer Ereignisse wurden in den Schweizer Kernkraft-

werken gebunkerte Notstandssysteme mit eigener Notstromversorgung, einer Notstandswarte und einer diversitären Kühlwasserversorgung<sup>4</sup> nachgerüstet. Um eine Ausbreitung radioaktiver Stoffe, die bei auslegungsüberschreitenden Störfällen aus dem Reaktorkern freigesetzt werden können, in die Umgebung zu verhindern oder zumindest stark zu vermindern, wurden weitere Systeme und spezielle Unfallmanagement-Massnahmen eingeführt. Zu diesen Systemen gehören in den bestehenden Schweizer Kernkraftwerken Systeme zur gefilterten Druckentlastung, welche bei Kernschäden und Versagen des Reaktordruckbehälters das Containment vor Überdruck schützen. Die Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung wird durch die Filterung der Abgaben so weit reduziert, dass eine grossräumige Evakuierung und eine lang andauernde Landkontamination vermieden wird.

Gemäss Kernenergieverordnung sind zudem bauliche Vorkehrungen erforderlich, welche die Anlage vor Ereignissen schützen (z.B. Hochwasser oder Erdbeben), für die theoretische Vorhersagen ergeben, dass sie häufiger als einmal in 10 000 Jahren<sup>5</sup> auftreten können.

Bei Reaktoren der Generation III wird die Sicherheit weiter substanziell verbessert: Die redundante Auslegung von herkömmlichen Sicherheitssystemen wird verstärkt, und es werden passive Sicherheitssysteme installiert, die ohne externe Energieversorgung auskommen. Die Sicherheitssysteme arbeiten über einen langen Zeitraum<sup>6</sup> unabhängig von den Operateuren. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit eines Kernschadens stark reduziert, dennoch bleibt eine wenn auch sehr kleine Wahrscheinlichkeit bestehen, dass der Reaktorkern zerstört werden kann.

Deshalb verfügen alle Reaktortypen der Generation III über Einrichtungen zum Auffangen von geschmolzenem Kernbrennstoff. Das Containment wird so ausgelegt, dass es allen Belastungen eines Kernschmelzstörfalls standhalten kann. Damit ist es möglich, das radioaktive Inventar in der Anlage soweit zurückzuhalten, dass es in der Umgebung zu keinen signifikanten Auswirkungen kommt.

Auch das Risiko für Fehlhandlungen an der Schnittstelle Mensch-Maschine wurde fortlaufend reduziert. Bei Anlagen mit moderner Leittechnik lassen sich Sicherheitssysteme nicht mehr umgehen. Werden diese durch den Operateur ausgeschaltet, erfolgt automatisch eine Schnellabschaltung. Zudem gibt die sicherheitstechnische Auslegung der Kernkraftwerke der Generation III den Operateuren wesentlich mehr Zeit, Entscheidungen zu treffen und Massnahmen zu ergreifen als dies bei heute in Betrieb stehenden Anlagen der Fall ist. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit von Fehlentscheiden verringert.

Das doppelwandige Containment von neueren Anlagen der Generation II und insbesondere der Generation III schützt den Reaktor gegen den Aufprall eines grossen Verkehrsflugzeugs. Ist bei älteren Kernkraftwerken das Containment nicht stark genug ausgelegt, so sichern die gebunkerten Notstandssysteme den Schutz der verbliebenen inneren Barrieren. Dadurch soll die Freisetzung von radioaktivem Material auch bei beschädigtem Containment niedrig gehalten werden.<sup>7</sup>

Die Sicherheit von Kernanlagen wird nicht allein durch die Technik bestimmt, sondern auch durch das gesellschaftliche Umfeld und das Handeln der Menschen, welche die Anlagen betreiben (vgl. Kasten «Sicherheitskultur»).

4 Gegenwärtig besteht noch Nachrüstbedarf hinsichtlich einer von der Aare unabhängigen Kühlwasserversorgung des Kernkraftwerk Mühleberg, während an allen anderen Standorten bereits vor Fukushima geschützte Brunnenanlagen eingerichtet wurden (ENSI 2012).

5 Dies besagt nicht, dass das Ereignis erst in 10000 Jahren eintritt, sondern, dass die Häufigkeit des Eintritts  $10^{-4}$  pro Jahr ist.

6 Die Karenzzeit, innerhalb der keine sicherheitsgerichteten Operateureingriffe notwendig sind, wird von 30 Minuten bei Generation II Kraftwerken auf zwischen 24 und 72 Stunden (Generation III) erhöht. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit von Operateurfehlern verringert.

