

# Pandoras Atomkraftwerke

Internalisierung der negativen externen Effekte der Atomenergie als letzte Hoffnung

Die Risiken der Atomenergie spiegeln sich nicht in ihrem Preis, sondern werden auf die Allgemeinheit überwältigt. Eine verstärkte Internalisierung wäre Voraussetzung für einen ökonomischeren Energiemix.

Marco Metzler

Das Reaktorunglück in Fukushima hat nach Tschernobyl zum zweiten Mal die Büchse der Pandora geöffnet. Trotz kleinster Wahrscheinlichkeit ist mit dem Erdbeben und dem Tsunami die Katastrophe eingetreten. Die Ingenieure haben in ihren Berechnungen für Fukushima nicht mit einem so grossen externen Störfaktor gerechnet – dennoch ist der «schwarze Schwan» eingetreten. Wie schon im Vorfeld der Finanzkrise haben die Prognosemodelle versagt.

## Unzureichende Haftung

Aus ökonomischer Sicht zeigt sich mit dem Reaktorunfall von Fukushima, dass die negativen externen Effekte der Atomenergie – das Unfallrisiko und die Endlagerung radioaktiver Abfälle – bisher zu stark vernachlässigt wurden. Analog zu fossilen Energiequellen wurden die Externalitäten untertrieben, um den Preis für Atomstrom billig zu halten. Dies führte zu Fehlallokationen: Es wird mehr Atomenergie eingesetzt, als dies volkswirtschaftlich unter Berücksichtigung aller Kosten sinnvoll wäre.

Auch nach dem Reaktorunglück in Japan ist in der Schweiz die Atomenergie-Lobby aber weiterhin anderer Meinung: Roland Bilang, Geschäftsführer beim Nuklearforum Schweiz, verneint, dass es sich bei den Themen Unfall und Endlagerung um Externalitäten handelt. Dem widerspricht der Vertreter der erneuerbaren Energien: Christian Zeyer, Leiter Strategie beim auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Wirtschaftsverband Swisscleantech, ist überzeugt, dass die externen Kosten der Atomenergie nicht internalisiert sind.

Wer würde in der Schweiz für einen Unfall ähnlich wie in Fukushima haften? Laut Bilang sind durch Versicherungen und internationale Verträge Schäden bis zu 2 Mrd. Fr. gedeckt. Darüber hinaus hafteten die Betreiber unbeschränkt. Gemäss Bilang erscheint

dies auf den ersten Blick als wenig, entspreche aber «dem vollen Risiko, da grosse Schadenspotenziale mit kleinen Eintretenswahrscheinlichkeiten multipliziert werden».

Sollte sich in der Schweiz ein ähnlich verheerender Unfall wie in Fukushima ereignen – sei dies durch einen AKW-internen oder -externen Schock –, dann reicht die Haftungsbegrenzung von 2 Mrd. Fr. gemäss Zeyer schnell nicht mehr, was auch Schätzungen des Bundes zeigten. Allein schon das Aufräumen nach einem grösseren Nuklearunfall ohne Verstrahlung der Umgebung würde vermutlich Kosten von mehreren Milliarden Franken nach sich ziehen. Es frage sich, ob die Betreiber dann noch in der Lage sein würden, für die Dekontamination aufzukommen, oder ob das Eigenkapital bereits aufgebraucht wäre und der Staat die Kosten übernehmen müsste. Bei einem Unfall wie in Fukushima könne auch eine Versicherungsdeckung von 50 Mrd. Fr. nicht mehr reichen. Eine Studie des Bundesamtes für Energie gehe gar von einem möglichen Gesamtschaden von 4000 Mrd. Fr. aus.

