

CO₂-freie Stromperspektiven für die Schweiz

Neue nukleare Technologien

Trotz aller Sparappelle ist der Strombedarf der Schweiz seit 1990 stetig gestiegen. Um 2020 wird eine Lücke in der Stromversorgung zu füllen sein. Im Fokus der Überlegungen, wie dieser Bedarf möglichst kostengünstig und CO₂-frei gedeckt werden kann, stehen neben neuen erneuerbaren Energien auch neue nukleare Technologien.

Im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE) lotete das PSI für die Energieperspektiven 2035/50 die Potenziale und Kosten für nukleare Technologien der Zukunft aus¹.

Spätestens in 15 bis 20 Jahren werden die Kernkraftwerke Beznau und Mühleberg ihre Produktion einstellen und ab 2020 wichtige Stromimportverträge auslaufen. Ob nuklear oder nicht-nuklear, Weichen für Ersatzlösungen müssen demnächst gestellt werden. Sie sollten zusätzliche CO₂-Emissionen ebenso vermeiden wie Stromkosten, die die Konkurrenzfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Schweiz gefährden.

Kernkraftwerke liefern heute rund 40% des Schweizer Stroms. Zusammen mit der erneuerbaren Wasserkraft sorgen sie für eine weitestgehend luftschadstofffreie und ebenso günstige wie zuverlässige Stromversorgung. Diese Aufgabe könnte eine in Richtung Nachhaltigkeit weiterentwickelte Kerntechnologie auch in Zukunft wahrnehmen.

Das technische und ökonomische Potenzial von Kernenergie an existierenden Standorten würde verschiedene Versorgungsniveaus erlauben – vom Erhalt der jetzigen Leistung bis zu Steigerungen durch effizientere und leistungsstärkere Anlagen. Die Kosten entsprächen in etwa den heutigen. Reaktorsysteme der Zukunft könnten auch mehr Akzeptanz in der Bevölkerung finden. Sie sollen einen besonders hohen Sicherheitsstandard aufweisen und längerfristig Ressourcen schonen sowie Abfallmengen und notwendige Einschusszeiten bei der Entsorgung stark reduzieren. Die Vorteile der Kernenergie kämen so deutlicher zum Tragen als heute.

Inhalt

- 2 **Kerntechnik heute: Nukleare Technologien im Umbruch**
- 3 **Potenziale und Kosten: Flexible Lösungen nach Bedarf**
- 4 **Interview mit PSI-Direktor: «Auch die Kernenergie brauchen wir»**

¹ Neue Erneuerbare Energien und Neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten Beitrag zu den Energieperspektiven 2035/2050 des Bundesamtes für Energie www.energie-schweiz.ch/; <http://gabe.web.psi.ch/projects/bfe/index.html>

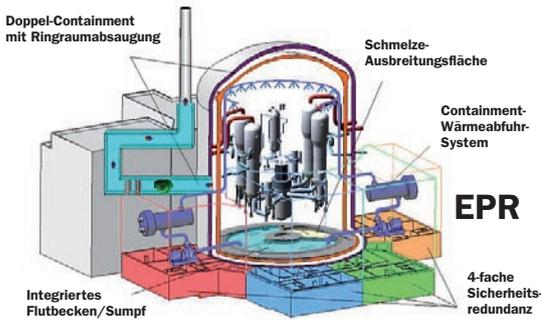
Nukleare Technologien im Umbruch

Wie jede Technologie hat sich auch die Kerntechnik seit ihren Anfängen weiterentwickelt. Man hat aus Fehlern gelernt und vor allem bei den Werkstoffen und der Informationstechnologie von neuen Errungenschaften profitiert. Reaktoren der jüngsten Generation sind sicherer als ihre Vorfahren und nukleare Systeme für die Zukunft gehen innovativ an die Probleme der Ressourcenschonung und Abfallminimierung heran.