7 Die Wahrscheinlichkeit für eine grosse Freisetzung radioaktiver Stoffe beim Aufprall eines grossen Verkehrsflugzeugs auf das Containment wird vom ENSI für die drei älteren Schweizer Anlagen auf 1 % und bei den neueren Anlagen auf 0,1 % geschätzt.

## Risiko

Das Risiko eines potenziellen Störfalls lässt sich als Produkt aus der Eintrittshäufigkeit unerwünschter Szenarien und der Höhe des verursachten Schadens definieren. Die Ermittlung der Häufigkeiten schwerer Störfälle, bei denen grosse Mengen an radioaktiven Stoffen freigesetzt werden, ist Bestandteil des Genehmigungsverfahrens sowie der periodischen Sicherheitsüberprüfungen. Im Hinblick auf Reaktortyp, Sicherheitstechnik, ggf. unter Berücksichtigung erfolgter Nachrüstungen und Standort muss dies für jede Anlage individuell geschehen. Die Analyse von schweren Störfällen kann deshalb nicht von einer Anlage auf andere Anlagen übertragen werden. Vielmehr muss mit Hilfe von probabilistischen anlagen- und standortspezifischen Sicherheitsanalysen (PSA) abgeschätzt werden, wie hoch die Häufigkeit eines Kernschadens und einer grossen Freisetzung radioaktiver Stoffe ist. PSAs dienen ausserdem der Identifikation von Verbesserungsmassnahmen mit möglichst hohem Sicherheitsgewinn. Bei den Analysen müssen sowohl interne (z.B. Kühlmittellecks) als auch externe störfallauslösende Ereignisse (z.B. Erdbeben, Überflutung, Flugzeugabsturz) berücksichtigt werden. Letztere sind standortabhängig und dominieren häufig die Kernschadenshäufigkeit. Die Kernenergieverordnung der Schweiz fordert für bestehende Kernkraftwerke den rechnerischen Nachweis, dass ein Kernschaden nicht häufiger als ein 10 000-jähriges Ereignis erwartet werden darf. Für Neubauanlagen fordert die UVEK-Verordnung eine Kernschadenshäufigkeit kleiner als einmal in 100 000 Jahren. Alle Schweizer Kernkraftwerke wurden sicherheitstechnisch nachgerüstet, wodurch sie heute selbst die Anforderung an Neuanlagen weitgehend erfüllen bzw. im Fall der beiden jüngeren Schweizer KKW deutlich übererfüllen (siehe Abbildung 3.7).<sup>8</sup> Fukushima ist ein Beispiel für ein Kernkraftwerk im Ausland, bei dem solche Nachrüstungen ausgeblieben sind oder nur unvollständig durchgeführt wurden.

In Neuanlagen liegt die Häufigkeit einer grossen Freisetzung von radioaktiven Stoffen weit unter der eines Kernschadens, weil diese mit Systemen zur Rückhaltung einer Kernschmelze ausgestattet sind. Dies ist, wenn auch weniger ausgeprägt, auch bei den bestehenden Anlagen in der Schweiz der Fall, da diese entsprechend nachgerüstet wurden. Eine grosse Freisetzung ist dennoch nicht völlig auszuschliessen. Häufigkeiten für eine Freisetzung, die mehr als 1000 akute Strahlentote und mehrere 10 000 späte Krebsfälle nach sich ziehen würde (letzteres unter Anwendung der linearen Dosis-Risiko-Beziehung), liegen rechnerisch für Anlagen der Generation III unter 1 Mal in 1 Milliarde Jahren (Burgherr et al. 2008).

