Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 115 (2024)

Heft: 7

Artikel: Kommt die Atomkraft wieder? = Le nucléaire va-t-il faire son grand retour?

Autor: Deeg, Janosch

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1075111

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Kernkraftwerk Gösgen.

Bild: Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG

Kommt die Atomkraft wieder?

Entwicklungen und Herausforderungen | Die Schweiz möchte raus aus der Kernenergie, andere Länder wie Frankreich setzen vermehrt darauf – künftig auch mit Reaktoren der vierten Generation, die sicherer, sauberer und effizienter als bisherige Kraftwerkstypen sein sollen. Können moderne Atomreaktoren ein sinnvoller Teil eines klimaschonenden Energiemixes sein?

JANOSCH DEEG

Die metallisch grauen Kugeln messen sechs Zentimeter im Durchmesser. Dem Aussehen nach könnten sie auf einem französischen Boulefeld liegen. Doch weit gefehlt. Denn sie sind ein wesentlicher Bestandteil zweier moderner Kugelhaufenreaktoren, die Ende 2023 in China ihren kommerziellen Betrieb aufgenommen haben. Diese zählen zu den Kernreaktoren der vierten Generation, die vor allem die beiden schweren Anklagepunkte der Atomkraft entkräften sollen: Sicherheitsbedenken und radioaktiver Müll. Zudem sollen diese Reaktortypen effizienter als die bisherigen arbeiten und damit kostengünstiger sein. Nach Einschätzung mancher Fachleute könnten Kernkraftwerke der vierten Generation in etlichen Ländern mittel- bis langfristig (2030 bis 2050) eine wichtige Quelle für Grundlaststrom werden [1]. Einige der Konzepte sollen sogar dafür geeignet sein, die schwankende Einspeisung aus erneuerbaren Energien effizient auszugleichen [2].

Die Reaktoren in China zählen zu den sogenannten Hochtemperaturreaktoren, die deutlich höhere Betriebstemperaturen erreichen als traditionelle Siedereaktoren. Möglich wird dies durch ein gasförmiges Kühlmittel und hitzeresistente Werkstoffe aus Keramik. Der radioaktive Brennstoff ist in den tennisballgrossen Graphitku-

geln untergebracht – von denen jeder der beiden Reaktoren jeweils mehr als 400 000 Stück enthält. Die Kugeln halten Temperaturen bis zu 2500 °C stand und sind daher weitgehend vor einem ungewollten Schmelzen geschützt. Jedes einzelne Exemplar kann während seiner Lebensdauer so viel Energie freisetzen wie 1,5 t Kohle.

Für viele ist es vor allem diese unvorstellbar hohe Energiedichte, die die Kernkraft attraktiv macht: «Man braucht nur winzige Mengen an Brennstoff, um extrem viel Energie zu erzeugen», sagt zum Beispiel Annalisa Manera, Ingenieurin und Professorin für Nukleare Sicherheit und Mehrphasenströmungen am Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik der ETH Zürich. Spaltet man einen einzigen Urankern, wird mehr als eine Million Mal so viel Energie frei wie bei den chemischen Reaktionen einer Verbrennung von fossilen Rohstoffen. «Dies ist die höchste Energiedichte, die wir auf unserem Planeten haben», schwärmt Manera, die wegen ihrer Forschung zur Sicherheit von Kernreaktoren und für ihre Beiträge in der Öffentlichkeit zur Kernenergie Anfang 2023 als Mitglied in die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) gewählt wurde.

Hinzu kommt, dass beim Spalten von Atomkernen kein CO_2 freigesetzt wird, beim Verfeuern fossiler Energieträger hingegen sehr viel, was uns die Klimakrise eingebrockt hat. Es überrascht deshalb nicht, dass die Atomkraft weiterhin zahlreiche Anhänger hat: Etliche Länder, darunter China, Frankreich, Grossbritannien, Polen, Tschechien, USA und Japan wollen mit Hilfe neuer Kernreaktoren ihre Energieversorgung krisenfest und CO_2-neutral gestalten. Der Schweizer Bundesrat hat hingegen schon 2011 beschlossen, die bestehenden fünf Atommeiler stillzulegen [3], sobald sie die Sicherheitsanforderungen nicht mehr erfüllen. Neue Reaktoren dürfen nicht mehr gebaut werden [4]. 2016 bestätigte eine Volksabstimmung das entsprechende Gesetz, das schliesslich 2018 in Kraft trat [5]. In Deutschland sind die letzten drei Kernkraftwerke 2023 vom Netz gegangen [6]. «Mir kommt es manchmal so vor, als wäre der deutschsprachige Raum eine Anti-Atomkraft-Blase», urteilt Manera. Zahlreiche andere Länder – auch viele europäische – würden in eine gegensätzliche Richtung steuern und vermehrt auf Kernkraft setzen, so die Expertin.

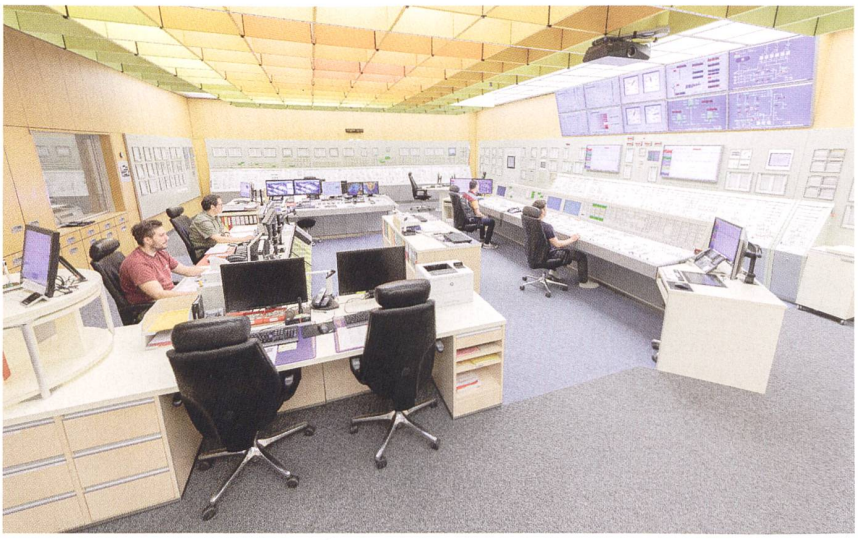
Dabei soll insbesondere eine neue Generation von Atomreaktoren eine wichtige Rolle spielen. «Als Kernreaktoren der vierten Generation bezeichnet man visionäre Konzepte, an die besondere Kriterien hinsichtlich Sicherheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit vom Generation IV International Forum GIF gestellt wurden», erklärt Thomas Schulenberg, Honorarprofessor am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und ehemaliger Leiter des Instituts für Kern- und Energietechnik am KIT. Er hat sich viele Jahre aktiv in diesem Forum engagiert und ein Fachbuch über die Reaktoren der vierten Generation geschrieben. Insgesamt sechs Reaktortechnologien hat das 2001 gegründete Forum als Kandidaten für Generation-IV-Reaktoren ausgewählt. «Diese beruhen auf Designs, die zum Teil bereits seit vielen Jahrzehnten entwickelt werden, aber noch nicht funktionsreif oder zumindest ökonomisch nicht konkurrenzfähig waren und oft noch sind», sagt Schulenberg.

Ein neues Kühlmittel

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der verschiedenen Reaktorkonzepte ist das Kühlmittel. Bei den traditionellen Varianten wird Wasser verwendet. Sie funktionieren wie folgt: Die bei der Kernspaltung entstehende Wärme lässt das Wasser verdampfen; der Wasserdampf treibt wiederum eine Turbine an, die über einen Generator Strom erzeugt. Ein Nachteil davon ist, dass das verdampfte Wasser selbst wieder abgekühlt werden muss, um den Reaktor erneut zu kühlen. Ein Stromausfall kann – zumindest bei älteren wassergekühlten Anlagen – dazu führen, dass der Reaktorkern immer heisser wird und es zu einer Kernschmelze wie in Fukushima kommt. Dabei schmelzen die Hüllrohre um die Brennelemente und setzen radioaktives Material frei.

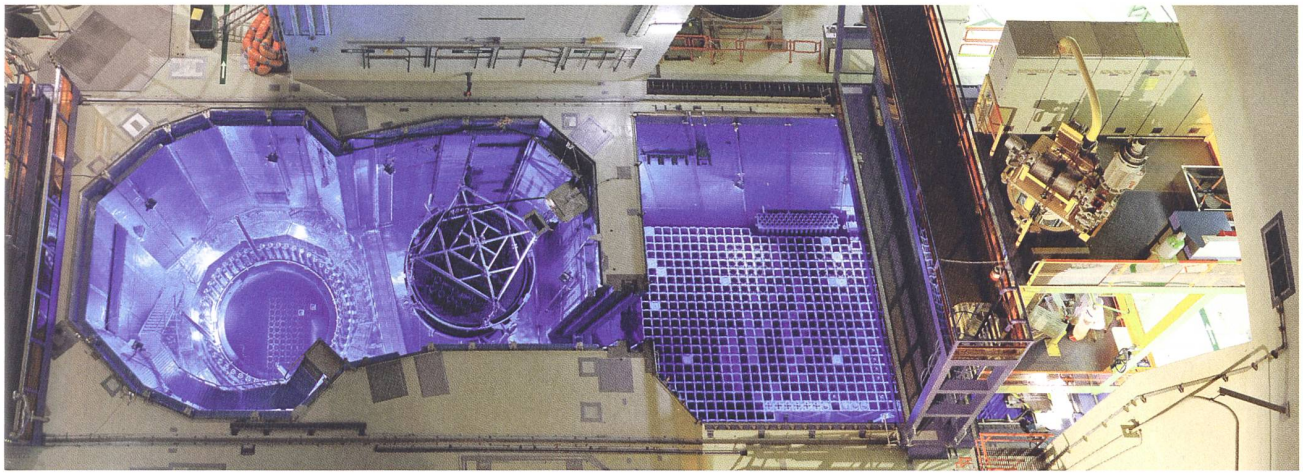
Verwendet man andere Kühlmittel, etwa flüssige Salze (Molten Salt Reactor, MSR) oder Metalle wie Natrium oder Blei (Lead-cooled Fast Reactor, LFR), die den Reaktor auch bei einem Stromausfall passiv weiterkühlen können, ist eine Kernschmelze im klassischen Sinne ausgeschlossen [7]. In den USA wurde schon in den 1950er- und 1960er-Jahren am Konzept der Flüssigsalzreaktoren gearbeitet [8]. Zwei schnelle natriumgekühlte Reaktoren (Sodium-cooled Fast Reactor, SFR) sind in Russland sogar am Netz, einer seit 1980, der andere seit 2015 [9]. China erforscht und entwickelt seit 2011 mehrere Flüssigsalz-Reaktorkonzepte für die kommerzielle Energiegewinnung. Das Land steht kurz davor, einen ersten Prototypen zu testen [10]. Laut chinesischen Forschern sind 99,99 % des Atommülls nach spätestens 300 Jahren in harmlose Elemente zerfallen. Die Technologie würde es sogar erlauben, existierenden Atommüll als Brennstoff zu nutzen [11].

