

Die Entwicklung der Kernenergie geht weiter – mit oder ohne Schweiz

Die Ständeratskommission für Energiefragen hat am 30. August 2011 vorgeschlagen, dass neue Kernkraftwerke der "heutigen Generation" in Zukunft nicht mehr bewilligt werden sollen. Am 7. September hat sie vorläufig darauf verzichtet, die spezifischen Merkmale zu definieren, welche eine neue Generation bewilligungsfähig machen würden. Gemäss dem Kommissionspräsidenten Rolf Schweiger geht es hauptsächlich darum, dass einerseits auch im schlimmsten Fall keine Radioaktivität ausserhalb des KKW-Geländes gelangt und andererseits, dass die produzierten radioaktiven Abfälle auf ein Minimum reduziert werden. Neben der Menge wurde auch die Langlebigkeit der radioaktiven Abfälle andiskutiert.

Bei Kernenergie-Fachleuten stiessen diese Vorschläge auf offene Ohren, da seit Jahren viel untersucht, geforscht und entwickelt wurde, um die Kernenergie laufend zu verbessern. Auch ohne politische Vorgabe war klar, dass die als Ersatz der bestehenden Kernkraftwerke vorgesehenen neuen KKW wesentliche Fortschritte mit sich bringen würden.

„Es sei unklar, was eine neue Reaktortechnologie wäre und wer dies definieren würde“, schrieb dagegen der Bundesrat in seiner am 8. September 2011 veröffentlichten Antwort auf eine parlamentarische Motion.

Der Fachkreis Kernenergie versucht, dazu Antworten zu geben. Welche Möglichkeiten gibt es denn, um Kernkraftwerke noch sicherer zu machen, so dass sie auch nach Fukushima Akzeptanz finden könnten? Welche Entwicklungen sind bei den radioaktiven Abfällen zu erwarten? Wie stellt sich die Abfallfrage bei anderen Energieformen?

1. Die Reaktoren von Fukushima entsprachen einer veralteten Generation und sind nicht mit der "heutigen Generation" vergleichbar

Die Reaktoren von Fukushima-Daiichi entsprachen dem Stand der Technik der 1960er Jahre. Sie waren aber entgegen den schon damals gültigen Regeln nicht auf die historisch bekannten Tsunamis ausgelegt. Seit den 1960er Jahren hat man weltweit durch stetes Lernen aus der Erfahrung mit dem Betrieb von Kernreaktoren sowie aus Störfällen, aber auch durch gezielte Forschung und Entwicklung u.a.

- die für die Sicherheit wichtigen Systeme und Komponenten zuverlässiger und robuster gemacht;
- den Schutz gegen innere und äussere Störungen verstärkt;
- das Zusammenspiel zwischen Mensch und Maschine verbessert.

Das führte nicht nur zu Verbesserungen bei den neu gebauten Kernkraftwerken, sondern auch zu gezielten Nachrüstungen (letztere leider nicht in Japan!). Dabei wurden auch Vorkehrungen derart getroffen, dass selbst sogenannte „auslegungsüberschreitende“ Störfälle noch wirksam eingegrenzt werden können. Verschiedene Analysen zum Fukushima-Unfall zeigen denn auch klar auf, dass ein solcher Ablauf in den schweizerischen Reaktoren auf mehreren Stufen blockiert worden wäre.

In den 1990er Jahren wurde sowohl in Deutschland wie auch in der Schweiz die Forderung nach einem „katastrophenfreien“ Reaktor aufgestellt, der selbst bei schweren Unfällen keine oder zumindest keine längerfristigen Notfallmassnahmen ausserhalb des Kraftwerkgeländes erfordern würde. Die europäischen Kernkraftwerkbetreiber haben diese Forderung in den „*European Utility Requirements*“ übernommen und sie wird insbesondere in den in Finnland und Frankreich im Bau befindlichen Kernkraftwerken des Typs „EPR“ umgesetzt.