Weil die Schweizer Betreiber von Atomkraftwerken zu einem beträchtlichen Teil der öffentlichen Hand gehören, haftet der Steuerzahler bereits indirekt bei der Zahlungsunfähigkeit des Betreibers. Wenn dann der Staat einspringen muss, wird der Steuerzahler schliesslich auch direkt zur Kasse gebeten. Er kommt also für die gesamte Differenz zwischen der Versicherungssumme und dem Gesamtschaden auf. Die ungenügende Haftung der Betreiber ist ein klassisches «Moral hazard»-Problem. Der Förderung des billigen Stroms zuliebe hat die Politik den Atomstrom bisher subventioniert. Die Hersteller und Betreiber von Atomkraftwerken haben ein Interesse daran, dass die Politik – und damit die Bevölkerung – die wirtschaftlichen Risiken und externen Kosten übernimmt. Bei der ungelösten Endlagerungsfrage wird das Problem gar an die nächsten Generationen weitergereicht.

## Zurückhaltende Versicherer

Eine konsequente Internalisierung der negativen externen Effekte des Atomstroms vermindert die verzerrende Subventionierung. In der ökonomischen Betrachtung zeigt sich, dass der Grad

### Soziale, ökonomische und ökologische Faktoren von Kraftwerken

Multikriterienbewertung für die Stromversorgung der Schweiz im Jahr 2030 mit drei verschiedenen Indikatorgewichten

Kraftwerkstyp	0 am besten	5	10	15	20	25 am schlechtesten
Erdgas, Brennstoffzelle				G	U	W
Erdgas, GuD <sup>1</sup>			W	U	G	
Erdgas, GuD <sup>1</sup> , inkl. CCS <sup>2</sup>			U		W	
Steinkohle, inkl. CCS <sup>2</sup>		W			U	G
Steinkohle		W			U	G
Nuklear, Generation IV		W	U		G	
Nuklear Typ EPR (3. Generation)		W		U		G
Photovoltaik	U	G			W	
Solarthermie, IT	G	U			W	
Biomasse WKK (Stroh)			U	W	G	
Wind offshore (D)		G	U			W

G Fokus Gesellschaft W Fokus Wirtschaft U Fokus Umwelt

QUELLE: PAUL-SCHERRER-INSTITUT <sup>1</sup> Gas und Dampf; <sup>2</sup> Kohlendioxidlagerung NZZ-INFOGRAFIK/tef.

der Internalisierung ohne Regulierung zu niedrig ausfällt, weil die ansteigenden Grenzkosten der Internalisierung lediglich mit dem privaten Grenznutzen ein Gleichgewicht bilden. Der tatsächlich zu beachtende soziale Grenznutzen liegt aber deutlich höher als der private. In einem regulierten Gleichgewicht schneiden sich die Grenzkosten mit dem soziale Grenznutzen auf einem deutlich höheren, volkswirtschaftlich effizienten Internalisierungsgrad.

Es gibt mehrere Wege, um die Externalitäten des Atomstroms zu internalisieren. Erstens könnte die Versicherungsdeckung stark erhöht werden, und diese wäre über internationale Versicherungspools abzudecken. Wie die Aussagen von Swiss Re zeigen (vgl. kleinen Text unten), sind aber Versicherungen oder der Markt nur bedingt bereit, diese Risiken zu übernehmen.

Zweitens kann man eine Internalisierungsprämie zwar versicherungstechnisch korrekt berechnen, aber letztlich über eine politisch definierte Lenkungsabgabe einziehen. Der Staat tritt dabei als Quasi-Versicherer auf. Wie heute schon haftet hierbei das Staatsvermögen für den Betrieb der Kernkraftwerke, im Gegensatz dazu würde er dafür aber eine Prämie erhalten. In beiden Fällen müssten zudem auch die Risiken der Endlagerung berücksichtigt werden. Die Grundlagen zu einer verlässlichen Berechnung von Schäden und Risiken müssen nun erarbeitet werden.