Auch das Schweizer Paul-Scherrer-Institut, PSI, hat erst kürzlich einen Kooperationsvertrag mit dem däni-



Steuerzentrale des KKW Gösgen.

Bild: Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG



Blick in den Druckbehälter des KKW Gösgen. Das Kraftwerk deckt rund 13 % des Schweizer Stromverbrauchs ab.

Bild: Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG

schen Entwickler von Salzschmelzenreaktoren Copenhagen Atomics geschlossen, um Experimente mit Thorium-Flüssigsalz durchzuführen. Ziel sei es, «die Technologie zu validieren und den Kooperationspartnern wertvolle Erfahrungen bei der Planung, dem Bau, der Genehmigung, dem Betrieb und der Stilllegung der neuen Salzschmelzenreaktor-Technologie zu liefern», heisst es in einer Pressemitteilung vom Juni 2024 [12]. Und Russland wiederum hat vor drei Jahren mit dem Bau des weltweit ersten bleigekühlten Schnellen Reaktors – Brest OD-300 – begonnen, der 2026 zu Testzwecken in Betrieb gehen soll [13].

Bei Hochtemperaturreaktoren (Very High Temperature Reactor, VHTR), wie dem Kugelhaufenreaktor in China, soll eine Kernschmelze hingegen fast ausgeschlossen sein, weil die hitzebeständige Graphitbeschichtung der mit Uran gefüllten Kugeln verhindert, dass der Kernbrennstoff oder seine Spaltprodukte in den Reaktorraum austreten. Die USA, Grossbritannien und Deutschland haben an solchen Anlagen geforscht, Japan betreibt einen Testreaktor. Ob die Technik wirklich sicherer ist, wird allerdings bezweifelt: «Wenn es ein Leck gibt und Luft eindringt, entzündet sich das glühend heisse Graphit», erklärt Schulenberg. «Daher würde ich nicht sagen, dass es sicherer ist. Das wäre nur ein anderer Typ von Unfall – aber genauso verheerend.»

Daneben gibt es Reaktoren der Generation IV, die ähnlich aufgebaut sind wie Siedewasserreaktoren, aber mit überkritischem Wasser gekühlt werden (Supercritical-water-cooled Reactor – SCWR). «Der Druck darin ist so hoch, dass das Wasser nicht siedet und sich im sogenannten überkritischen Zustand befindet», erklärt Schulenberg, der in den 2000er-Jahren gemeinsam mit Studenten und Doktoranden an einem Konzept für einen solchen Reaktor gearbeitet hat. Weil das Wasser nicht verdampft, hat es eine höhere Dichte sowie höhere Temperatur und kann die Wärme besser aufnehmen, weshalb der Wirkungsgrad des Reaktors vergleichsweise gross ist. «Ausserdem besteht der Kraftwerkstyp aus weniger Komponenten, weshalb er preiswerter herstellbar sein sollte», sagt Schulenberg. Noch befindet sich die Entwicklung eines solchen Reaktortyps in einem frühen Stadium. «Unsere Forschung war damals in dem Sinne erfolgreich, als dass viele Studenten im Anschluss in die Kernenergietechnik gegangen sind», erinnert sich Schulenberg. Zu jener Zeit gab es in Deutschland noch einen grossen Bedarf an Nachwuchskräften für die Entwicklung der Atomkraft. Heute dagegen gehört Schulenberg in seiner Heimat zu einer «aussterbenden Spezies». In der Schweiz gebe es inzwischen mehr Atomkraftexpertise, glaubt er.

Schwammige Begriffsdefinition

Weil die Idee von schnellen natriumgekühlten Reaktoren der Generation IV bereits in den 1970er-Jahren aufkam und mehrere Anlagen bereits gebaut wurden, hält Manera die Klassifizierung der AKWs für «ziemlich schwammig»: «Das GIF wurde zwar erst im Jahr 2001 gegründet, das Konzept und die Ideen hinter manchen Generation-IV-Reaktoren reichen jedoch viel weiter zurück», sagt sie. «Schon vor mindestens 60 Jahren hat man nach Wegen gesucht, um die Effizienz der Brennstoffnutzung zu verbessern.» Daher gebe es viele Missverständnisse darüber, was diese «neue» Generation an Reaktoren überhaupt ist, vermutet sie.

Seit der Begriffsdefinition um die Jahrtausendwende haben sich auch die traditionellen Konzepte weiterentwickelt. «Bei den wassergekühlten Reaktortypen haben wir ein Sicherheitsniveau erreicht, das wirklich schwer zu schlagen ist», sagt Manera. Laut statistischen Risikoabschätzungen komme es innerhalb von zehn Millionen Jahren oder sogar einer Milliarde Jahre nur noch zu einem einzigen kritischen Zwischenfall. «Aus der Ingenieursperspektive ist die Unfallwahrscheinlichkeit praktisch bei Null», sagt sie. Passive Sicherheitssysteme sorgen etwa dafür, dass eine Kernschmelze ausgeschlossen ist. «Die Art der Kühlflüssigkeit ist also kein ausschlaggebender Sicherheitsfaktor, es kommt auf das Design des Reaktors an.» Daher seien die Reaktoren der Generation IV laut Manera wegen Folgendem attraktiv: «Einige können sehr hohe Temperaturen erreichen, mit denen man eine ganze Reihe von industriellen Prozessen betreiben könnte. Und eine Untergruppe nutzt schnelle Neutronen, mit denen sich Material, das eigentlich kein Brennstoff ist, in Brennstoff umwandeln lässt. So erhält man viel mehr Energie bei deutlich weniger Abfall.» Hinzu kommt, dass sich bestehender Atommüll mit manchen Reaktoren der vierten Generation recyceln lässt.

«95 % von dem, was wir heute als Atommüll bezeichnen, könnte immer noch als Brennstoff dienen», sagt Manera.

Solche Argumente überzeugen offenbar. Gemeinsam mit dem Wirtschaftsdachverband Economiesuisse forderten etwa SVP- und FDP-nahe Kreise im Sommer 2024 mit der Initiative «Blackout stoppen» den Ausstieg aus der Kernkraft rückgängig zu machen [14]. Der Schweizer Umwelt- und Energieminister Albert Rösti beantragte daraufhin im Bundesrat formell, das bestehende AKW-Neubauverbot aus dem Gesetz zu streichen.

Die ökonomische Perspektive

Der Hauptkritikpunkt an der Kernenergie ist, dass sie schlicht zu teuer sei. «Bei Atomkraftwerken sind über viele Jahrzehnte die Kosten nicht zurückgegangen, weil die Technologie sehr komplex ist», sagt der Ökonom Jonas Savelsberg von der ETH Zürich, der sich schon lange mit Energiesystemen aus der Wirtschaftsperspektive auseinandersetzt und den Strommarkt modelliert. Daran würden auch die Reaktoren der vierten Generation nichts ändern. Auf der anderen Seite gebe es alternative Technologien, die man in sehr grossen Mengen standardisiert produzieren könne: «Solar- und Windenergie wurden über die letzten Jahre erheblich günstiger.»

Seine Aussagen werden unter anderem durch die Berechnungen der US-Investmentbank Lazard und der Unternehmensberatung Roland Berger bestätigt. Die Unternehmen nutzten dazu die Levelized Costs Of Energy (LCOE) – eine Kennzahl für die Kosten der Energieproduktion. Die LCOE ist so etwas wie der durchschnittliche Mindestpreis, zu dem die von der Anlage erzeugte Elektrizität verkauft werden muss, um die gesamten Produktionskosten während der Lebensdauer zu decken. In den letzten Jahren ist der LCOE für Atomstrom laut Lazard um fast 50 % gestiegen; in der gleichen Zeit fiel er für Solar um mehr als 80 und für Wind um 65 % [15]. Demnach liegt der LCOE für Atomstrom bei etwa 18 US-Cent, bei Solarenergie und Windkraft um die 5 US-Cent pro Kilowattstunde.

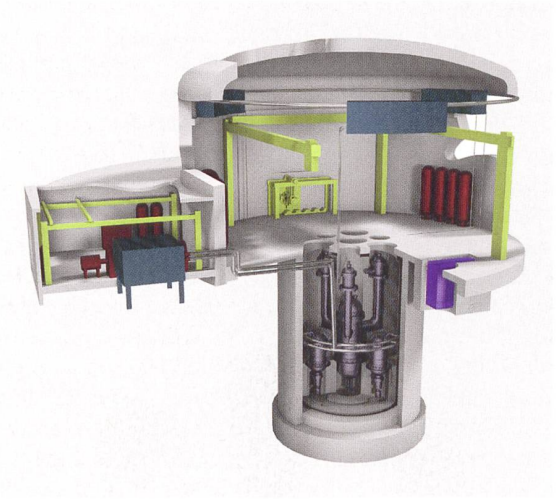
Das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg, Deutschland, kommt für die LCOE der Atomkraft sogar auf Werte von bis zu 50 Eurocent pro Kilowattstunde [16]. Windkraft und PV-Anlagen lägen dagegen zwischen 4 und 15 Eurocent. Hinzu kommt, dass der LCOE-Wert langfristige Kosten wie die Endlagerung von Atommüll nicht berücksichtigt. Damit wäre die Kernkraft die teuerste Art der Stromerzeugung.