2. Die Auswirkungen eines schweren Unfalls lassen sich begrenzen

Drei Wege bieten sich an, um die Freisetzung von Radioaktivität ausserhalb des Kraftwerkgeländes weitgehend zu begrenzen: eine weitere Verbesserung der heute weltweit bevorzugten und bewährten Leichtwassertechnologie, eine unterirdische Bauweise oder ein Umsteigen auf andere Reaktortechnologien.

a) Weitere Verbesserung der heutigen Leichtwassertechnik

Ein Beispiel für einen verbesserten Leichtwasserreaktor ist der schon erwähnte deutsch-französische EPR (*European Pressurised Water Reactor*), eine Weiterentwicklung der bewährten standardisierten französischen und deutschen Reaktoren. Er verfügt über mehrfache und verschiedenartige Sicherheitssysteme, die das Abschalten, die Not- und Nachkühlung sowie die Druckentlastung auch bei extremen Ereignissen sicherstellen. Um die Funktion des Doppelcontainments selbst bei einer Kernschmelze aufrechtzuerhalten, gibt es spezielle Kernschmelze-Rückhalte-Vorrichtungen (*Core Catcher*). Damit wird auch bei einem schweren Unfall die Freisetzung von Radioaktivität in die Umgebung wirksam begrenzt. Trotz Bauverzögerungen bei den ersten zwei Anlagen in Finnland und Frankreich – hauptsächlich wegen Lerneffekten nach einer längeren Periode ohne Neubauten – stellt der EPR eine überzeugende Technik dar, um die Umgebung vor Kontamination zu schützen. Insgesamt sind vier EPR im Bau (auch zwei in China) und weitere bestellt/geplant (in Indien, Grossbritannien, Litauen und Amerika)

Andere Anbieter bieten ähnliche fortgeschrittene Druck- oder Siedewasserreaktoren an, z.T. auch mit vermehrt "passiven" (=selbstwirkenden) Sicherheitssystemen. Heute können somit Leichtwasserreaktor-KKW gebaut werden, die Unfallsituationen beherrschen, welche weit über den bisher üblichen Auslegungsbereich hinausgehen.

b) Unterirdische Bauweise

Im letzten Jahrhundert wurden zahlreiche hydraulische Kraftwerke und strategisch wichtige Anlagen unterirdisch gebaut. Dazu gehörten auch drei frühe kleine Kernkraftwerke: Ågesta in Schweden, Chooz in Frankreich und Lucens in der Schweiz.

Lucens (VD) ist für die aktuelle Sicherheitsdiskussion von besonderem Interesse, weil dort nicht nur ein unterirdisches KKW gebaut und betrieben wurde, sondern auch ein schwerer Unfall passierte. Die Ende der fünfziger Jahre begonnene schweizerische Eigenentwicklung eines Kernkraftwerkes wurde angesichts der Dominanz der amerikanischen Industrie durch Entscheid im Jahr 1967 abgebrochen. Während der für zwei Jahre geplanten Restbetriebszeit kam es 1969 zum Unfall mit Teilschmelze eines Brennelementes. Dank des Felscontainments gelangte keine gefährliche Radioaktivität in die Umgebung. Der Standort konnte in der Folge dekontaminiert und für unbeschränkten Gebrauch wiederhergestellt werden.

Später wurde weltweit kein weiteres KKW unterirdisch gebaut. Gründe waren die damit verbundenen Mehrkosten und die jeweils nötige Anpassung der Kernreaktoren an die spezifischen örtlichen Verhältnisse (unterirdische Platzverhältnisse sind auch aus der Sicht der Sicherheit oft ungünstig, z.B. bei Bränden).