Bilang ist auch nach Fukushima noch der Meinung, dass das mathematische Risiko durch die Versicherungsprämien und die unbeschränkte Haftung der Be-

treiber internalisiert sei. Es würden keine Kosten sozialisiert. Die Risiken der Kernenergie in der Schweiz seien im Strompreis inbegriffen. Das Schweizer Stimmvolk habe an der Urne mehrmals akzeptiert, dass das Risiko zwar klein sei, aber aus einem hohen Schadenspotenzial mit einer kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit bestehe. Die grösste Externalität der Atomenergie sei «die Kontroverse in der Gesellschaft».

Würden negative Externalitäten konsequent berücksichtigt, dann müsste Atomstrom in der Schweiz deutlich teurer sein als heute. Das Hauptproblem dabei ist, dass der Nutzen der Atomenergie relativ klar bestimmbar ist, während die wahren Kosten kaum berechenbar sind. Gerechnet wird deshalb mit Annahmen und Modellen, weshalb auch die Schätzungen stark divergieren.

## Nachhaltiger Energiemix

Eine im vergangenen Jahr publizierte Studie des Paul-Scherrer-Instituts (PSI) beziffert die externen Kosten der Kernenergie auf 0,07 bis 0,11 Rp. / kWh. Zeyer hingegen glaubt aufgrund einer Extrapolation von Studien, dass der Preis um mehrere Rappen pro kWh höher sein müsste. Atomstrom könne unter diesen Umständen deutlich teurer werden als Windstrom oder eventuell sogar teurer als Solarstrom aus Grossanlagen. Bilang hingegen ist überzeugt, dass unter Berücksichtigung der heute bekannten Fakten der Preis für Atomstrom aus Gründen von Externalitäten nicht erhöht werden müsse. Atomkraft-Risiken müssen aber auch gemeinsam

mit den Klima-Risiken angegangen werden. Die Kernkraft deckt zwar rund 40% des Strombedarfs, aber nur 10% der gesamten Energieversorgung der Schweiz. Laut Zeyer ist diese insgesamt wenig nachhaltig. Swisscleantech plädiert deswegen nicht nur für eine Internalisierung der externen Kosten des Atomstroms, sondern auch für eine Anwendung des Verfahrens auf alle Energieformen.

Um Fehlallokationen zu vermindern, sollte die Politik externe Effekte nicht nur beim Atomstrom stärker internalisieren, sondern auch bei fossilen Energiequellen die schädlichen Folgen für Klima und Gesundheit verstärkt berücksichtigen. Im Gegenzug müssten aber auch beispielsweise bei erneuerbaren Energien wie Wasserkraft oder Windenergie negative Einflüsse auf die Landschaft mit einberechnet werden.

Gelänge es, die Kostenwahrheit über alle Energieformen herzustellen, könnte auch die Subventionierung von erneuerbaren Energien reduziert werden, weil sie automatisch konkurrenzfähiger würden. Bei höheren Energiepreisen bestünden zudem Sparanreize. Effizienzsteigerungen wären attraktiver – sowohl für Private als auch für Unternehmen. Letztlich würde der Markt – bei weniger stark verzerrten Preisen – für eine bessere Allokation der knappen Ressource Energie sorgen.

Die Bestimmung der «wahren» externen Kosten von Energieträgern wird am Ende die Knacknuss bleiben. Das PSI hat in der bereits erwähnten Studie alle Energiearten bezüglich der drei Dimensionen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft bewertet (vgl. Grafik). Jede Energieform hat unterschiedliche Vor- und Nachteile; die Bewertung und Gewichtung der einzelnen Faktoren ist subjektiv und immer auch interessengebunden. Angesichts der grossen Unsicherheit über die Wahrscheinlichkeiten zukünftiger Entwicklungen bleibt der «wahre» Preis von Energie letztlich eine politische Frage.