Da Lazard eine Investmentfirma ist, die in erneuerbare Energien investiert, und das ISE an Solarenergie forscht, sehen Kritiker hier allerdings keine unabhängige Auseinandersetzung mit der Thematik. «Es wurden unrealistische Worst-Case-Annahmen für die Kernenergie zugrunde gelegt», so beispielsweise der Vorwurf von Manera. Das PSI ermittelte etwa in einem Report für das Bundesamt für Energie aus dem Jahr 2017 den LCOE-Wert auf 5 bis 12,5 Rp./kWh [17]. Im ungünstigsten, aber sehr unwahrscheinlichen Fall könnte der Wert auf 27,5 Rp./kWh steigen.

Der Report gehe jedoch von niedrigen Investitionskosten und von einem Grundlastbetrieb aus, der in Zukunft immer unwahrscheinlicher werde, bemängelt Savelsberg wiederum. «Auf europäischer Ebene bewegen wir uns hin zu einem Stromsystem, in dem der grösste Teil mit Wind, Sonne und Wasserkraft gedeckt werden wird», sagt er. «Nun müssen wir uns die Frage stellen, wie sich der Rest vernünftig erzeugen lässt.» Technisch braucht es dazu eine Methode, die flexibel hochgefahren werden kann, sobald die Nachfrage das Angebot an erneuerbaren Energien übersteigt. «Es ist ein Missverständnis, dass die Kernenergie das nicht leisten kann», sagt Manera. «In Frankreich wird das die ganze Zeit praktiziert.» Aus wirtschaftlicher Sicht sei es allerdings nicht sinnvoll, einen Kernreaktor nur zeitweise mit voller Leistung zu betreiben, räumt sie ein. Und genau das ist für Savelsberg das grundlegende Problem: «Wenn man auf Kernenergie als komplementäre Technologie zu den erneuerbaren Energien setzt, wird eine einzelne Stromeinheit sehr teuer. Denn die abzuschreibenden Investitions- und die Betriebskosten der Reaktoren bleiben gleich, unabhängig davon, ob sie gerade Strom produzieren oder nicht.» Die ohnehin schon teure Energie eines AKWs wird also noch teurer. Das bestätigt auch Schulenberg: «Wenn man jede einzelne Kilowattstunde von Wind und Sonne nutzen will, dann macht ein Kernkraftwerk ökonomisch keinen Sinn, die Fixkosten sind viel zu hoch.»

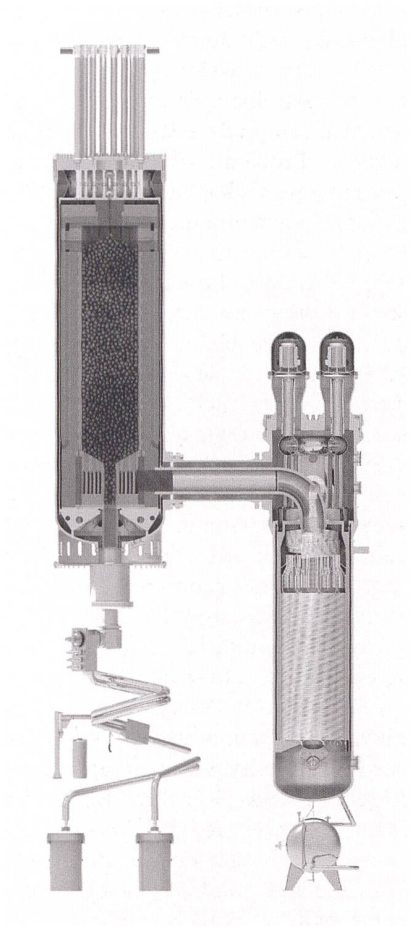
Und diese hohen Kosten beginnen schon beim Bau: In seinem Buch «How Big Things Get Done» kommt Bent Flyvbjerg, Ökonom und Professor an der IT University of Copenhagen, zum Ergebnis, dass Kernkraftwerke im Schnitt 120 % teurer werden als geplant. End- oder Zwischenlagerung kosten sogar rund 240 % mehr, als ursprünglich kalkuliert wurde [18]. Ein aktuelles Beispiel lässt sich in Polen verfolgen: Das Land wollte 2033 seinen ersten Reaktor fertigstellen, was inzwischen auf 2040 verschoben wurde bei 14 Jahren Bauzeit und hohen Kosten, wie das Magazin «Focus» berichtet [19].

Das Kernkraftwerk Hinkley Point C im englischen Somerset sollte bei Baubeginn 2016 rund 21 Mia. Euro kosten, mittlerweile geht man von rund 40 Mia. aus [20]. Und statt 2025 wird



Mit dem gasgekühlten schnellen Hochtemperaturreaktor Allegro werden Reaktorkonzepte der Generation IV demonstriert, aber kein Strom erzeugt.

Bild: VUJE



Xe-100, ein kommerzieller gasgekühlter Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktor, der 2027 in den USA in Betrieb gehen soll.

Bild: X-Energy

der erste von insgesamt zwei Reaktoren frühestens 2031 ans Netz gehen [21]. Allerdings werden die beiden Einheiten des Hinkley Point C voraussichtlich so viel Strom erzeugen wie alle Schweizer Kernkraftwerke zusammen. «Will man die gleiche Menge mit Alpensolar produzieren, würden die Anlagen mehr als 50 Milliarden Schweizer Franken kosten», ordnet Manera ein. Gleichwohl zählt diese Methode zu einer der teuersten erneuerbaren Stromquellen.

Zur Wahrheit gehört auch, dass die Bauzeiten stark variieren: China, Japan oder Südkorea stellten zum Beispiel ihre jüngeren Reaktoren oft innerhalb von fünf bis sieben Jahren fertig [22]. Laut Statista liegt der Median für den Bau eines Kernreaktors in den Jahren 2020 bis 2022 bei etwas mehr als sieben Jahren [23]. Besonders China sticht heraus. Obwohl das Land erst im Jahr 1981 sein erstes Atomkraftwerk genehmigt hat, sind heute schon 57 Reaktoren in Betrieb und 30 weitere werden gebaut. So hat das chinesische Atomprogramm in den letzten Jahrzehnten einen hohen Grad an Standardisierung erreicht, von dem andere Länder nur träumen können. Die gebauten Reaktortypen sind oft einheitlich, zugehörige Lieferketten etabliert und erfahrene Arbeitskräfte vorhanden. Zudem garantieren staatliche Banken die Finanzierung. «Neue Atomkraftwerke werden eigentlich nur gebaut, wenn der Staat sie finanziert», sagt Savelsberg. Für private Investoren ist das Risiko zu hoch, weil sowohl Investitionssumme als auch Bauzeit in der Regel ungewiss sind.

Manera ist jedoch optimistisch, dass sich eine Standardisierung sowie höhere Effizienz in der Produktion über die gesamte Branche hinweg durchsetzen könnte und der Bau neuer Kraftwerke auch in Europa künftig wieder schneller geht. «Man entwickelt ausserdem kleine modulare Reaktoren und sogar Mikroreaktoren, die zu grossen Teilen in Fabriken gefertigt werden. Das macht die Herstellung viel kosteneffizienter.» Solche Anlagen könnten etwa Energie für ein grosses Unternehmen liefern, das viel Strom oder Wärme benötigt und nicht von den Preisschwankungen im Netz abhängig sein will, denkt sie.

Noch sei der Strom eines «Small Modular Reactors», SMR, aber teurer als der der grossen, sagt Schulenberg. «Ich denke nicht, dass sich das bald ändert.» Manche, wie etwa die Firma NuScale Power, mussten bereits geplante SMRs wegen explodierender Kosten wieder einstellen [24]. Andere glauben weiterhin an die Technologie – zum Beispiel das Unternehmen Rolls-Royce, das an einem SMR arbeitet [25]: «Jedes fabrikgefertigte Kernkraftwerk wird genügend bezahlbaren, kohlenstoffarmen Strom liefern, um eine Million Haushalte mehr als 60 Jahre lang zu versorgen», heisst es in einer Pressemitteilung der Firma aus dem Jahr 2024 [26].

«Nicht jedes Land ist an grossen Anlagen interessiert», sagt Manera. Es gebe bereits mehrere europäische Länder, die den Kauf von SMRs in Betracht ziehen – darunter Polen, Rumänien und Grossbritannien. «Bei uns in Europa sehe ich hierfür keinen Markt», urteilt Schulenberg hingegen. «Sinnvoll könnten die SMRs für sogenannte Inselnetze sein, wo man die Leistung von grossen Atomkraftwerken gar nicht losbekommen würde», sagt er. Solche Netzinfrastrukturen gibt es etwa in Kanada, Alaska oder Sibirien. Eine Idee für die ferne Zukunft ist auch, solche Minikraftwerke im All zu nutzen. Die US-amerikanische Raumfahrtbehörde Nasa hat gemeinsam mit dem Los Alamos National Laboratory bereits einen Demonstrationsreaktor mit dem Kürzel Krusty entwickelt [27]. China und Russland entwickeln ebenfalls ein Modell, das auf einer Forschungsstation auf dem Mond zum Einsatz kommen könnte [28].

Wie entwickelt sich die Energieversorgung?

Doch zurück zur Erde: Kann die Atomkraft in Zukunft ein sinnvoller Teil eines kohlenstoffarmen Energiemixes sein? Schulenberg und Manera sind davon überzeugt. Für Schulenberg etwa ist die angestrebte Struktur der Energieversorgung eine rein politische Entscheidung: «Frankreich sagt: Wir setzen bei unserer Grundstromversorgung im Wesentlichen auf Kernenergie und produzieren nebenbei Solar- und Windenergie.» Das sei einfach ein anderes Konzept. Er denkt sogar, dass Frankreich auf Dauer billiger Strom produzieren werde als Deutschland. Denn Flauten ohne Wind und Sonne müssen mit alternativen Technologien überbrückt werden, beispielsweise mit Speichertechnologien wie Batterien und Wasserstoff oder Gas- oder Ölkraftwerken mit CCS, also der Abscheidung und Speicherung des entstehenden CO_2-Gases.