Die heute geforderte höhere Sicherheit mit Ausschluss der Möglichkeit einer radioaktiven Kontamination ausserhalb des KKW-Geländes und Schutz auch gegen extreme Einwirkungen könnte diesbezüglich ein Umdenken bewirken, trotz Nachteilen und Mehrkosten. Dafür wäre die Schweiz dank ihrer Erfahrung im Bau von Tunneln und Kavernen geradezu prädestiniert. Ein mittel-grosses KKW würde Platz in der unterirdischen Maschinenhalle des Pumpspeicherwerks „Nant de Drance“ im Kanton Wallis finden (jetzt im Bau). Noch nötige zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten betreffen insbesondere die Gestaltung des Abschlusses des unterirdischen Nuklearteiles und die Eigenschaften des jeweils vorliegenden Untergrundes.

c) Andere Reaktortechnologien

Reaktoren, die den Brennstoff effizienter nutzen, z.B. schnelle Neutronenreaktoren und gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren, wurden in der Vergangenheit gebaut und betrieben, aber nicht industriell entwickelt. Das Interesse an diesen Reaktortypen ist seit 2000 weltweit wieder neu erwacht.

Die Entwicklung einer neuen Generation innovativer nuklearer Energiesysteme ist mit grossem Aufwand verbunden, der weder von einzelnen Firmen noch Ländern getragen werden kann. Da erfahrungsgemäss zudem eine hohe Standardisierung der Systeme erhebliche Vorteile bietet, bemüht man sich, diese Aktivitäten gemeinsam voranzutreiben und weltweit zu koordinieren. Verschiedene Länder, darunter auch die Schweiz, haben sich dazu im Generation IV International Forum (GIF) zusammengeschlossen. Die Roadmap für die Generation IV hat 6 Reaktorsysteme als meistversprechende für die Zukunft identifiziert. Neben verbesserter Sicherheit zeichnet sich die Mehrzahl der anvisierten Konzepte dadurch aus, dass es sich um Reaktoren mit schnellen Neutronenspektren handelt, die einen Quantensprung in der Ressourcennutzung (Uran oder Thorium) von einem Faktor 50-100 ermöglichen. Von den Reaktoren der Generation IV (zu denen auch ein Leichtwasserreaktor mit höherer Betriebstemperatur gehört) erwartet man, dass sie ab 2040 bis 2050 zum Einsatz gelangen werden.

Ein vielversprechendes Konzept ist der Hochtemperaturreaktor (HTR). In den 1960er und 70er Jahren waren einige HTR in Betrieb, die dann nach und nach stillgelegt wurden, aus politischen Gründen in Deutschland und aus kommerziellen Gründen in Amerika. Aufgrund seiner hervorragenden inhärenten Sicherheitseigenschaften bei kleinen Blockgrössen, seiner potenziellen Verwendung für

Hochtemperatur-Industrieprozesse, der Möglichkeit des direkten Anschlusses von Gasturbinen und der Verwendung des Brennstoffs Thorium ist das Interesse an diesem Reaktortyp heute deutlich gestiegen. Zwei Forschungsreaktoren sind in Betrieb: der HTTR in Japan und der HTR-10 in China. In internationaler Zusammenarbeit (vor allem USA und Russland) werden Prototypkonzepte entwickelt, insbesondere der GT-MHR in den USA (*Gas Turbine Modular High Temperature Reactor*). Mittlerweile wird noch in diesem Jahr China mit dem Bau eines ersten 250 MWe-HTR-KKW anfangen

3. Langlebige Abfälle entstehen nicht nur bei Kernkraftwerken

Für die Beurteilung von radioaktiven und konventionellen Abfällen verschiedener Energieformen müssen drei Aspekte berücksichtigt werden: die Menge, die Langlebigkeit und die Eignung für die sichere Entsorgung.