Prototyp-Reaktoren für die zivile Stromerzeugung, die erste Generation, entstanden in den 50er- und 60er-Jahren. Aus ihr gingen verschiedene kommerzielle Technologielinien der zweiten Generation hervor, aber nur wenige davon setzten sich durch. Mit 80% der heutigen Anlagen dominieren die Leichtwasserreaktoren (LWR). Die Betriebserfahrung aus über 10 000 Reaktorjahren erlaubte, das Sicherheitsniveau der Generation II auf einen hohen Standard zu bringen. Ältere Reaktoren und Systeme mit Sicherheitsmängeln wurden umfassend nachgerüstet oder stillgelegt.

Solche Konzepte schliessen praktisch aus, dass ein selbst so unwahrscheinlicher Unfall wie das Schmelzen des Reaktorkerns Auswirkungen ausserhalb der Anlage hat: Notfallmassnahmen in der Umgebung wären nicht mehr notwendig. Diese Konzepte bilden die dritte Generation von Reaktoren; einige davon sind bereits in Betrieb (in Ostasien), weitere im Bau (auch in Europa).

Entwicklungsziele: Ressourcenschonung und Abfallminimierung



Figur 1: Die markantesten Neuerungen des EPR (1600 MWe) umfassen ein doppeltes Containment, ein spezielles Wärmeabfuhrsystem aus dem Containment und eine Ausbreitungsfläche, die im Fall eines Kernschmelzens die Schmelze auffängt und eine Beschädigung der Fundamente verhindert. Alle Sicherheitssysteme sind in vierfacher Redundanz realisiert.

Im Laufe der 90er-Jahre wurden die Sicherheitssysteme aufgrund der Erfahrungen gezielt weiterentwickelt und in neue Reaktorkonzepte integriert, die eine neue Sicherheitsqualität erreichen.

Bekanntester Vertreter dieser Generation ist der Europäische Druckwasser-Reaktor (EPR), der derzeit in Finnland gebaut wird (Figur 1). Der EPR ist eine Weiterentwicklung von bewährten standardisierten französischen und deutschen Reaktoren. Andere Systeme der Generation III setzen auf passive Sicherheitssysteme oder nutzen inhärente physikalische Eigenschaften des Systems, die ein Überhitzen und Schmelzen des Kerns verunmöglichen.

Und die Entwicklung geht weiter. Bereits entstehen im Rahmen internationaler Kooperationen jene Reaktorkonzepte, die in 20 bis 40 Jahren zum Einsatz kommen könnten, die vierte Generation. Im Vergleich zur Generation III werden sie das Sicherheitsniveau weiter erhöhen. Je nach Konzept sollen einige von ihnen auch den Energiegehalt von Uran möglichst voll ausschöpfen

Passive Sicherheitssysteme sind Einrichtungen, die bei Abweichungen von den normalen Betriebswerten selbsttätig (d.h. ohne menschlichen Eingriff und ohne externe Energie) eingreifen. Sie werden nur von physikalischen Grössen wie Temperatur, hydrostatische Höhe etc. ausgelöst und getrieben. Die Leistungsfähigkeit solcher Systeme für den Einsatz in Reaktoren der Generation III wird auch in der PANDA-Anlage des PSI getestet.

Inhärente Sicherheit bedeutet: Gewisse gefährliche Situationen, wie z.B. eine Überhitzung des Reaktors, sind unter allen Umständen ausgeschlossen, weil auf Grund physikalischer Gesetze der Reaktor bei Störungen automatisch in einen sicheren Zustand zurückgeführt wird.

(heutige LWR nutzen etwa 1 bis 1,5% davon), das Abfallvolumen minimieren und die nötige Lagerzeit für das Abklingen der Abfallradioaktivität bis auf natürliches Niveau, d.h. auf einige hundert Jahre reduzieren. Dazu sind «schnelle» Neutronen nötig. Solche Konzepte wurden schon in den 50er-Jahren skizziert, sind aber an die Grenzen der damaligen technischen und ökonomischen Möglichkeiten gestossen (z.B. der französische schnelle Brüter Superphénix). Der heutige Stand von Werkstoff- und Prozesstechnik sowie der Informationstechnologie lässt ihre erfolgreiche Realisierung möglich erscheinen.