Viele dieser Ansätze seien nicht effizient, noch nicht einsatzfähig oder würden ebenfalls hohe Kosten verursachen, sagt Manera. Sie findet das Verhalten von Deutschland daher «heuchlerisch»: «Man will keine Kernenergie mehr, aber dann importiert man Atomstrom aus Frankreich. Das macht wenig Sinn.» Sie ist der Meinung, dass Kernenergie auf dem Weg zur CO_2-Neutralität unverzichtbar ist und in vielen Ländern die energetische Grundversorgung in Zukunft gewährleisten wird. Zu diesem Schluss kommt auch ein Grundlagenpapier, das Manera kürzlich zusammen mit anderen führenden Schweizer Kernkraftforschern im Auftrag des Bundes verfasst hat. Gemäss dem Bericht ist

die Kernkraft ausserdem nicht zwangsläufig teurer als andere Energiequellen, so lange man sie sinnvoll in das Stromversorgungssystem integriert [29].

Savelsberg sieht das anders: «Wir werden in Europa künftig einen Grossteil des Jahres die komplette Last mit den Erneuerbaren decken können.» Manchmal gibt es schon jetzt zu viel Strom. «Unter solchen Bedingungen lohnt sich ein Atomkraftwerk nicht mehr, weil seine Grundlast dann gar keinen Wert mehr hat», erklärt Savelsberg. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt eine Studie der ETH Zürich, die die Rolle der Kernenergie für das Schweizer Stromsystem bewertet. Eines der Resultate war, dass bei den derzeitigen Investitionskosten für Atomkraftwerke in Europa der Bau einer neuen Anlage zu wesentlich höheren Kosten führt als das Szenario ohne neue Kernkraftwerke. Allerdings kommt die Studie auch zum Schluss, dass ein längerer Betrieb der bestehenden Kernkraftwerke im Winter die Stromimporte reduzieren würde. Das könnte die Gesamtkosten der Stromversorgung senken und den Anstieg der Strompreise abschwächen, so das Fazit der Autoren [30].

Manera bemängelt unter anderem, dass dem Nuklearszenario ein sehr grosser Unsicherheitsfaktor hinzugefügt wurde – nur deshalb sei es kostspieliger geworden. Sie stützt ihre Meinung auf eine 2022 veröffentlichte OECD-Studie der Nuclear Energy Agency für die Schweiz [31]. Diese kommt zum Ergebnis, dass der Strom billiger wäre, wenn neue Kernkraftwerke gebaut würden. Allerdings resultiert diese Situation wiederum vor allem aus Gewinnen aus Stromexporten, «die lediglich zustande kommen, weil für die Nachbarländer historische Strompreise angenommen wurden», so Savelsberg. Würde man auch dort sinkende Kosten voraussetzen, fielen die Gewinne grösstenteils weg. Es zeigt sich also, dass die Ergebnisse völlig unterschiedlich ausfallen können, je nachdem welche Annahmen getroffen werden.

Ungeachtet der Kontroverse um die Kernenergie befindet sich die Schweiz bereits heute in einer komfortablen Situation, was die Versorgungssicherheit mit Strom betrifft. Ein erheblicher Teil des Bedarfs an elektrischer Energie wird durch die wenig schwankungsanfällige Wasserkraft gedeckt. Zudem gibt es Pumpspeicherkraftwerke für überschüssigen Strom, die diesen bei Bedarf wieder zur Verfügung stellen können. «Hierzulande ist die Lösung für die Energiewende also längst da», resümiert Savelsberg. In Deutschland hingegen setzt man übergangsweise auf Erdgaskraftwerke. «Wie es allerdings weitergehen soll, wenn man kein Gas mehr verbrennen möchte, ist noch völlig unklar», bemängelt Schulenberg. Die deutsche Politik möchte bei nicht vermeidbaren Emissionen mit CCS arbeiten, um das ausgestossene CO_2 abzufangen und zu speichern [32]. Zudem soll ein umfangreicher Netzausbau die Stromversorgung gewährleisten.

Die Idee dahinter erklärt Savelsberg: «Der grosse Vorteil in Europa gegenüber anderen Regionen ist, dass es ein gemeinsames Netz gibt, in dem sich Strom untereinander handeln lässt.» In einem so grossflächigen Verbundsystem gleichen sich Angebot und Nachfrage im Mittel aus, so die Annahme. Irgendwo in Europa gibt es immer so viel Wind, Sonne und Wasserkraft, dass es meistens für alle reicht. Und wenn nicht, gibt es Backup-Technologien wie Batterien und Gaskraftwerke mit CCS. Da aber einige Nationen weiterhin auf die Kernkraft setzen, wird auch diese Technologie in Zukunft Teil der europäischen Stromversorgung bleiben. «Natürlich muss nicht jedes Land in Europa Kernenergie haben», findet Schulenberg. Viel wichtiger sei es, dass man gemeinsam vernünftige Lösungen findet. Damit sind auch Manera und Savelsberg einverstanden.

Referenzen

[1] www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421513006083?via%3Dihub
[2] arxiv.org/pdf/2302.14515
[3] www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/abstimmung-zum-energiegesetz/kernenergie.html
[4] www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/atomausstiegsinitiative.html
[5] www.zeit.de/wirtschaft/2017-05/schweiz-volksabstimmung-atomausstieg-energiewende
[6] www.bmuv.de/media/atomkraftwerke-in-deutschland-abschaltung-der-noch-betriebenen-reaktoren-gemaess-atomgesetz-atg
[7] www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687850713000101
[8] energyfromthorium.com/pdf/NAT_MSREexperience.pdf
[9] en.wikipedia.org/wiki/Sodium-cooled_fast_reactor#Reactors
[10] www.mdr.de/wissen/china-startet-ersten-thorium-fluessigsalz-reaktor-atomkraft-100.html
[11] edison.media/energie/ist-der-fluessigsalzreaktor-das-perfekte-kraftwerk/25223783
[12] www.psi.ch/de/news/medienmitteilungen/zusammenarbeit-in-der-reaktorforschung
[13] www.nuklearforum.ch/de/news/russland-baubeginn-fuer-bleigekuehlten-schnellen-reaktor
[14] www.tagesanzeiger.ch/akw-neubau-schweiz-roesti-will-verbot-kippen-198816516068
[15] www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf
[16] www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html
[17] www.psi.ch/sites/default/files/import/ta/PublicationTab/Final-Report-BFE-Project.pdf
[18] www.n-tv.de/wirtschaft/Warum-China-AKWs-bauen-kann-und-wir-nicht-article25171647.html
[19] www.focus.de/earth/analyse/kurs-verschlingt-milliarden-ein-ungeloestes-problem-gefaehrdet-polens-riskante-atomkraft-plaene_id_260254192.html
[20] www.edf.fr/en/the-edf-group/dedicated-sections/journalists/all-press-releases/hinkley-point-c-update-1
[21] www.zdf.de/nachrichten/politik/ausland/atomkraftwerk-atomenergie-grossbritannien-bau-100.html
[22] thebreakthrough.org/issues/energy/chinas-impressive-rate-of-nuclear-construction#:~:text=The%20Chinese%20nuclear%20project%20construction,to%20just%20over%207%20years.
[23] www.statista.com/statistics/712841/median-construction-time-for-reactors-since-1981
[24] www.theguardian.com/australia-news/2023/nov/09/small-modular-nuclear-reactor-that-was-hailed-by-coalition-as-future-cancelled-due-to-rising-costs
[25] www.rolls-royce-smr.com
[26] www.rolls-royce-smr.com/press/rolls-royce-smr-presses-home-advantage-as-it-moves-into-final-step-of-uk-regulatory-assessment
[27] www.nasa.gov/tdm/fission-surface-power
[28] www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/russland-entwickelt-atomkraft-fuer-den-mond-a-ad047003-9e89-45fb-9cd6-9795006c021d
[29] www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZW4vcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTE4Mzg=.html
[30] nexus-e.org/role-of-nuclear-power
[31] www.oecd.org/en/publications/achieving-net-zero-carbon-emissions-in-switzerland-in-2050_ac21f8be-en.html
[32] www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/05/20240529-entscheidung-ccs-industrie-deutschland.html

Autor

Dr. **Janosch Deeg** ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist.
→ Deschawi.de, DE-69221 Dossenheim
→ deeg@deschawi.de

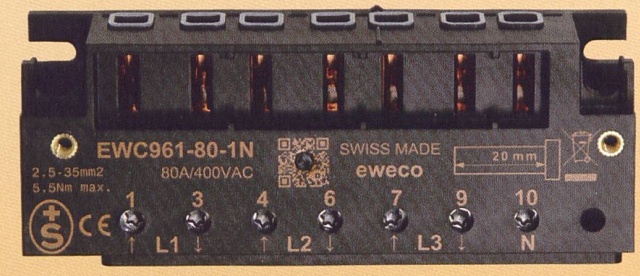
SIEMENS

Transparenz und Innovation für Ihr Verteilnetz

Maximieren Sie die Effizienz Ihres Verteilnetzes mit Electrification X, SICAM EGS (Enhanced Grid Sensor) und der intelligenten SENTRON NH-Sicherung 3NA COM! Unsere innovative Lösung bietet Ihnen eine einfache und kosteneffiziente Digitalisierung Ihrer Ortsnetz- und Verteilstationen. Profitieren Sie von Echtzeitüberwachung, präzisen Messdaten und einer nahtlosen Integration in Ihre bestehende Infrastruktur. Erleben Sie die Zukunft der Energieversorgung – sicher, transparent und effizient. Reduzieren Sie Ausfallzeiten und Wartungskosten durch frühzeitige Fehlererkennung und optimale Netzüberwachung.

siemens.ch/smartinfrastructure

Zählersteckklemme 80 A



Youtube

- Zählerwechsel ohne Stromunterbruch
- Schneller Wechsel - unter einer Minute
- Maximale Arbeitssicherheit
- Amortisiert nach dem ersten Wechsel

www.ewecoklemmen.ch

eweco

La centrale nucléaire de Gösgen.