a) Mengen der radioaktiven Abfälle

Um Wärme und daraus Strom zu erzeugen, müssen Atomkerne gespalten werden. Für eine gewisse Wärmemenge braucht es eine fixe Anzahl Spaltungen, die nicht von der Art des Kernkraftwerks abhängt. Bei heutigen Leichtwasserreaktoren kann - bedingt durch die werkstoffseitig begrenzten Temperaturen - nur ein Drittel der Energie in Strom umgewandelt werden (d.h. der Wirkungsgrad ist 33%). Bei natriumgekühlten Reaktoren erreicht man über 40%, bei Hochtemperaturreaktoren über 50%. Je höher der Wirkungsgrad, desto geringer die Menge der radioaktiven Spaltprodukte pro kWh. Die Nagra hat errechnet, dass die bestehenden KKW **etwa 10 Kubikmeter hochaktive und langlebige radioaktive Abfälle pro Milliarde Kilowattstunden erzeugen**. Darin eingeschlossen sind „Aktiniden“, die durch Wiederaufarbeitung um einen Faktor 10 verringert werden können.

b) Zur Langlebigkeit von radioaktiven Abfällen

Bei der Nutzung der Kernenergie fallen neben kurzlebigen auch langlebige radioaktive Abfälle an. Eine denkbare Strategie zur Entsorgung besteht darin, diese chemisch abzutrennen und durch Beschuss mit bestimmten nuklearen Teilchen, z. B. mit Neutronen in kurzlebigere, bzw. stabile Atomsorten umzuwandeln (Transmutation), um möglichst wenig langlebigen Abfall in Tiefenlagern aufbewahren zu müssen. Damit liesse sich die notwendige Einschlusszeit auf etwa 600 Jahre reduzieren. Bis dato wurde weltweit aber noch keine grosse Transmutationsanlage zur Beseitigung nuklearer Abfälle verwirklicht; lediglich im Rahmen von Forschungsprojekten wurden kleine Teilanlagen realisiert, u.a. am Paul Scherrer Institut in Würenlingen.

Geplant ist derzeit eine grössere europäische Forschungsanlage im belgischen Mol, die im Jahr 2020 fertig sein könnte. Der dortige Versuchsreaktor *Myrrha* (Multi-Purpose Hybrid Research Reactor for Hightech Applications) würde nach derzeitigem Wissensstand nicht nur Kernabfall beseitigen, sondern auch Strom produzieren.

c) Können radioaktive Abfälle sicher gelagert werden?

Der Bundesrat hat 1988 den Entsorgungsnachweis für schwach- und mittelaktive Abfälle, 2006 den Sicherheitsnachweis für hochaktive Abfälle als erbracht bezeichnet. Zum noch fehlenden Standortnachweis für die letzteren reichte die Nagra am 17. Oktober 2008 einen Bericht mit ihren Vorschlägen für geologisch geeignete Standortgebiete beim Bundesamt für Energie ein. Die Auswahl der

Nagra basierte ausschliesslich auf sicherheitstechnischen Kriterien und auf Kriterien der technischen Machbarkeit. Das ENSI hat die von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebiete überprüft und der Nagra eine fachlich fundierte, umfassende und nachvollziehbare Analyse der geologischen Grundlagen bescheinigt sowie diesen Standortgebieten zugestimmt. Nach der Nagra und ENSI obliegt jetzt dem Bundesamt für Energie die politische Federführung im Standortauswahlverfahren.

Weltweit gibt es über zwei Dutzend ober- oder unterirdische Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle; geologische Tiefenlager für hochaktive Abfälle sind in Finnland und Schweden im Bau.

d) Menge, Langlebigkeit und Entsorgungseignung von Abfällen aus anderen Methoden der Stromerzeugung

Nicht nur bei der Stromerzeugung aus Kernenergie entstehen Abfälle, sondern auch bei Kohle-, Gas- und Sonnenkraftwerken!