Kernkraftwerke gelten häufig als «nicht versicherbar», weil die Häufigkeit für das Eintreten eines solchen extremen Schadensereignisses sehr klein und mit einer grossen Unsicherheit behaftet ist, die Folgen des Ereignisses hingegen enorm gross sind. Überdies ist die Anzahl Anlagen, die zu versichern wären, sehr gering. Auf internationaler Ebene ist die Haftung im Pariser Übereinkommen geregelt, welche die Kernkraftwerksbetreiber zu einer Versicherung über 700 Mio. Euro verpflichtet. Hinzu kommen eine Versicherung der Gemeinschaft der Vertragsstaaten von 300 Mio. Euro und eine solche des Standortstaates von 500 Mio. Euro, deren Prämie die Schweiz auf die Betreiber überwälzt. Das Schweizer Kernenergiehaftpflichtgesetz (KHG) geht über das Pariser Abkommen hinaus und macht die Inhaber der Kernenergieanlage mit ihrem ganzen Vermögen unbegrenzt für verursachte Schäden haftbar und dies nicht nur bei Unfällen, sondern auch bei kriegerischen Ereignissen und Terrorismus. Sollte der Schaden die Deckung durch Versicherung und Inhaber übersteigen, müsste er gesamtgesellschaftlich getragen werden. In Fukushima werden die direkten Schäden auf 86 Mrd. Euro geschätzt, was Gesetzgeber und Versicherer weltweit zu einer Neubewertung der Risiken veranlasst.

---

<sup>8</sup> Probabilistische Sicherheitsanalysen für das KKW Beznau ergaben für den Zeitpunkt der Errichtung (Beznau 1969, 1971, Mühleberg 1971) Kernschadenshäufigkeiten im Bereich von einmal in 1000 Jahren. Zudem waren damals Systeme zur Begrenzung der Folgen eines schweren Störfalls in geringerem Umfang vorhanden.

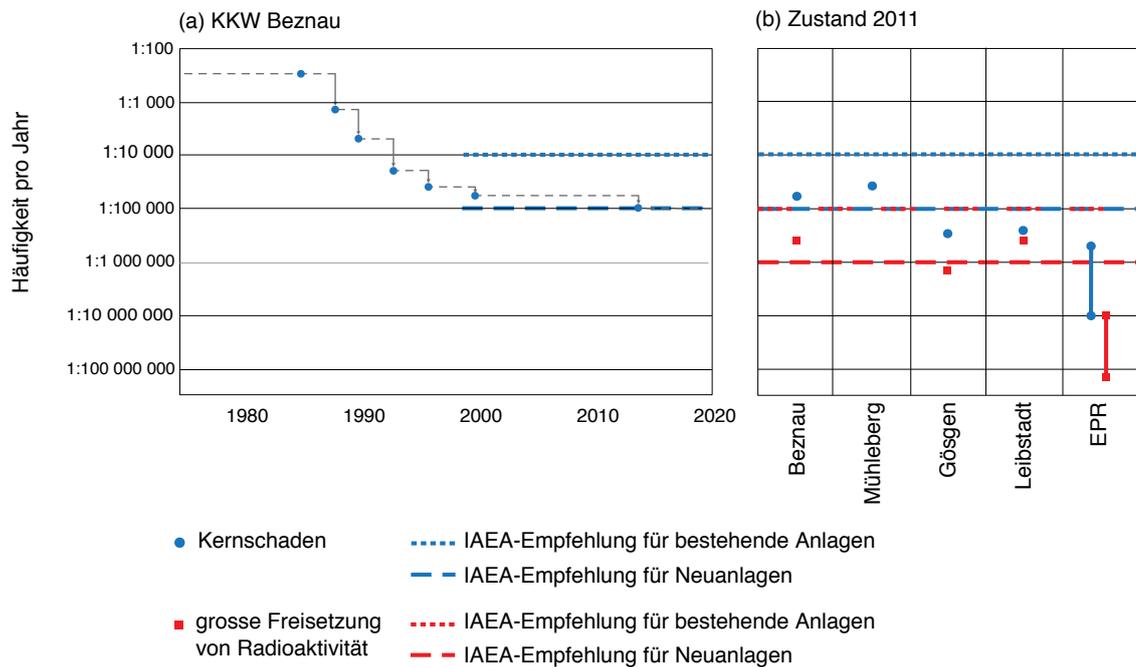


Abbildung 3.7: a) Auswirkung von Nachrüstmassnahmen auf die Sicherheit am Beispiel Beznau (Beznau 2012). Durch Nachrüstungen gelang es, die Kernschadenshäufigkeit (blaue Punkte) unter die von der IAEA heute empfohlene Obergrenze abzusenken. b) Vergleich der Sicherheit der heutigen Kernkraftwerke. Alle Schweizer Anlagen erfüllen die Empfehlungen der IAEA, sogar annähernd die Empfehlung für Neuanlagen. Ein Kernschaden bzw. eine Kernschmelze (blaue Punkte) führt nicht zwingend zu einer grossen Freisetzung radioaktiver Stoffe (rote Quadrate), wenn die zur Beherrschung schwerer Störfälle erforderlichen Einrichtungen nachgerüstet wurden oder wie zum Beispiel beim modernen Reaktortyp EPR bereits projekt-mässig vorgesehen werden. Für Mühleberg liegt die Risikoanalyse für eine grosse Freisetzung noch nicht vor. Der Bereich beim EPR hängt von der Standortwahl ab und ist dominiert durch das Erdbebenrisiko (Hirschberg 2012, ENSI 2012).