Tabelle 1 fasst die Hauptmerkmale der verschiedenen zurzeit untersuchten Konzepte der 4. Generation zusammen. Bis zu ihrem Einsatz gilt es, noch einige technologische Herausforderungen mit gezielter Forschung und Entwicklung zu meistern.

Tabelle 1: Die Generation-IV-Systeme im Vergleich.

System	Temperatur [°C]	Brennstoffzyklus	Grösse [MWe]	Produkt	Technologische Herausforderungen
Gasgekühlter schneller Reaktor (GFR)	850	geschlossen, in-situ	288	Strom, Wasserstoff	Brennstoffe für das schnelle Neutronenspektrum Kernausslegung, Sicherheit, Brennstoffzyklus-Technologie Entwicklung einer Hochleistungs-Heliumturbine
Flüssigmetall-gekühlter schneller Reaktor (LFR)	550–800	geschlossen, regional	50–150, 300–400, 1200	Strom, Wasserstoff	Brenn- und Werkstoffe Systemauslegung, nicht-nuklearer Anlagenteil Ferngesteuerte Fabrikation metallischer Brennstoffe
Schmelzsatz-Reaktor (MSR)	700–800	geschlossen, in-situ	1000	Strom, Wasserstoff	Langfristiges Verhalten und Aufarbeitung des Brennstoffes Werkstoffverträglichkeit Salzaufbereitung, -abtrennung und -wiederaufarbeitung
Natriumgekühlter schneller Reaktor (SFR)	550	geschlossen	300–1500	Strom	Nachweis der Meisterung von Grenzereignissen Reduktion der Kapitalkosten Ferngesteuerte Fabrikation von Oxid-Brennstoffen
Superkritisch-wassergekühlter Reaktor (SCWR)	510–550	offen/geschlossen	1500	Strom	Werkstoffe und Strukturen: Korrosion, Radiolyse, Festigkeit Sicherheit, inkl. Leistungs-/Strömungsstabilität
Ultrahoch-Temperatur-Gasreaktor (VHTR)	≥ 1000	offen	250	Wasserstoff, Prozesswärme, Strom	Neuartige Brenn- und Werkstoffe für höhere Temperaturen Wasserstoffproduktion mit dem S-I-Verfahren Entwicklung einer Hochleistungs-Heliumturbine

Flexible Lösungen nach Bedarf

Die Kernenergie in der Schweiz könnte verschiedene Wege gehen – in Richtung Ausstieg, Erhalt des Status quo oder Ausbau. In den Abstimmungen vom Mai 2003 wurde ein Ausstieg abgelehnt; ein Ausbau an neuen Standorten erscheint heute politisch kaum machbar. Darum fokussierte die Studie auf den Mittelweg: Ersatz der Anlagen an bestehenden Standorten. Auch dieser Pfad hängt wesentlich von der Akzeptanz der Nukleartechnik ab.

Mit einer technischen und ökonomischen Lebensdauer von 50 (Beznau und Mühleberg) bzw. 60 Jahren (Gösgen und Leibstadt) werden die Schweizer Kernkraftwerke um etwa 2020 bzw. 2040 und 2045 den Betrieb einstellen. Die Generation-IV-Konzepte werden dann vermutlich noch nicht marktreif oder lange genug anderswo erprobt sein. Für einen allfälligen Ersatz wurde in der Studie deshalb mit Reaktoren der Generation III gerechnet. Für den Ersatz von Leibstadt, der später anfällt, prüfte man zusätzlich die Möglichkeit, Generation-IV-Systeme einzusetzen.