Die grossen Mengen an Kohlendioxid (CO₂), die seit über 200 Jahren durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen in die Atmosphäre "entsorgt" worden sind, bleiben etwa 1000 Jahre in der Luft, bevor sie ins Meerwasser gelangen. Diese Langlebigkeit ist vergleichbar mit dem Gros des radioaktiven Abfalls. Beim CO₂ sind jedoch die Mengen viel grösser und die „Entsorgung“ erfolgt in die Atmosphäre statt in den Untergrund. Trotzdem scheinen heutzutage Politik und Medien keine Bedenken zu haben, in Deutschland und der Schweiz die bevorstehenden Stromlücken mit fossilen Energien zu decken. **Bei der Erzeugung einer Milliarde Kilowattstunden mit Erdgas werden etwa 500'000 Tonnen CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt.** Es sind zwar grosse Anstrengungen im Gang, um das CO₂ abzutrennen und unterirdisch zu lagern. Die technische, ökologische und wirtschaftliche Machbarkeit erscheint aber angesichts der riesigen Mengen als unsicher.

Auch die Stromerzeugung aus Sonnenenergie mittels Fotovoltaik ist nicht abfallfrei. **Pro Milliarde Kilowattstunden werden 500 Kubikmeter Solarabfall abgeschätzt** (Annahmen für die Solarzellen: Betriebsdauer 20 Jahre, 100 kWh pro Quadratmeter und Jahr, 95% Rezyklierung des Materials).

Wie langlebig sind diese Solarabfälle? Kurz gesagt: ewig! Ihre Toxizität hängt von der Art der Kollektoren ab. Die bisherigen Sonnenkollektoren mit monokristallinen Siliziumzellen gelten nicht als problematisch, während die nachfolgende Generation, die in grossen Stil in der Schweiz zum Einsatz kommen soll (Dünnschichttechnologie), neben Silizium auch Kadmiumtellurid (CdTe) enthält.

Kadmium gehört mit Blei und Arsen zu den sechs gefährlichsten chemischen Substanzen. Laut dem amerikanischen Gesundheitsamt (*Occupational Safety and Health Administration-OSHA*) kann sich bei den Dünnschichtzellen das Kadmium vom Tellur lösen und in die Umgebung austreten, sei es während der Fabrikation, des Betriebs oder danach bei der Entsorgung. Aus diesem Grund verpflichten sich amerikanische Solarfirmen, die eigenen Sonnenkollektoren am Ende des Betriebs zurückzunehmen und sorgfältig zu entsorgen.

Wäre es bei der Fotovoltaik nicht angebracht, eine Vorfinanzierung der Abfallentsorgung einzuführen und die geologische Lagerung des toxischen Restabfalls vorzubereiten? Dabei könnte die Solarindustrie von 40 Jahren Erfahrung der Nagra profitieren.

4. Die Welt wird künftig Kernkraftwerke bauen, die die Lehren aus Fukushima inkorporiert haben – sie kann nicht auf "künftige" Reaktortypen warten

Die bisherigen Darlegungen zeigen, dass die heute baubaren Reaktoren keinesfalls mit den Reaktoren von Fukushima-Daiichi vergleichbar sind, die eine veraltete Technik mit krassem Auslegungsfehler darstellten. Der betriebsbewährte Leichtwasserreaktor wird in nochmals verbesserter Version weltweit mindestens für einige Jahrzehnte der Reaktor der Wahl bleiben. Er genügt hohen Sicherheitsanforderungen und die erzeugten radioaktiven Abfälle können sicher gehandhabt und entsorgt werden.

Andere Reaktorkonzepte brauchen für Fertigung und Erreichen der industriellen Reife noch einige Jahrzehnte Zeit. Die als "künftige" Reaktorgeneration oder Generation IV angekündigte Reaktorfamilie wird nicht vor 30 bis 40 Jahren zum Einsatz bereitstehen. Sie wird v.a. einen grossen Fortschritt in der Nutzung des Kernbrennstoffs und damit auch eine Reduktion der Menge und evtl. auch der Lebensdauer der radioaktiven Abfälle mit sich bringen. Schon heute sind aber die radioaktiven Abfälle der Kernkraftwerke deutlich besser unter Kontrolle als bei allen anderen Industrien inkl. der fossilen und solaren Stromerzeugung.