### Weiterentwicklungen zur Erhöhung der Sicherheit

Der Unfall in Fukushima bewirkte einerseits die nochmalige Evaluation der standortspezifischen externen Risiken und andererseits die kernkraftwerksinterne Weiterentwicklung der Sicherheit unter dem Stichwort «Resilience» («Widerstandsfähigkeit»). Weitere technische Weiterentwicklungen betreffen

den Einsatz von Coated Particles<sup>9</sup> als Basis für die Brennelementherstellung, die möglichst weitgehende Anwendung inhärenter Sicherheitseigenschaften<sup>10</sup> und der modulare Aufbau von grösseren Kraftwerkseinheiten aus mehreren kleineren modularen Reaktoren,<sup>11</sup> die Vermeidung der Wasserstoffbildung in Leichtwasserreaktoren durch den Ersatz von Zirkonium durch keramische Brennstabhüllen

9 «Coated Particles» sind keramisch fest umschlossene Brennstoffpartikel, die flüchtige Spaltprodukte bis zu einer Temperatur von 1600 °C hermetisch einschliessen können. Sie wurden in gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren erfolgreich getestet. Sowohl die Brennelemente von Kugelhaufenreaktoren, als auch die von HTGRs mit prismatischen Brennelementen enthalten diese Brennstoffpartikel.

10 Inhärent sicher ist eine Anlage, wenn sie durch ihre Konstruktionseigenschaft bei Störungen ohne zusätzliche Sicherheitsmassnahmen die Freisetzung radioaktiver Stoffe verhindert.

11 Dadurch werden die Inventare an radioaktivem Material je Reaktor reduziert. Zudem verringert sich die Nachzerfallswärmeleistung, wodurch passive und inhärente Sicherheitseigenschaften leichter erreichbar sind. Das heisst zum Beispiel, dass die Nachzerfallswärme direkt und ohne aktives Kühlsystem an die Umwelt abgegeben werden kann.

oder eine unterirdische Bauweise. Weitere Entwicklungen betreffen passive Systeme, welche die Langzeitkühlung auch dann gewährleisten, wenn die Mannschaft des Kernkraftwerks keine Massnahmen einleitet.

### **Weiterverbreitung von Kernmaterial**

Der Atomwaffensperrvertrag verpflichtet die Unterzeichner, auf den Erwerb und die Entwicklung von Nuklearwaffen zu verzichten. Ausgenommen sind die grossen Atommächte. Alle Unterzeichner werden hingegen in der friedlichen Nutzung der Kernenergie unterstützt. Die Internationale Atomenergie Agentur in Wien (IAEA) kontrolliert die Einhaltung des Vertrages. Die Schweiz ist Mitglied der IAEA. Sofern die IAEA ihre Kontrollrechte gemäss dem Atomwaffensperrvertrag wahrnehmen kann, ist die Weiterverbreitung von Kernmaterial praktisch unmöglich. Allerdings haben einige Länder den Vertrag nicht ratifiziert oder verweigern der IAEA die vereinbarten Kontrollen.

Abgesehen von den Kontrollen der IAEA gibt es technische und physikalische Barrieren, die einem Missbrauch der Kernmaterialnutzung entgegenstehen. So ist beispielsweise das Plutonium aus ausgedienten Brennstäben durch nicht-spaltbare Plutoniumisotope verunreinigt und kann nur mit erheblichen Einschränkungen für die Herstellung von Kernwaffen verwendet werden. Im Weiteren darf Uran für den Handel nicht über 20% angereichert sein und ist in dieser Form nicht für die Waffenherstellung nutzbar. Weil die Anreicherung und die Plutoniumabtrennung sehr investitionsintensive Hochtechnologien sind, ist deren Nutzung durch terroristische Gruppen sehr unwahrscheinlich. Auch bei der Neuentwicklung von Reaktoren wird dem Risiko des Missbrauchs Rechnung getragen: So soll der plutoniumhaltige Spaltstoff möglichst über den ganzen Prozess mit stärker radioaktiven Radionukliden kontaminiert bleiben, um die militärische oder terroristische Verwendung zu erschweren. Bei der Verwendung von Thorium wäre ein inhärenter Schutz durch die Verunreinigung des erbrüteten Uran 233 durch das stark strahlende Uran 232 gegeben, das als Nebenprodukt entsteht. Dies

erschwert jedoch auch die Herstellung von Brennelementen.