Kernfragen: Akzeptanz und lange Planungszeiten

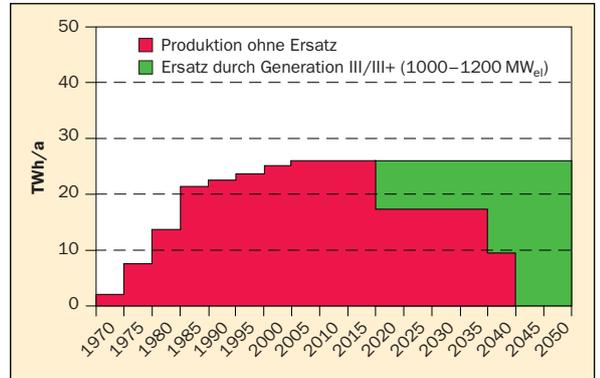
Systeme der Generation III haben Leistungen von 1000 MWe bis 1600 MWe. Man kann also flexibel entscheiden, ob die heutige Leistung der Schweizer Kernkraftwerke konstant zu halten ist oder die Kapazität der Standorte (bestimmt durch die Kühlkapazität der Flüsse) voll ausgenutzt werden soll. Entsprechend wurden drei Ersatzszenarien untersucht (Figuren 2, 3, 4).

Je nach Szenario variiert der im Jahr 2050 produzierte Nuklearstrom zwischen 26 und 44 TWh. Wird die nukleare Stromproduktion konstant auf 26 TWh gehalten, entsteht bei moderatem Bedarfszuwachs (1,5% pro Jahr bis 2010, dann 0,75% pro Jahr) eine Versorgungslücke ab 2020. Um sie zu füllen, müssten alle zehn Jahre 5 TWh oder eine neue Anlage von 600 bis 700 MWe neu zugebaut werden.

Je nachdem wie sich der Strombedarf weiter entwickelt (0 bis 2% Zunahme pro Jahr), könnte Kernenergie mit

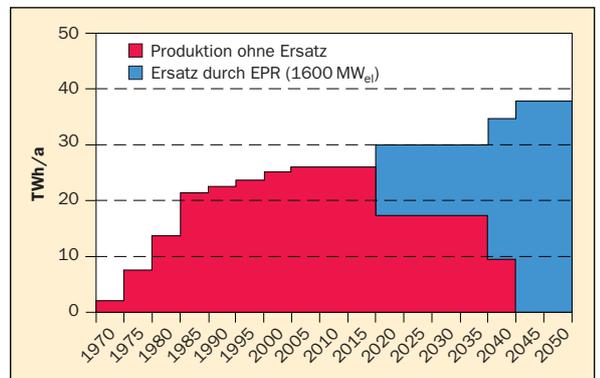
Figur 2:

Szenario 0: Die bestehenden KKW werden nach 50 resp. 60 Jahren Lebensdauer aus dem Betrieb genommen und nicht ersetzt.
Szenario 1: Die KKW Mühleberg und Beznau werden mit einer einzigen Einheit von ca. 1000 MWe ersetzt; 2040 resp. 2045 kommt anstelle von Gösgen und Leibstadt jeweils eine Anlage von 1000 MWe bzw. 1200 MWe zum Einsatz.



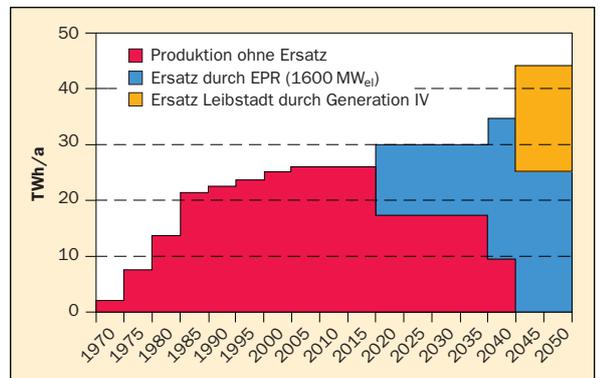
Figur 3:

Szenario 2A: Die KKW Mühleberg und Beznau werden mit einem einzigen EPR 1600 ersetzt; 2040 resp. 2045 werden Gösgen und Leibstadt mit jeweils einem EPR 1600 ersetzt.



Figur 4:

Szenario 2B: Die KKW Mühleberg und Beznau werden mit einem einzigen EPR 1600 ersetzt; 2040 kommt anstelle von Gösgen ein EPR 1600 und 2045 wird Leibstadt mit modularen Reaktoren der Generation IV mit einer Gesamtleistung von bis zu 2000 MWe ersetzt.