Die Büchse der Pandora enthielt laut der Sage auch die Hoffnung – doch bevor diese hätte entweichen können, wurde sie wieder geschlossen. Mit jedem Tag, an dem die tragische Katastrophe in Fukushima weitergeht, steigt die Hoffnung, dass künftig externe Effekte stärker internalisiert werden. Dies würde langfristig gesehen den Nutzen aller nachhaltig erhöhen.

# Den Tanz auf dem Vulkan mathematisch modellieren

Extremereignisse lassen sich berechnen und bewerten

Lars Jaeger · Die Kernenergie ist mit Restrisiken verbunden, die auch die beschwichtigenden Beteuerungen der Atomindustrie nicht verbergen können. Wie unwahrscheinlich eine Atomkatastrophe nach probabilitätstheoretischem Ermessen auch sein mag: Stimmen werden immer lauter, die sich weigern, mathematisch quantifizierte Modellrechnungen für Wahrscheinlichkeiten als Grundlage des gesellschaftlichen Diskurses über Atomkraftwerke (AKW) anzuerkennen.

Bei Extremrisiken wie der Kernkraft, die im Ereignisfall extrem grosse – gegebenenfalls zivilisationsbedrohende – Schäden verursachen, besitzt diese Haltung durchaus Berechtigung. Multipliziert man eine sehr kleine Zahl (geringes Risiko) mit einer sehr grossen Zahl (hohe Kosten bei Ereignis), so stösst die Beurteilung des Ergebnisses auch mathematisch an seine Grenzen.

Trotzdem ist man bei der Betrachtung von Extremereignissen weiterhin auf wahrscheinlichkeitstheoretische Modellierungen angewiesen, und sie weisen dort auch gute Ergebnisse auf. Doch sie sollten verbessert werden, woran bereits zahlreiche führende Mathematiker – nicht zuletzt an der ETH Zürich – seit Jahren forschen. Andererseits sollten diese Modelle in der politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsfindung wahrheitsgemässer eingesetzt werden.

Absehbar war, dass ein Erdbeben der Magnitude 9 einen zerstörerischen Tsunami auslöst. Auch dass ein solcher die stromgetriebenen Kühlsysteme eines AKW verwundbar macht, erschliesst sich nicht erst aus komplexen mathematischen Modellen. Fällt bei Siedewasserreaktoren die Kühlung aus, setzt eine Kernschmelze zwangsläufig ein. Bei Extremereignissen ist es eine solche Verkettung von ungewöhnlichen Risiken, die die Kombination der einzelnen Vorkommnisse zu einer geradezu apokalyptischen Katastrophe ausweiten lassen kann.

Betrachtet man die einzelnen Ereignisse unabhängig voneinander, so erhält man bei einer jeweiligen Einzelwahrscheinlichkeit von 1% eine Wahrscheinlichkeit von 0,0001% für das Auftreten aller drei Ereignisse auf einmal. Doch fallen in einem Extremfall diese Ereignisse zusammen, weil den Ereignissen identische Kausalitäten zugrunde liegen, ergibt sich eine Gesamtwahrscheinlichkeit von 1%. Seit Jahren existieren mathematische Modelle, die solche Abhängigkeiten von Geschehnissen in Extremsituation explizit beschreiben. Danach betrug die Wahrscheinlichkeit einer Kernschmelze nach einem solchen Erdbeben im Norden Japans über 50%.

Ein Erdbeben der Stärke 9,0 lag für Japan weit über den Erwartungen, entspricht aber weltweit etwa einem 20-Jahre-Ereignis. Die Bottom-up-Probabilistic

Safety-Analysis der Kernkraftindustrie war klar zu optimistisch, weil sie bedingte Korrelation von Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Komponenten in Extremfällen nicht ausreichend berücksichtigte. Bereits eine Top-down-Analyse, basierend auf der Statistik vergangener Schäden, ergibt eine etwa um einen Faktor 10 höhere Wahrscheinlichkeit für eine Kernschmelze.