### **Gesellschaftliche Akzeptanz**

Die Risikowahrnehmung und -bewertung der Kernenergie durch die Gesellschaft ist primär geprägt durch das grosse Schadensausmass, das bei Kernenergiekatastrophen aufgetreten ist (siehe Kasten «Grosse Kernenergieunfälle»). Dazu kommen erhebliche Bedenken bezüglich der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle. Beides führt zu einer grundsätzlichen Ablehnung der Kernenergie in weiten Teilen der Bevölkerung. Für Befürworter der Kernenergie stehen hingegen positive Umweltaspekte im Vordergrund, deren Nutzung sie bei Einhaltung modernster Sicherheitsstandards für ethisch vertretbar halten. Häufig verweisen sie dabei darauf, dass die Verletzung dieser Sicherheitsstandards (siehe auch Abb. 3.7) zu den Katastrophen geführt hat. Eine vertiefte Diskussion der gesellschaftlichen Aspekte findet im Kapitel 5 statt.

### **Ressourcen**

Der Rohenergieträger Uran ist ein nicht-erneuerbarer Rohstoff, der bergbaulich gewonnen wird. Die Weltmarktpreise liegen heute unter 100 Fr./kg, die mittlere spezifische Energieausbeute liegt bei 40 000 kWh/kg. Damit machen die Kosten für das Natururan heute weniger als 0,25 Rp./kWh aus. Die Urangewinnungskosten beeinflussen die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie also kaum. Durch den geringen Kostenanteil des energetischen Rohstoffs bleibt die Wirtschaftlichkeit auch bei einem starken Anstieg der Urangewinnungskosten erhalten. Es wird daher davon ausgegangen, dass bei Verknappung der heute bekannten Ressourcen weitere Uranvorkommen erschlossen werden können, die heute wirtschaftlich noch uninteressant sind. Die Anlagen der Generation IV könnten zudem auf bislang ungenutzte Kernbrennstoffe zurückgreifen, wie das im Natururan vorwiegend enthaltene Isotop Uran-238 und Thorium. Dadurch wären alleine durch die bestehenden Lagerbestände (ausgediente Brennelemente heutiger Reaktoren, Anreicherungsrückstände) Brennstoffreserven für viele tausend Jahre gegeben.

## Kosten

Der in heutigen Schweizer Kernkraftwerken produzierte Strom kostet 4 bis 5 Rp./kWh (Hirschberg 2012). Wegen des geringen Anteils des Rohstoffes Uran und wegen der sehr guten Lagerbarkeit frischer Kernbrennstäbe (Versorgungssicherheit) sind die Stromproduktionskosten stabil. Die Errichtungskosten für neue Kernkraftwerke dominieren die Stromerzeugungskosten und werden heute auf 3500–5000 Fr./kWh, geschätzt. Die Stromgestehungskosten liegen bei neuen Kernkraftwerken zwischen 6.4–8.0 Rp./kWh. Daher ist es wirtschaftlich – aber auch aus betriebstechnischen Gründen – sinnvoll, Kernkraftwerke zur Grundlastdeckung einzusetzen, sodass die hohen Baukosten auf eine grosse produzierte Energiemenge umgelegt werden können. Die Stromgestehungskosten hängen von verschiedenen Faktoren ab, wie in Abb 3.10 dargestellt. Modular aufgebaute Kernkraftwerke, die aus mehreren Reaktoren kleinerer Leistung bestehen, versprechen eine Verringerung der Installationskosten bei höheren Betriebskosten.

Der Rückbau von Kernanlagen wurde im Ausland bereits realisiert. Solche Projekte dauern rund 15 Jahre, verursachen aber nur einen kleinen Teil der gesamten Entsorgungskosten. Die Kosten für Stilllegung und Entsorgung werden in der Schweiz den Stromgestehungskosten angerechnet, um Rückstellungen zu bilden. Diese zusätzlichen Kosten betragen etwa 1 Rp./kWh.

Risikoprämien sind dabei soweit berücksichtigt, wie im Abschnitt «Risiko» dargestellt wird.