Der Stromhunger ist aber so verbreitet, dass die Welt alle vernünftig einsetz- und bezahlbaren Formen der Stromerzeugung verwenden muss. Sie wird weder auf Kernenergie verzichten noch auf "künftige" Reaktoren warten. Sie wird in den nächsten Jahrzehnten auf Reaktoren setzen, die die Lehren aus Fukushima inkorporiert haben. Die Schweiz täte daher gut daran, sich diesen Weg nicht zu verbauen.

Rückfragen an Bruno Pellaud: pellaud@bluewin.ch oder 027 483 1173/079 294 9760

Mitglieder des Fachkreises Kernenergie: Dr. Alec **Baer**, ehem. Vize-Direktor des Bundesamts für Energie; Hans **Burri**, ehem. Vize-Direktor der Elektrowatt Ingenieurunternehmung; Dr. Jean-François **Dupont**, Physiker; Ferruccio **Ferroni**, ehem. Vize-Direktor der Elektrowatt Ingenieurunternehmung; Dr. Hans **Fuchs**, ehem. Leiter Thermische Produktion der ATEL (heute Alpiq); Dr. Wolfgang **Jeschki**, ehem. Direktor der Schweiz. Nuklearen Aufsichtsbehörde; Dr. Hans Rudolf **Lutz**, ehem. Chef des Kernkraftwerk Mühleberg, und Kantonsrat-Mitglied des Kantons Solothurn; Roland **Nägelin**, ehem. Direktor der Schweiz. Nuklearen Aufsichtsbehörde; Dr. Bruno **Pellaud**, ehem. Stv. Generaldirektor der IAEO; Prof. Dr. Arturo **Romer**, ehem. Direktor des Sekretariats der Elektrizitätswerke der italienischen Schweiz; Mario **Schönenberger**, ehem. Kraftwerkleiter, Kernkraftwerk Leibstadt.

Anhang: Vergleich von KKW-Typen anhand ihrer Sicherheitsausrüstungen

	Fukushima	Leibstadt	EPR	HTR	Unterirdisch. LWR
Schutz gegen Erdbeben	+	+	+	+	++
Schutz gegen Überflutung	-	+	+	+	+
Schutz gegen Flugzeugabsturz	-	+	+	+	++
Schutz gegen innere hypothetische Brüche	-	-	-	-	+
Primäre Schutzhülle	+	+	+	+	+
Sekundäre Schutzhülle	-	+	+	+	+
Druckentlastung über Filter	-	+	+	+	+
Notstand-System	-	+	+	+	+
Kernschmelze-Rückhaltevorrichtung	-	-	+	+	+
Unfallmanagement	-	+	+	+	+
Management von inneren Bränden	+	+	+	+	-

- a) *Wie das frühere KKW-Gösgen ist das KKW-Leibstadt gegen selten zu erwartende Einwirkungen von außen wie Erdbeben, Überflutung und Flugzeugabsturz geschützt. Beide KKW verfügen bei Ausfall der normalen Stromversorgung und Kernkühlung über gesichert aufgestellte Notstromversorgung und Notkühlung sowie automatisch wirkende Notstandfunktion; bei Überdruck und eingetretenen Kernschäden kann die Schutzhülle über Filter entlastet werden, wodurch eine Kontamination der Umgebung verhindert oder vermindert werden kann. Das Vorgehen in solchen Fällen ist durch „Unfall-Management Massnahmen“ vorbereitet.*
- b) *Der Hochtemperaturreaktor HTR kann so gebaut werden, dass die Anlage quasi inhärente Sicherheitseigenschaften aufweist. Dazu gehören Beständigkeit auch bei hohen Temperaturen, stabiles Reaktivitätsverhalten und insbesondere die Stabilität der den Brennstoff enthaltenden „Beschichteten Partikel“. Dank der grossen Anzahl getrennten, harten, beschichteten und wärmebeständigen Partikel ist keine Kernschmelze zu erwarten.*