Hier ergeben sich Analogien zum Geschehen auf den globalen Kapitalmärkten während der Finanzkrise von 2008: Auch hier fand eine «Kernschmelze» statt. Auch hier bestanden Abhängigkeiten, die ihre verheerende Natur erst in einem Umfeld extremer Vorgänge zeigten, die sich durchaus in komplexeren mathematischen Modellen offenbart hatten, in den vereinfachten von den Banken und Aufsichtsbehörden verwendeten Risikosystemen jedoch keinen Eingang fanden.

Beziehungsgefüge, die sich in Extremumfeldern anders als im Normalfall verhalten, ergeben sich auf vielen Gebieten: Tsunami in Indonesien, «Katrina»-Überflutung von New Orleans, Umweltkatastrophen im Golf von Mexiko – bis hin zum Zusammenbruch ganzer politischer Systeme. Überall wird der bisherige institutionelle und kognitive Erwartungsrahmen überrollt, nicht aber der mathematische. Dabei basieren die Aussagen der politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsträger oft

auf geradezu haarsträubenden Vereinfachungen, irreführenden Fehlinterpretationen oder sogar bewusst interessengetriebenen Verzerrungen mathematischer Ergebnisse. Dies entspricht der Verdunklung einer unheimlichen Realität: Krisen wie diese sind fester Bestandteil unseres wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Geschehens.

Mit dem Begriff «schwarzer Schwan» – ursprünglich eine Metapher des Philosophen Karl Popper – beschreiben Finanzmarktakteure seit einigen Jahren mögliche, jedoch sehr unwahrscheinliche Ereignisse. Nach wie vor bedienen sich Ökonomen der bis zur Nachlässigkeit vereinfachten Modelle des Risikomanagements, statt komplexere, aber realistischere Beschreibungen von «schwarzen Schwänen» samt ihrer Korrelationsstruktur heranzuziehen.

Nach wie vor schenken Aufsichtsgremien den Beteuerungen und lumpigen mathematischen Modellen der Finanzindustrie Glauben. Ereignisse wie 2008 auf den Kapitalmärkten und im März 2011 in Japan verdeutlichen: Wir tanzen auf einem Vulkan. Entsprechend müssten klare Informationen und verantwortliches Handeln eingefordert werden. An mathematischen Modellen dafür fehlt es nicht.

Lars Jaeger ist theoretischer Physiker und Geschäftsführer einer auf alternative Anlagen spezialisierten Gesellschaft in Baar.

## Schwer versicherbar

mtz. · Voraussetzung für die Versicherbarkeit eines allfälligen Schadenereignisses ist laut dem Rückversicherungskonzern Swiss Re, dass sich die Höhe der maximalen Schadenbelastung einigermaßen zuverlässig schätzen lasse. Das gelte vor allem für solche Ereignisse, die sehr selten auftreten, aber potenziell hohe Schäden auslösen. Dass bei einem Atom-GAU Schäden von mehr als 2 Mrd. Fr. entstünden, werde kaum bezweifelt. Die grundsätzlichen Fragen blieben deshalb, wie die Gesellschaft Nutzen und Kosten von Kernenergie abwäge, welche Versicherungslösung sie zu tragen bereit sei und wie die damit verbundenen Kosten unter Betreibern, Konsumenten und dem Staat aufgeteilt werden. Können Kernenergie-Risiken auch mit Hilfe des Kapitalmarkts über sogenannte Cat Bonds gedeckt werden, die heute bereits für gewisse Grossereignisse, wie Schäden aus Wirbelstürmen, angewendet werden? Marktindikationen lassen laut Swiss Re vermuten, dass solche Obligationen für Nuklearrisiken nur sehr begrenzte Kapazität und einen sehr hohen Preis hätten.

### DAS RISIKO DER KERNSCHMELZE

ETH-Professor Horst-Michael Prasser im Interview zu Wahrscheinlichkeiten von Reaktorunfällen.

www.nzz.ch