### 3.8.4 Potenziale bis 2050

Aufgrund der auslaufenden Stromlieferverträge mit französischen Kernkraftwerken sowie der stufenweisen Stilllegung der bestehenden Anlagen in der Schweiz besteht weiterhin Bedarf für den Neubau von Kraftwerkskapazitäten. Die Schweizer Regierung hat nach der Katastrophe von Fukushima beschlossen, keine neuen Kernkraftwerke zu bauen, obwohl aus technischer Sicht und Rohstoffgesichtspunkten auch Kernkraftwerke der dritten Generation hierfür in Frage kämen. Weltweit besteht keine Gefahr eines Kompetenzverlusts in der

Kernenergietechnologie. Einige Länder setzen zum Ersatz ihrer alternden Kernreaktoren wiederum auf Kernenergie. Dazu kommen Länder, welche zur Substitution von fossilen Brennstoffen einen Einstieg in die Kernenergie planen. Im Rahmen, in dem Bandenergie im Betrachtungszeitraum in der Schweiz zur Verfügung gestellt werden muss, würden für Kernkraftwerksneubauten keine Potenzialbeschränkungen bestehen.

### 3.8.5 Technologiespezifische Bewertung und Folgerungen

Im Normalbetrieb ist die Nuklearenergie schadstoff- und CO<sub>2</sub>-arm. Zudem sind die Stromkosten relativ günstig (siehe Abb. 3.9). Die Zukunft der Kernkraftwerke in der Schweiz wird aber voraussichtlich eher von deren gesellschaftspolitischer Akzeptanz und daran gekoppelt von politischen Entscheiden bestimmt. Für die gesellschaftliche Akzeptanz entscheidend sind die Sicherheit der Reaktoren sowie die Langlebigkeit der radioaktiven Abfälle.

Unabhängig von politischen Entscheiden über die Kernenergie sollen auch in der Schweiz Lehre und Forschung im Bereich Kerntechnik aufrechterhalten werden. Die Schweiz benötigt Experten in ausreichender Anzahl für den sicheren Betrieb der heutigen Kernkraftwerke, aber auch für den Rückbau und die Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Zudem sollte sich die Schweiz an der Entwicklung inhärent sicherer Kernreaktor-konzepte beteiligen.

## Literatur

Beznau 2012: Datenquelle Beznau, veröffentlicht mit Erlaubnis des KKW.

Burgherr 2008: New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS). Final report on quantification of risk indicators for sustainability assessment of future electricity supply options. Burgherr P. et al., EU Integrated Project NEEDS no: 502687, PSI, October 2008. [www.proclim.ch/news?2380](http://www.proclim.ch/news?2380)

Dones 2007: Sachbilanzen von Energiesystemen. Dones R. et al., Final report, ecoinvent No. 6, Paul Scherrer Institut, Villigen & Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland. (ISBN 3-905594-38-2). [www.proclim.ch/news?2551](http://www.proclim.ch/news?2551)

ENSI 2012: EU Stress Test Swiss National report, ENSI Review of the Operators Reports, 2012. [www.proclim.ch/news?2410](http://www.proclim.ch/news?2410)

Hirschberg 2012: Review of current and future nuclear technologies, Hirschberg S. et al., PSI Report 2012. [www.proclim.ch/news?2407](http://www.proclim.ch/news?2407)

IAEA 2009: Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Guide No NS-G-2.15. [www.proclim.ch/news?2358](http://www.proclim.ch/news?2358)

Mohrbach 2011: Unterschiede im gestaffelten Sicherheitskonzept: Vergleich Fukushima Daiichi mit deutschen Anlagen. Ludger Mohrbach, Int. Zeitschrift für Kernenergie, 2011. [www.proclim.ch/news?2065](http://www.proclim.ch/news?2065)

Naegelin 2007: Geschichte der Sicherheitsaufsicht über die Schweizer Kernanlagen 1960 – 2003, Herausgeber: Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Naegelin, R., Verlag Buschhö, 2007.

PSI Energie-Spiegel 2010: Nachhaltige Elektrizität: Wunschdenken oder bald Realität? Energie-Spiegel Nr.20. Juni 2010. [www.proclim.ch/news?1293](http://www.proclim.ch/news?1293)

Weick 2003: Das Unerwartete managen: Wie Unternehmen aus Extremsituationen lernen; Weick K.E., Sutcliffe K. M.: Stuttgart, Schäffer-Poeschel, 2003.