3200 bis 5200 MWe installierter Gesamtleistung zwischen 30 und 68% der einheimischen Nachfrage im Jahr 2050 decken.

Finanzielle Aspekte

Ein gesetzlich verankertes langes Bewilligungsverfahren führt dazu, dass ein neues KKW lang im Voraus geplant werden muss. Es kann erst 10 bis 15 Jahre nach Bauteilscheid Gewinn abwerfen. Das braucht Mut seitens der Investoren. Dafür sind die Gestehungskosten dann ziemlich tief. Sie betragen heute 4 bis 5,5 Rp/kWh (inkl. Entsorgungs- und Stilllegungskosten) und sollen beim EPR ungefähr auf gleichem

Niveau liegen. Für Systeme der Generation IV werden heute als Ziel ambitionöse 2,5 bis 3,5 Rp/kWh vorgegeben.

Akzeptanz

Was die Potenziale der Kernenergie am meisten beeinflussen wird, ist die öffentliche Akzeptanz für diese hochanspruchsvolle und vielen Leuten nicht ganz geheure Technik. Will sie sich in Zukunft weltweit breiter durchsetzen, muss sie wie in den letzten 20 Jahren unfallfrei bleiben und überzeugende Antworten zur Abfallfrage und Proliferationsproblematik liefern – ein herausfordernder gesellschaftlich-technischer Prozess.

«Auch die Kernenergie brauchen wir»

Was ist Ihre Vision des zukünftigen Schweizer Strom-Mix, mittel- und langfristig?

Der Stromverbrauch wird in Zukunft weiter steigen. Der Schweizer Strom-Mix muss weiterhin nahezu CO₂-frei erzeugt werden. Das bedeutet eine Förderung der Wasserkraft, der Kernenergie und der Entwicklung von neuen erneuerbaren Energieformen zu Marktpreisen. Stromerzeugung mittels Gaskraftwerken ist langfristig für die Schweiz keine gute Lösung.

Was wäre die spezifische Rolle der Kernenergie in diesem Strom-Mix?

Die Kernkraft wird aus heutiger Sicht wichtig bleiben, denn sie garantiert eine CO₂-freie Stromproduktion. Da der Brennstoff eine hohe Energiedichte aufweist und daher gut gelagert werden kann, trägt sie auch zur Versorgungssicherheit bei. Neue Energieformen wie z.B. Biomasse sollen in erster Linie zur Substitution von importiertem Erdöl oder Erdgas verwendet werden.

Nur eigene Beiträge bieten Zugang zum weltweit generierten Wissen

Was bedeutet das für die Schweizer Forschung? Für die Stromindustrie?

Eine gute Ausbildung der Nuklearingenieure ist eine wichtige Voraussetzung für den sicheren Betrieb von Kernkraftwerken. Spannende Forschung zieht auch die nötige Anzahl Studentinnen und Studenten an. Als kleines Land müssen wir vernetzt mit ausländischen Partnern wie z.B. mit Frankreich oder Japan arbeiten.

Eine sehr grosse Aufgabe der Stromindustrie besteht darin, die gesellschaftliche Akzeptanz der Kernenergie und im Speziellen der Abfallentsorgung durch Überzeugungsarbeit zu verbessern. Andernfalls ist das finanzielle Risiko, in einem Referendum zu scheitern, zu gross.

Wie stellen Sie sicher, dass die Entwicklung der Forschung und Lehre mit den Zielen kompatibel ist?

Der ETH-Bereich mit ETHZ, EPFL, und PSI bietet demnächst einen Master in Nuclear Engineering an, der mit den europäischen Bedingungen abgestimmt ist. Diplom- und Doktorarbeiten können an den Forschungseinrichtungen des PSI durchgeführt werden. Die aus-

gezeichnete Zusammenarbeit und der Dialog mit den Kernkraftwerken stellen zudem sicher, dass die Forschung des PSI marktrelevant bleibt.

Das PSI konzentriert sich auf die Sicherheit heutiger nuklearer Anlagen und Entsorgung – reicht das?