Le nucléaire va-t-il faire son grand retour ?

Développements et défis | La Suisse souhaite s'affranchir de l'énergie nucléaire, alors que d'autres pays tels que la France misent de plus en plus sur cette technologie – à l'avenir aussi avec des réacteurs de quatrième génération censés être plus sûrs, plus propres et plus efficaces que les centrales actuelles. Ces réacteurs peuvent-ils constituer un élément judicieux d'un mix énergétique respectueux du climat ?

JANOSCH DEEG

Les boules gris métallique mesurent six centimètres de diamètre. D'après leur apparence, elles pourraient se trouver sur un terrain de pétanque français. Mais c'est loin d'être le cas. Elles font partie intégrante des deux réacteurs à lit de boulets modernes qui ont été mis en service commercial en Chine fin 2023. Ceux-ci appartiennent aux réacteurs nucléaires de quatrième génération, qui doivent avant tout permettre de répondre aux deux graves chefs d'accusation portés contre l'énergie nucléaire : les problèmes en matière de sécurité et les déchets radioactifs. Ces types de réacteurs sont aussi censés fonctionner plus efficacement que les précédents, et donc être moins onéreux. Selon certains spécialistes, les centrales nucléaires de quatrième génération pourraient devenir une source importante de production d'électricité en ruban dans plusieurs pays à moyen ou à long terme (2030 à 2050) [1]. Certains concepts seraient même en mesure de compenser efficacement les fluctuations de l'injection issue des énergies renouvelables [2].

Les deux réacteurs en service en Chine font partie des réacteurs dits à haute température, qui atteignent des températures de fonctionnement nette-

Figure : Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG

ment plus élevées que les réacteurs à eau bouillante traditionnels. Ceci est rendu possible grâce à l'utilisation d'un moyen de refroidissement sous forme gazeuse et de matériaux céramiques résistants à la chaleur. Le combustible radioactif est logé dans des boules de graphite de la taille d'une balle de tennis – dont chacun des deux réacteurs contient plus de 400 000 unités. Ces boulets résistent à des températures allant jusqu'à 2500 °C et sont donc largement protégés contre une fusion involontaire. Chacun d'eux peut libérer autant d'énergie que 1,5 t de charbon au cours de sa durée de vie.

Pour beaucoup, c'est surtout cette densité énergétique extrêmement élevée qui rend l'énergie nucléaire attrayante: « Il suffit de quantités infimes de combustible pour produire une énorme quantité d'énergie », explique par exemple Annalisa Manera, ingénieure et professeure de sécurité nucléaire et d'écoulements multiphasiques au sein du département de génie mécanique et de génie des procédés de l'ETH Zurich. La fission d'un seul noyau d'uranium libère plus d'un million de fois plus d'énergie que les réactions chimiques intervenant lors de la combustion de matières premières fossiles. « C'est la densité énergétique la plus élevée que nous ayons sur notre planète », s'enthousiasme Annalisa Manera, qui a été élue membre de l'Académie suisse des sciences techniques (SATW) début 2023 en raison de ses recherches sur la sécurité des réacteurs nucléaires et de ses contributions relatives à l'énergie nucléaire auprès du public.

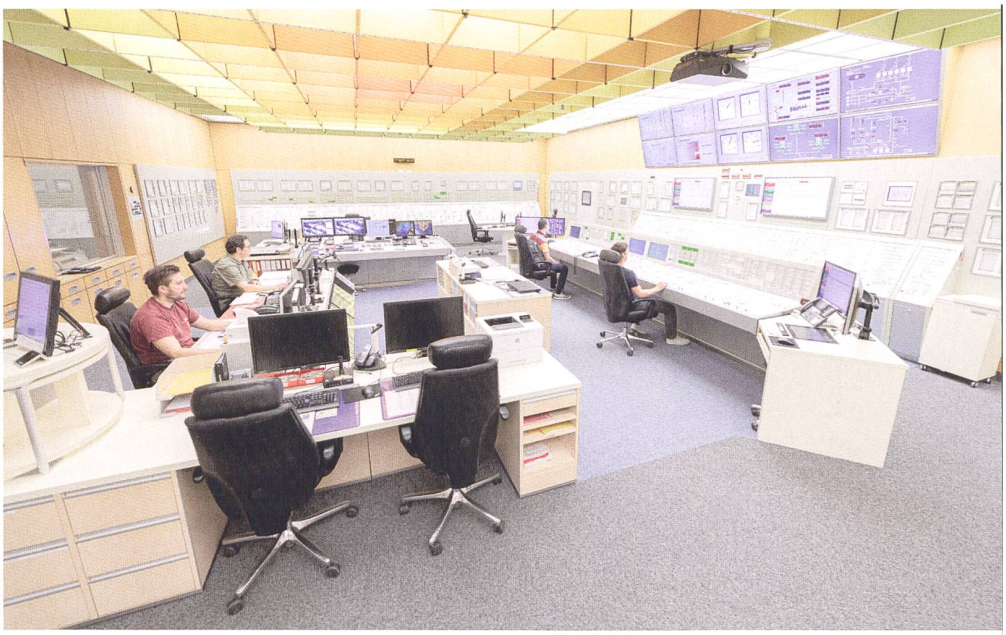
À cela s'ajoute le fait que la fission des noyaux atomiques ne libère pas de CO_2, alors que la combustion d'énergies fossiles en émet beaucoup, ce qui nous a menés à la crise climatique actuelle. Il n'est donc pas surprenant que l'énergie nucléaire continue à avoir beaucoup de partisans: de nombreux pays, dont la Chine, la France, la Grande-Bretagne, la Pologne, la République tchèque, les États-Unis et le Japon, comptent utiliser de nouveaux réacteurs nucléaires pour mettre en place un approvisionnement énergétique neutre en CO_2 et résistant aux crises. En Suisse, en revanche, le Conseil fédéral a décidé dès 2011 d'arrêter les cinq centrales nucléaires existantes [3] dès qu'elles ne répondront plus aux exigences de sécurité. Et il n'est plus permis de construire de nouveaux réacteurs [4]. En 2016, une votation populaire a confirmé la loi correspondante, qui est finalement entrée en vigueur en 2018 [5]. En Allemagne, les trois dernières centrales nucléaires ont été déconnectées du réseau en 2023 [6]. « L'espace germanophone me semble parfois être une bulle antinucléaire », juge Annalisa Manera. Selon elle, de nombreux autres pays – aussi européens – vont dans la direction opposée et misent de plus en plus sur l'énergie nucléaire.

Une nouvelle génération de réacteurs devrait notamment jouer un rôle important. « On appelle réacteurs nucléaires de quatrième génération des concepts visionnaires auxquels des critères particuliers en matière de sécurité, de durabilité et de rentabilité ont été imposés par le Forum international Génération IV », explique Thomas Schulenberg, professeur honoraire à l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT) et ancien directeur de l'Institut de technologie nucléaire et énergétique du KIT. Il a participé activement à ce forum – aussi appelé Generation IV International Forum ou GIF – pendant de nombreuses années et a écrit un ouvrage de référence sur les réacteurs de quatrième génération. Fondé en 2001, le GIF a sélectionné au total six technologies de réacteurs en tant que candidates pour les réacteurs de génération IV. « Ces technologies reposent sur des concepts dont certains sont en cours de développement depuis de nombreuses décennies, mais qui n'étaient pas encore prêts à fonctionner ou pas encore compétitifs sur le plan économique – et qui ne le sont souvent pas encore », explique-t-il.

Un nouveau moyen de refroidissement

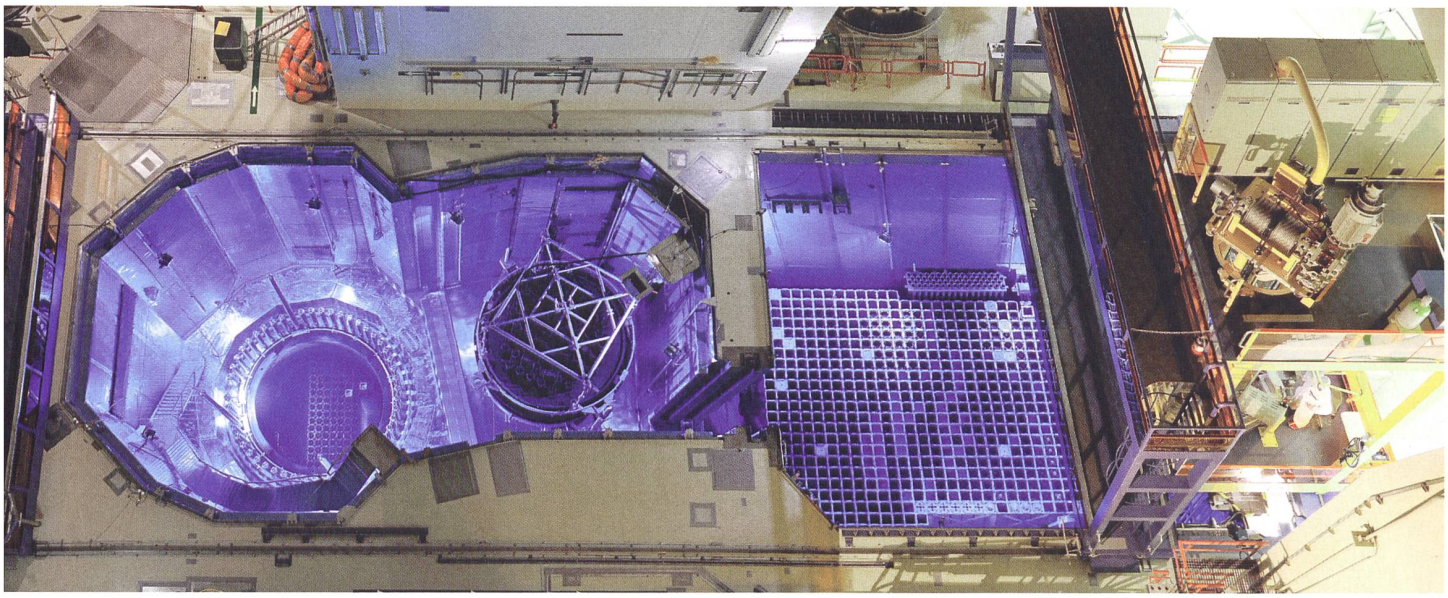
Une caractéristique essentielle distingue les différents concepts de réacteurs: le moyen de refroidissement. Les variantes traditionnelles utilisent de l'eau. Elles fonctionnent de la manière suivante: la chaleur produite par la fission nucléaire mène à l'évaporation de l'eau; la vapeur d'eau entraîne à son tour une turbine qui produit de l'électricité via un générateur. L'un des inconvénients est que l'eau évaporée doit elle-même être refroidie pour pouvoir à nouveau refroidir le réacteur. Une panne de courant peut – du moins dans les anciennes centrales refroidies à l'eau – entraîner une augmentation continue de la température du cœur du réacteur et provoquer sa fusion, comme cela a été le cas à Fukushima. Les gaines entourant les éléments combustibles fondent alors, et libèrent des matières radioactives.

