

Fortschritt ist länderübergreifend geprägt

Kernkraftwerke der vierten Generation: amerikanische Initiative im Kontext internationaler Politik

Politisch-gesellschaftliche Vorbehalte gegenüber der zivilen Kernenergienutzung sind kein deutsches Unikum. Die US-amerikanische Regierung unter Präsident Carter hatte ja den Umgang mit Plutonium zu einem Tabu gemacht und damit im Grunde ein weltweites Moratorium für kerntechnische Neuentwicklungen angestrebt. Viele Industrieländer haben hier in der Tat kurz getreten, aber ohne sich spätere Optionen in prinzipieller Selbstbeschränkung abzuschneiden.

In der aktuellen Konstellation steht einerseits eine global durchschlagende Reduktion der CO₂-Emissionen in den Sternen, andererseits wurde der Atomausstieg mit der Begründung inakzeptabler Strahlungsrisiken zu einem weitverbreiteten gesellschaftspolitischen Credo [5]. In dieser Schwebe-lage haben die Amerikaner erneut die Initiative ergriffen und eine multilaterale wissenschaftlich-technische Plattform für einen ausgedehnten und weltweiten Einsatz von Kernkraftwerken eingerichtet, und zwar mit einem Zeithorizont von drei Dekaden. Hierbei geht es weniger um völlig Neues als vielmehr um eine modifizierte Definition amerikanischer Interessen im Kontext der internationalen Nuklearpolitik. Dazu zählen vor allem Wirtschaftlichkeit sowie maximale Sicherheit vor schweren Unfällen und vor unerlaubter Kernwaffenproduktion.

Dr. Rudolf Botzian, Hohenschäftlarn, ist ehemaliger Mitarbeiter des Forschungsinstituts für internationale Politik und Sicherheit der Stiftung Wissenschaft und Politik, Ebenhausen (Isar).

Generationenabfolge reaktor-technischer Entwicklungen: Weg zur höheren Sicherheit

Auf Uranspaltung basierende Reaktoren haben im Reaktionsraum eine große Menge an Brennstoff. Dieses Brennstoff-»Core« enthält mit der Betriebsdauer steigende Mengen von hochradioaktiven Spaltprodukten. Bei deren weiterem Zerfall entsteht eine erhebliche Nachwärme. Im Gegensatz zur Primärreaktion Uranspaltung ist der Nachzerfall mit keinen technischen Mitteln zu verhindern. In der Folge tritt beim Totalausfall der Wärmeabfuhr (besonders der Notkühlung) dann Core-Schmelzen mit teilweiser Verdampfung des radioaktiven Inventars ein, wie es beim Unfall von Tschernobyl geschah. Insofern war kerntechnische Sicherheit mit dem Schutz vor radioaktiver Strahlung im Normalbetrieb wie im Störfall von Anfang an ein erstrangiges Kriterium für die Betriebslaubnis nuklearer Kraftwerke. Dem zugehörigen technischen Fortschritt, der durch laufende Verbesserungen über Jahrzehnte hinweg erreicht wurde, entspricht eine Klassifizierung unterschiedlicher Reaktoren der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft [2]:

- Die Generation I umfasst frühe Prototypen, die seit den 1950er Jahren zur Stromerzeugung eingesetzt wurden. Auslaufmodelle sind noch in Großbritannien im Betrieb.
- Reaktoren der Generation II gelten als wirtschaftliche Arbeitspferde, von denen über 400 in aller Welt als Rückgrat für die Grundlast in der Stromversorgung eingesetzt werden. Sie sind überwiegend leichtwassermoderierte und -gekühlte Anlagen. Es gibt den Typ Druckwasser, bei der das im Reaktor-Core erhitzte Wasser unter Hochdruck in

einem geschlossenen Kreislauf geführt wird und seinen Energieinhalt über Wärmetauscher an einen zweiten Kreislauf mit anschließender Erzeugung von Turbinendampf abgibt, sowie den Typ Siedewasser, bei der das im Reaktor-Core erhitzte Wasser direkt den Turbinendampf liefert. Nach dem Störfall von Harrisburg/USA sind bei diesen Anlagen in den westlichen Industrieländern keine ernsthaften Zwischenfälle mehr aufgetreten.