Kernkraftwerke dürfen so lange betrieben werden, wie ihre Sicherheit garantiert ist. Wichtig ist daher zum Beispiel, genügend über Materialermüdungen

Europakompatibel ausbilden und forschen: Der ETH Master in Nuclear Engineering

zu wissen. Wir müssen aber auch die Technologie zukünftiger Anlagen beurteilen können. Daher engagiert sich das PSI in einem internationalen Team mit Teilaspekten der vierten Generation von Kernkraftwerken. Nur wer auch etwas beiträgt, hat Zugang zum weltweit generierten Wissen.

Was ist die Rolle des neuen Kompetenzzentrums für Energie und Mobilität (CCEM-CH) im Hinblick auf die Stromperspektiven der Schweiz?

Nur ein umfassendes Wissen in allen Technologien und deren ökonomischen Bedingungen erlaubt es, verlässliche Perspektiven zu erstellen. Diese Gesamtkompetenz wird im CCEM-CH vorhan-



Ralph A. Eichler promovierte an der ETH Zürich nach dem Studium in Physik. Nach Forschungsaufenthalten in den USA und Deutschland wurde

er 1989 als ausserordentlicher und 1993 als ordentlicher Professor für Experimentalphysik an die ETH Zürich gewählt. Seit 2002 ist Ralph Eichler Direktor des Paul Scherrer Instituts.

den sein durch eigene Forschung auf hohem Niveau in verschiedenen Energiewandlungstechnologien. Das Projekt GaBE am PSI und Centre for Energy Policy and Economics, CEPE, an der ETH nutzen die gewonnenen technischen Erkenntnisse und formulieren zusammen mit ökonomischen und gesellschaftlichen Aspekten mögliche Szenarien.

Die Kernkraft wird aus heutiger Sicht wichtig bleiben

Der Stromverbrauch stellt nur ungefähr ein Viertel des Energieverbrauchs dar. Daher sind Aspekte der Mobilität, der Gebäudeheizungen und der Effizienzsteigerung ebenso wichtige Forschungsgebiete, wenn es darum geht, das Verbrennen fossiler Energieträger zu reduzieren.

Impressum

Energie-Spiegel ist der Newsletter des PSI zur ganzheitlichen Betrachtung von Energiesystemen (Projekt GaBE). Er erscheint alle vier Monate. Beiträge zu dieser Ausgabe von Konstantin Foskopos und Peter Hardegger.

ISSN-Nr.: 1661-5093

Auflage: 15 000 Ex. Deutsch, 5000 Ex. Französisch, 500 Ex. Englisch
Bisherige Ausgaben als Pdf (D, F, E):
<http://gabe.web.psi.ch/>

Verantwortlich für den Inhalt:

Paul Scherrer Institut
Dr. Stefan Hirschberg
5232 Villigen PSI, Schweiz
Tel. 056 310 29 56, Fax 056 310 44 11
stefan.hirschberg@psi.ch
www.psi.ch/GaBE

Redaktion: Ruth Schmid

Verteilung und Subskription:
renate.zimmermann@psi.ch

Layout: Monika Blétry

Energiesystem-Analysen am PSI: Ziel der Energiesystem-Analysen am Paul Scherrer Institut, Villigen, ist eine umfassende und detaillierte Beurteilung heutiger und zukünftiger Energiesysteme. Betrachtet werden neben Technologien insbesondere gesundheitliche, ökologische und ökonomische Kriterien. Auf der Basis von Life Cycle Assessment (LCA), energiewirtschaftlichen Modellen, Risikoanalysen, Schadstoff-Ausbreitungsmodellen und schliesslich einer Multikriterien-Analyse ist es möglich, unterschiedliche Energieszenarien zu vergleichen, um Grundlagen für politische Entscheidungen zu schaffen.

Zusammenarbeiten mit:

ETH Zürich; EPF Lausanne; EMPA; Massachusetts Institute of Technology (MIT); University of Tokyo; Europäische Union (EU); International Energy Agency (IEA); Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD); Organisation der Vereinten Nationen (UNO)