Si l'on utilise d'autres moyens de refroidissement, par exemple des sels fondus (Molten Salt Reactor, MSR) ou des métaux tels que le sodium ou le plomb (Lead-cooled Fast Reactor, LFR), qui peuvent continuer à refroidir passivement le réacteur même en cas



Salle de commande de la centrale nucléaire de Gösgen.

Figure: Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG



Cuve de pression de la centrale nucléaire de Gösgen. Cette dernière couvre environ 13 % de la consommation suisse d'électricité.

Figure: Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG

de panne de courant, une fusion du cœur au sens classique du terme est exclue [7]. Aux États-Unis, des chercheurs ont déjà travaillé dans les années 1950 et 1960 à la conception de réacteurs à sels fondus [8]. Deux réacteurs rapides refroidis au sodium (Sodium-cooled Fast Reactor, SFR) sont même en service en Russie, l'un depuis 1980, l'autre depuis 2015 [9]. La Chine, quant à elle, étudie et développe depuis 2011 plusieurs concepts de réacteurs à sels fondus pour la production commerciale d'énergie. Elle est sur le point de tester un premier prototype [10]. Selon les chercheurs chinois, 99,99 % des déchets nucléaires se seront désintégrés en éléments inoffensifs au bout de 300 ans au plus tard. Cette technologie permettrait même d'utiliser les déchets nucléaires existants comme combustible [11].

Du côté de la Suisse, l'Institut Paul Scherrer (PSI) a lui aussi conclu tout récemment un contrat de coopération avec le développeur danois de réacteurs à sels fondus Copenhagen Atomics, afin de réaliser des expériences avec des sels fondus au thorium. L'objectif consiste à « valider la technologie et à fournir aux partenaires de la coopération une expérience précieuse pour la planification, la construction, l'autorisation, l'exploitation et le démantèlement de la nouvelle technologie de réacteurs à sels fondus », peut-on lire dans un communiqué de presse de juin 2024 [12]. Et la Russie, pour sa part, a lancé il y a trois ans la construction du premier réacteur rapide refroidi au plomb au monde – Brest OD-300 –, qui devrait être mis en service en 2026 à des fins d'essai [13].

Dans les réacteurs à très haute température (Very High Temperature Reactor, VHTR) tels que les réacteurs à lit de boulets en Chine, une fusion du cœur est en revanche censée être quasiment exclue, car le revêtement en graphite résistant à la chaleur des boulets remplis d'uranium empêche le combustible nucléaire, ou ses produits de fission, de s'échapper dans la chambre du réacteur. Les États-Unis, la Grande-Bretagne et l'Allemagne ont mené des recherches sur de telles installations, et le Japon exploite un réacteur d'essais. Certains doutent toutefois que cette technologie soit vraiment plus sûre : « S'il y a une fuite et que de l'air s'infiltre, le graphite incandescent s'enflamme », explique Thomas Schulenberg. « Je ne dirais donc pas que c'est plus sûr. Ce serait juste un autre type d'accident – mais tout aussi dévastateur. »

Parallèlement, il existe des réacteurs de génération IV dont la structure est similaire à celle des réacteurs à eau bouillante, mais qui sont refroidis à l'eau supercritique (Supercritical Water Reactor, SCWR). « La pression à l'intérieur est si élevée que l'eau ne bout pas et se trouve dans un état dit supercritique », explique Thomas Schulenberg, qui a travaillé dans les années 2000 avec des étudiants et des doctorants à un concept pour un tel réacteur. Comme l'eau ne s'évapore pas, elle a une densité et une température plus élevées et peut mieux absorber la chaleur, ce qui explique le rendement plus élevé du réacteur. « De plus, ce type de centrale comporte moins de composants et devrait donc être moins cher à construire », ajoute-t-il. Le développement d'un tel type de réacteur n'en est encore qu'à ses débuts. « Nos travaux de recherche ont été couronnés de succès à l'époque, dans le sens où de nombreux étudiants se sont ensuite orientés vers la technologie de l'énergie nucléaire », se souvient-il. À cette époque, l'Allemagne avait encore un grand besoin de relève pour le développement de l'énergie nucléaire. Aujourd'hui, en revanche, Thomas Schulenberg fait partie d'une « espèce en voie de disparition » dans son pays. Il estime que la Suisse dispose désormais de plus d'expertise dans ce domaine.

Une définition floue

Comme l'idée de réacteurs rapides refroidis au sodium de génération IV est apparue dès les années 1970 et que plusieurs installations ont déjà été construites, Annalisa Manera estime que cette classification des centrales nucléaires est « assez floue » : « Le GIF n'a certes été créé qu'en 2001, mais le concept et les idées qui se trouvent derrière certains réacteurs de génération IV remontent à bien plus longtemps », rappelle-t-elle. « Cela fait déjà

plus de 60 ans que l'on cherche des moyens d'améliorer l'efficacité de l'utilisation du combustible. » Elle suppose que c'est probablement pour cette raison qu'il y a beaucoup de malentendus sur ce qu'est cette « nouvelle » génération de réacteurs.

Depuis la définition du terme au tournant du millénaire, les concepts traditionnels ont également évolué. « Pour les types de réacteurs refroidis à l'eau, nous avons atteint un niveau de sécurité qui est vraiment difficile à battre », explique Annalisa Manera. Selon les estimations statistiques des risques, il ne devrait se produire plus qu'un seul accident critique en l'espace de dix millions d'années, voire d'un milliard d'années. « Du point de vue de l'ingénierie, la probabilité d'accident est pratiquement nulle », ajoute-t-elle. Les systèmes de sécurité passifs veillent par exemple à ce qu'une fusion du cœur soit exclue. « Le type de liquide de refroidissement n'est donc pas un facteur de sécurité déterminant, c'est la conception du réacteur qui compte. » Selon elle, les réacteurs de génération IV sont donc attrayants en raison des éléments suivants: « Certains peuvent atteindre des températures très élevées qui pourraient être exploitées dans toute une série de processus industriels. Et un sous-groupe utilise des neutrons rapides qui permettent de transformer en combustibles des matériaux qui ne sont pas des combustibles à l'origine. On obtient ainsi beaucoup plus d'énergie avec beaucoup moins de déchets. » À cela s'ajoute le fait que les déchets nucléaires existants peuvent être recyclés avec certains réacteurs de quatrième génération. « 95% de ce que nous appelons aujourd'hui des déchets nucléaires pourraient encore servir de combustible », explique-t-elle.

De tels arguments sont apparemment convaincants. Avec la fédération faîtière de l'économie Economiesuisse, les milieux proches de l'UDC et du PRD ont par exemple demandé cet été, avec l'initiative « Stop au blackout », de revenir sur l'abandon du nucléaire [14]. À la suite de quoi, Albert Rösti, le chef du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, a formellement demandé au Conseil fédéral de supprimer de la loi l'interdiction existante de construire de nouvelles centrales nucléaires.

La perspective économique

La principale critique adressée à l'énergie nucléaire est qu'elle est tout simplement trop chère. « Les coûts des centrales nucléaires n'ont pas diminué depuis des décennies, car la technologie est très complexe », explique l'économiste Jonas Savelsberg de l'ETH Zurich, qui étudie depuis longtemps les systèmes énergétiques dans une perspective économique et modélise le marché de l'électricité. Les réacteurs de quatrième génération n'y changeraient rien. D'un autre côté, il existe des technologies alternatives que l'on peut produire de manière standardisée en très grandes quantités: « Les énergies solaire et éolienne sont devenues considérablement moins chères au cours des dernières années. »

Ses déclarations sont confirmées entre autres par les calculs de la banque d'investissement américaine Lazard et du cabinet de conseil en stratégie Roland Berger. Pour ce faire, ces entreprises ont utilisé le LCOE (Levelized Costs of Energy) – un indicateur des coûts de production d'énergie. Le LCOE est en quelque sorte le prix minimum moyen auquel l'électricité produite par l'installation doit être vendue pour couvrir l'ensemble des coûts de production pendant sa durée de vie. Ces dernières années, selon Lazard, le LCOE de l'électricité nucléaire a augmenté de près de 50%; dans le même temps, il a chuté de plus de 80% pour le photovoltaïque et de 65% pour l'éolien [15]. Selon ses calculs, le LCOE de l'électricité nucléaire est d'environ 0,18 USD par kilowattheure, tandis que pour l'énergie photovoltaïque et éolienne, il est d'environ 0,05 USD.

L'Institut Fraunhofer pour les systèmes énergétiques solaires ISE, à Freiburg, en Allemagne, arrive même à des valeurs allant jusqu'à 0,5 EUR par kilowattheure pour le LCOE de l'énergie nucléaire [16]. L'énergie éolienne et les installations photovoltaïques se situeraient en revanche entre 0,04 et 0,15 EUR. À cela s'ajoute le fait que la valeur du LCOE ne tient pas compte des coûts à long terme tels que ceux liés au stockage des déchets nucléaires en couche géologique profonde. L'énergie nucléaire serait ainsi le mode de production d'électricité le plus cher.

Étant donné que Lazard est une société d'investissement qui investit dans les énergies renouvelables et que l'ISE effectue des travaux de recherche dans le domaine de l'énergie solaire, des critiques sont parfois formulées ici

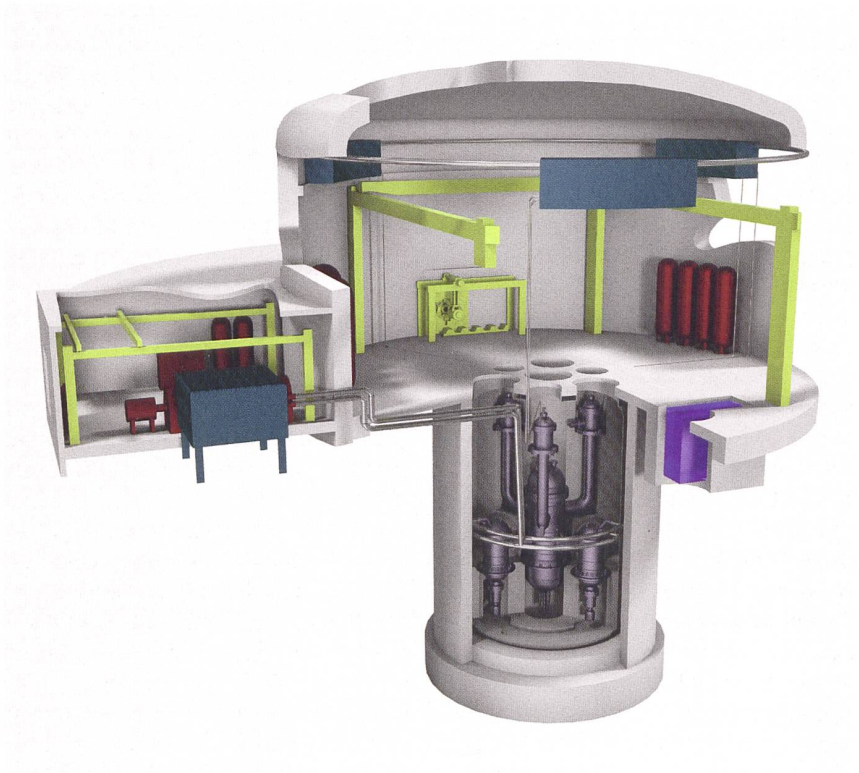
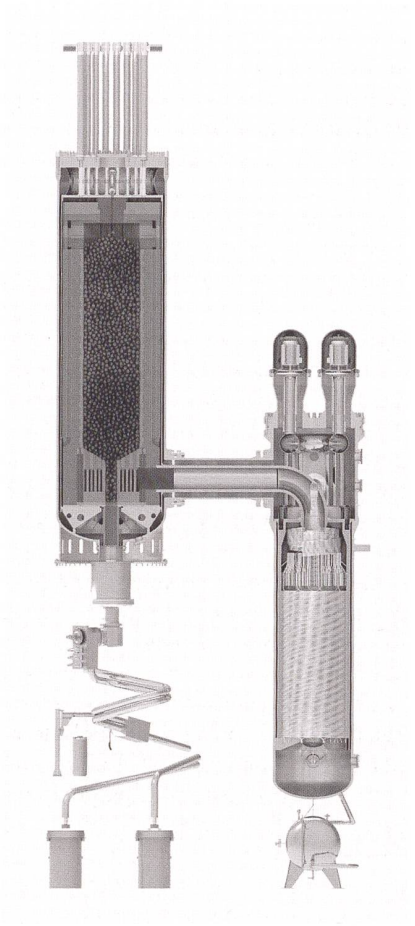


Figure: VUJE

Le réacteur à neutrons rapides à haute température refroidi au gaz Allegro permet de démontrer des concepts de réacteurs de génération IV, mais il ne produit pas d'électricité.



Xe-100 : ce réacteur commercial à lit de boulets à haute température refroidi au gaz devrait être mis en service aux États-Unis en 2027.

quant à un manque d'indépendance dans la prise de position sur le sujet. « Les hypothèses les plus pessimistes ont été utilisées comme base pour l'énergie nucléaire », reproche par exemple Annalisa Manera. Dans un rapport de 2017 pour l'Office fédéral de l'énergie, le PSI a par exemple calculé une valeur du LCOE comprise entre 0,05 et 0,0125 CHF par kilowattheure [17]. Dans le cas le plus défavorable, bien que très improbable, cette valeur pourrait atteindre 0,275 CHF/kWh.

Ce rapport se base toutefois sur des coûts d'investissement faibles et sur une production en ruban qui deviendra de moins en moins probable à l'avenir, critique à son tour Jonas Savelsberg. « Au niveau européen, nous nous dirigeons vers un système électrique dans lequel la plus grande partie des besoins sera couverte par le vent, le soleil et l'énergie hydraulique », explique-t-il. « Nous devons désormais nous poser la question de savoir comment produire raisonnablement le reste. » Techniquement, il faudrait pour cela une méthode à laquelle il serait possible de recourir de manière flexible dès que la demande dépasse l'offre des énergies renouvelables. « Il serait erroné de penser que l'énergie nucléaire ne peut pas le faire », explique Annalisa Manera. « En France, il s'agit d'une pratique courante. » D'un point de vue économique, il n'est toutefois pas judicieux de faire fonctionner un réacteur nucléaire à pleine puissance uniquement par moments, admet-elle. Et c'est justement là le problème fondamental pour Jonas Savelsberg : « Si l'on mise sur l'énergie nucléaire comme technologie complémentaire aux énergies renouvelables, l'unité d'électricité devient très chère. Les coûts d'investissement à amortir et les coûts d'exploitation des réacteurs restent les mêmes, qu'ils soient en train de produire de l'électricité ou non. » L'énergie déjà onéreuse d'une centrale nucléaire devient donc encore plus chère. C'est ce que confirme aussi Thomas Schulenberg : « Si l'on veut utiliser chaque kilowattheure produit par le vent ou le soleil, une centrale nucléaire ne fait aucun sens d'un point de vue économique : les coûts fixes sont beaucoup trop élevés. »

Et ces coûts élevés commencent dès la construction : dans son livre « How Big Things Get Done », Bent Flyvbjerg, économiste et professeur à l'IT University of Copenhagen, arrive à la conclusion que les centrales nucléaires coûtent en moyenne 120 % de plus que prévu. Le stockage intermédiaire ou final des déchets nucléaires coûte même 240 % de plus que ce qui avait été calculé à l'origine [18]. Un exemple récent : la Pologne voulait achever son premier réacteur en 2033, ce qui a entre-temps été repoussé à 2040, pour une durée de construction de 14 ans et des coûts élevés, comme le rapporte le magazine « Focus » [19].

La centrale nucléaire Hinkley Point C, dans le Somerset anglais, devait coûter environ 21 milliards d'euros au début de sa construction en 2016 : on estime entre-temps qu'elle coûtera environ 40 milliards [20]. Et le premier des deux réacteurs sera connecté au réseau au plus tôt en 2031, soit six ans plus tard qu'initialement prévu [21]. Toutefois, les deux unités de Hinkley Point C produiront vraisemblablement autant d'électricité que toutes les centrales nucléaires suisses réunies. « Si l'on voulait produire la même quantité d'électricité avec le solaire alpin, les installations coûteraient plus de 50 milliards de francs suisses », estime Annalisa Manera. Le solaire alpin est toutefois l'une des sources d'électricité renouvelable les plus chères.

Il est aussi vrai que les délais de construction varient fortement : la Chine, le Japon ou la Corée du Sud ont par exemple souvent achevé leurs réacteurs les plus récents en cinq à sept ans [22]. Selon Statista, la médiane pour la construction d'un réacteur nucléaire entre 2020 et 2022 était d'un peu plus de sept ans [23]. La Chine se distingue particulièrement à cet égard. Bien que le pays n'ait autorisé sa première centrale nucléaire qu'en 1981, 57 réacteurs sont déjà en service aujourd'hui et 30 autres sont en construction. Ainsi, au cours des dernières décennies, le programme nucléaire chinois a atteint un degré de standardisation élevé, dont les autres pays ne peuvent que rêver. Les types de réacteurs construits sont souvent uniformes, les chaînes d'approvisionnement associées bien établies, et une main-d'œuvre expérimentée est disponible. De plus, les banques gouvernementales garantissent le financement. « Les nouvelles centrales nucléaires ne sont en fait construites que si l'État les finance », explique Jonas Savelsberg. Pour les investisseurs privés, le risque est trop élevé, car le montant de l'investissement et la durée de la construction sont généralement incertains.

Annalisa Manera est toutefois optimiste quant au fait qu'une standardisation ainsi qu'une plus grande efficacité dans la production puissent s'imposer dans l'ensemble du secteur et que la construction de nouvelles centrales puisse à nouveau s'accélérer à l'avenir, même en Europe. « On développe aussi de petits réacteurs modulaires et même des microréacteurs qui sont en grande partie fabriqués en usine. Cela rend la fabrication beaucoup plus rentable. » De telles installations pourraient, par exemple, fournir de l'énergie à une grande entreprise qui a besoin de beaucoup d'électricité ou de chaleur et qui ne veut pas dépendre des fluctuations de prix de l'électricité du réseau, pense-t-elle.

Figure : X-Energy

Mais l'électricité d'un « Small Modular Reactor », SMR, est encore plus chère que celle des grands réacteurs, explique Thomas Schulenberg. « Je ne pense pas que cela change bientôt. » Certains, comme l'entreprise NuScale Power, ont déjà dû abandonner des SMR prévus en raison de l'explosion des coûts [24]. D'autres continuent de croire en cette technologie – par exemple l'entreprise Rolls-Royce, qui travaille à un SMR [25] : « Chaque centrale nucléaire fabriquée en usine fournira suffisamment d'électricité abordable et à faible teneur en carbone pour alimenter un million de foyers pendant plus de 60 ans », peut-on lire dans un communiqué de presse publié par l'entreprise en 2024 [26].

« Tous les pays ne sont pas intéressés par de grandes installations », précise Annalisa Manera. Plusieurs pays européens envisageraient déjà d'acheter des SMR – dont la Pologne, la Roumanie et la Grande-Bretagne. « Chez nous, en Europe, je ne vois pas de marché pour de tels réacteurs », juge en revanche Thomas Schulenberg. « Les SMR pourraient être utiles pour les réseaux dits en îlots, où il serait impossible d'exploiter entièrement la puissance des grandes centrales nucléaires », ajoute-t-il. De telles infrastructures de réseau existent par exemple au Canada, en Alaska ou en Sibérie. Une idée consisterait également à utiliser, dans un avenir lointain, de telles minicentrales dans l'espace. La NASA a déjà développé, en collaboration avec le Los Alamos National Laboratory, un réacteur de démonstration baptisé Krusty [27]. La Chine et la Russie développent également un modèle qui pourrait être utilisé dans une station de recherche sur la Lune [28].

Comment l'approvisionnement en énergie va-t-il évoluer ?

Mais revenons à la Terre : l'énergie nucléaire peut-elle à l'avenir faire judicieusement partie d'un mix énergétique pauvre en carbone ? Thomas Schulenberg et Annalisa Manera en sont convaincus. Pour Thomas Schulenberg, par exemple, la structure envisagée pour l'approvisionnement énergétique est une décision purement politique : « La France dit : nous misons essentiellement sur l'énergie nucléaire pour notre approvisionnement de base en électricité et produisons accessoirement de l'énergie photovoltaïque et éolienne. » Il s'agit simplement d'un autre concept. Il pense même qu'à long terme, la France produira de l'électricité moins chère que l'Allemagne. Car les périodes creuses sans vent ni soleil devront être alimentées avec des technologies alternatives, par exemple avec des technologies de stockage telles que les batteries et l'hydrogène, ou avec des centrales à gaz ou au fioul avec CCS, c'est-à-dire avec capture et stockage du CO_2 produit.

Nombre de ces approches ne sont pas efficaces, ne sont pas encore opérationnelles ou entraîneraient également des coûts élevés, explique Annalisa Manera. Elle trouve donc le comportement de l'Allemagne « hypocrite » : « On ne veut plus d'énergie nucléaire, mais on importe ensuite de l'électricité nucléaire de France. Cela n'a guère de sens. » Elle estime que l'énergie nucléaire est indispensable pour atteindre la neutralité carbone et qu'elle garantira à l'avenir l'approvisionnement énergétique de base dans de nombreux pays. C'est également la conclusion d'un document de référence qu'elle a récemment rédigé à la demande de la Confédération avec d'autres chercheurs suisses de premier plan dans le domaine du nucléaire. Selon ce rapport, l'énergie nucléaire n'est pas nécessairement plus chère que d'autres sources d'énergie, pour autant qu'on l'intègre judicieusement dans le système d'approvisionnement en électricité [29].

Jonas Savelsberg voit les choses différemment : « En Europe, nous pourrons à l'avenir couvrir la totalité de nos besoins en électricité avec les énergies renouvelables une grande partie de l'année. » Nous produisons parfois déjà aujourd'hui trop d'électricité. « Dans de telles conditions, une centrale nucléaire n'est plus rentable, car sa production en ruban n'a alors plus du tout de valeur », explique-t-il. Une étude de l'ETH Zurich, qui évalue le rôle de l'énergie nucléaire dans le système électrique suisse, parvient à une conclusion similaire. L'un des résultats a été que, compte tenu des coûts d'investissement actuels pour les centrales nucléaires en Europe, la construction d'une nouvelle installation entraînerait des coûts nettement plus élevés que le scénario sans nouvelles centrales nucléaires. Toutefois, l'étude conclut également qu'un fonctionnement prolongé des centrales nucléaires existantes en hiver permettrait de réduire les importations d'électricité. Cela pourrait faire baisser les coûts globaux de l'approvisionnement en électricité et atténuer la hausse des prix de l'électricité, concluent les auteurs [30].

Annalisa Manera déplore notamment qu'un très grand facteur d'incertitude ait été ajouté au scénario nucléaire – c'est la seule raison pour laquelle il est devenu plus onéreux. Elle appuie son opinion sur une étude de la Nuclear Energy Agency de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) consacrée au cas de la Suisse, publiée en 2022 [31]. Cette étude arrive à la conclusion que l'électricité serait moins chère si de nouvelles centrales nucléaires étaient construites. Toutefois, cette situation est à nouveau principalement due aux bénéfices issus des exportations d'électricité, « qui ne sont atteints que parce que l'on a pris en considération des prix historiques de l'électricité pour les pays voisins », explique Jonas Savelsberg. Si l'on avait considéré une baisse des coûts dans ces pays également, les bénéfices disparaîtraient en grande partie. On constate donc que les résultats peuvent être totalement différents selon les hypothèses retenues.

Indépendamment de la controverse sur l'énergie nucléaire, la Suisse se trouve déjà aujourd'hui dans une situation confortable en ce qui concerne la sécurité d'approvisionnement en électricité. Une part importante des besoins en énergie électrique est couverte par l'énergie hydraulique, peu sujette aux fluctuations. Le pays dispose en outre de centrales de pompage-turbinage pour l'électricité excédentaire, qui peuvent la remettre à disposition en cas de besoin. « En Suisse, la solution pour la transition énergétique est là depuis longtemps », résume Jonas Savelsberg. En Allemagne, en revanche, on mise de manière transitoire sur les centrales au gaz naturel. « Mais on ne sait pas encore très bien ce qu'il adviendra si l'on ne veut plus brûler de gaz », déplore Thomas Schulenberg. La politique allemande souhaite recourir au CCS en cas d'émissions non évitables, afin de capter et de stocker le CO_2 émis [32]. De plus, une extension importante du réseau doit garantir l'approvisionnement en électricité.

Jonas Savelsberg explique l'idée sous-jacente: « Le grand avantage en Europe par rapport à d'autres régions est qu'il existe un réseau commun au sein duquel les différents pays peuvent échanger de l'électricité. » On part du principe que dans un système interconnecté à une si grande échelle, l'offre et la demande s'équilibrent en moyenne. Quelque part en Europe, il y a généralement toujours suffisamment de vent, de soleil et d'énergie hydraulique pour produire assez d'électricité pour tout le monde. Et si ce n'est pas le cas, il y a des technologies de back-up telles que les systèmes de stockage par batterie et les centrales à gaz avec CCS. Mais comme certaines nations continuent de miser sur l'énergie nucléaire, cette technologie fera également partie de l'approvisionnement en électricité de l'Europe à l'avenir. « Bien sûr, tous les pays d'Europe ne doivent pas avoir de centrales nucléaires », estime Thomas Schulenberg. Selon lui, il est bien plus important de trouver ensemble des solutions raisonnables. Annalisa Manera et Jonas Savelsberg sont aussi d'accord sur ce point.

Références

[1] www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421513006083?via%3Dihub
[2] arxiv.org/pdf/2302.14515
[3] www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/abstimmung-zum-energiegesetz/kernenergie.html
[4] www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/atomausstiegsinitiative.html
[5] www.zeit.de/wirtschaft/2017-05/schweiz-volksabstimmung-atomausstieg-energiewende
[6] www.bmuv.de/media/atomkraftwerke-in-deutschland-abschaltung-der-noch-betriebenen-reaktoren-gemaess-atomgesetz-atg
[7] www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687850713000101
[8] energyfromthorium.com/pdf/NAT_MSREexperience.pdf
[9] en.wikipedia.org/wiki/Sodium-cooled_fast_reactor#Reactors
[10] www.mdr.de/wissen/china-startet-ersten-thorium-fluessigsalz-reaktor-atomkraft-100.html
[11] edison.media/energie/ist-der-fluessigsalzreaktor-das-perfekte-kraftwerk/25223783
[12] www.psi.ch/de/news/medienmitteilungen/zusammenarbeit-in-der-reaktorforschung
[13] www.nuklearforum.ch/de/news/russland-baubeginn-fuer-bleigekuehlten-schnellen-reaktor
[14] www.tagesanzeiger.ch/akw-neubau-schweiz-roesti-will-verbot-kippen-198816516068
[15] www.lazard.com/media/xemfey0k/lazards-lcoe-plus-june-2024-_vf.pdf
[16] www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html
[17] www.psi.ch/sites/default/files/import/ta/PublicationTab/Final-Report-BFE-Project.pdf
[18] www.n-tv.de/wirtschaft/Warum-China-AKWs-bauen-kann-und-wir-nicht-article25171647.html
[19] www.focus.de/earth/analyse/kurs-verschlingt-milliarden-ein-ungeloestes-problem-gefaehrdet-polens-riskante-atomkraft-plaene_id_260254192.html
[20] www.edf.fr/en/the-edf-group/dedicated-sections/journalists/all-press-releases/hinkley-point-c-update-1
[21] www.zdf.de/nachrichten/politik/ausland/atomkraftwerk-atomenergie-grossbritannien-bau-100.html
[22] thebreakthrough.org/issues/energy/chinas-impressive-rate-of-nuclear-construction#:~:text=The%20Chinese%20nuclear%20project%20construction,to%20just%20over%207%20years
[23] www.statista.com/statistics/712841/median-construction-time-for-reactors-since-1981
[24] www.theguardian.com/australia-news/2023/nov/09/small-modular-nuclear-reactor-that-was-hailed-by-coalition-as-future-cancelled-due-to-rising-costs
[25] www.rolls-royce-smr.com
[26] www.rolls-royce-smr.com/press/rolls-royce-smr-presses-home-advantage-as-it-moves-into-final-step-of-uk-regulatory-assessment
[27] www.nasa.gov/tdm/fission-surface-power
[28] www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/russland-entwickelt-atomkraft-fuer-den-mond-a-ad047003-9e89-45fb-9cd6-9795006c021d
[29] www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZW4vcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTE4Mzg=.html
[30] nexus-e.org/role-of-nuclear-power
[31] www.oecd.org/en/publications/achieving-net-zero-carbon-emissions-in-switzerland-in-2050_ac21f8be-en.html
[32] www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/05/20240529-entscheidung-ccs-industrie-deutschland.html

Auteur

Dr **Janosch Deeg** est physicien et journaliste scientifique indépendant.
→ Deschawi.de, DE-69221 Dossenheim
→ deeg@deschawi.de