- Reaktoren der Generation III werden für künftige Neubauten vorgesehen, und zwar in beiden Varianten Druck- und Siedewasser. Sie sollen über alle Vorteile der Generation II mit ihrer großen kumulierten Betriebserfahrung verfügen. Darüber hinaus sollen sie eine weiter verstärkte Sicherheit sowie eine erhöhte Wirtschaftlichkeit – im Vergleich zum Einsatz von Kohle oder Gas – aufweisen.

- Mit sehr fortgeschrittenen Konzepten der Generation IV soll durch technische Innovationen ein noch weiter verbesserter Schutz der Außenwelt beim Eintritt eines Störfalls erreicht werden.

Die Entwicklungen der Vergangenheit, der gegenwärtige Stand der Technik und der Ausblick auf die Zukunft sind in *Bild 1* dargestellt.

Rolle der Generationen III und IV

Moderne Reaktoren sind technisch so ausgelegt, dass selbst bei einem schwersten Störfall mit angemessenem Core-Schmelzen eine Gefährdung der Bevölkerung außerhalb des Kernkraftwerks ausgeschlossen werden kann [4]. Soll die Kernkraft wie bisher zur Deckung der Grundlast in großen elektrischen Verbundnetzen eingesetzt werden, dann werden – sofern Neubauten für die nächsten Jahrzehnte anstehen – die Typen der Generation III zum Zuge kommen. Hier sind zu nennen die vom französisch-deutschen Unternehmen Framatome konzipierten Varianten European Pressurized Water Reactor (EPR) und der Siedewasserreaktor SWR 1000 sowie die Druckwasserreaktoren des Typs Advanced Passive Plant (AP600 und AP1000) von Westinghouse, deren »passive« Sicherheitssysteme für eine Reihe von denkbaren Störfällen unabhängig sind von einer ständig betriebsbereit zu haltenden Notstromversorgung. Hinzu kommt der Advan-

ced Boiling Water Reactor (ABWR), eine Gemeinschaftsentwicklung von General Electric, Hitachi und Toshiba, mit der schon zwei Kernkraftwerke in Japan betrieben werden. Weitere Anlagen von diesem Typ sind dort und eine in Taiwan im Bau. Für die schwerwassermode-rierten und leichtwassergekühlten kanadischen Candu-Reaktoren gibt es ebenfalls Fortentwicklungen, die der Generation III zuzurechnen sind.

Eine Weiterführung des Einsatzes der Kernenergie, die breite gesellschaftliche Akzeptanz findet, wird davon politisch profitieren können, wenn – mit einem Start jetzt – in den nächsten Dekaden ein sichtbares Weiterkommen auf dem Weg zur Generation IV stattfindet. Hier geht es mehr um die politische Signalwirkung eines innovativen Aufbruchs als um einen tatsächlichen wissenschaftlich-technisch-wirtschaftlichen »Quantensprung«. Trotz erfolgversprechender Vorstudien muss indessen die Eignung von Baulinien der Generation IV für die Praxis noch demonstriert werden. Andererseits gehen die zugehörigen technischen Lösungen teilweise auf Entwicklungen zurück, für die bereits in der bisherigen Ära der zivilen Kernenergienutzung Vorarbeiten geleistet wurden. Sie kommen – nach derzeitigem Stand von Wissenschaft und Technik – eher für spezielle Anwendungen infrage, für die die Reaktoren der heutigen Grundlastkraftwerke mit ihren hohen Blockleistungen weniger geeignet sind. Zu denken ist etwa an kleine Einheiten zum schnellen Herauf- und Herunterfahren beim Ausgleich unregelmäßiger Leistungsangebote von Wind und Sonne oder an Hochtemperaturreaktoren zur Erzeugung von Wärme für industrielle thermochemische Prozesse. In diesem Kontext wiederum steht und fällt der notwendige wissenschaftlich-technische Fortschritt mit einem international ausstrahlenden Engagement des hohen amerikanischen wissenschaftlichen, industriellen und finanziellen Potenzials.

Generation IV International Forum

Im Blick auf einen Aufbruch zur Entwicklung von kerntechnischen Systemen mit erhöhter Wirtschaftlichkeit und verstärkter Sicherheit

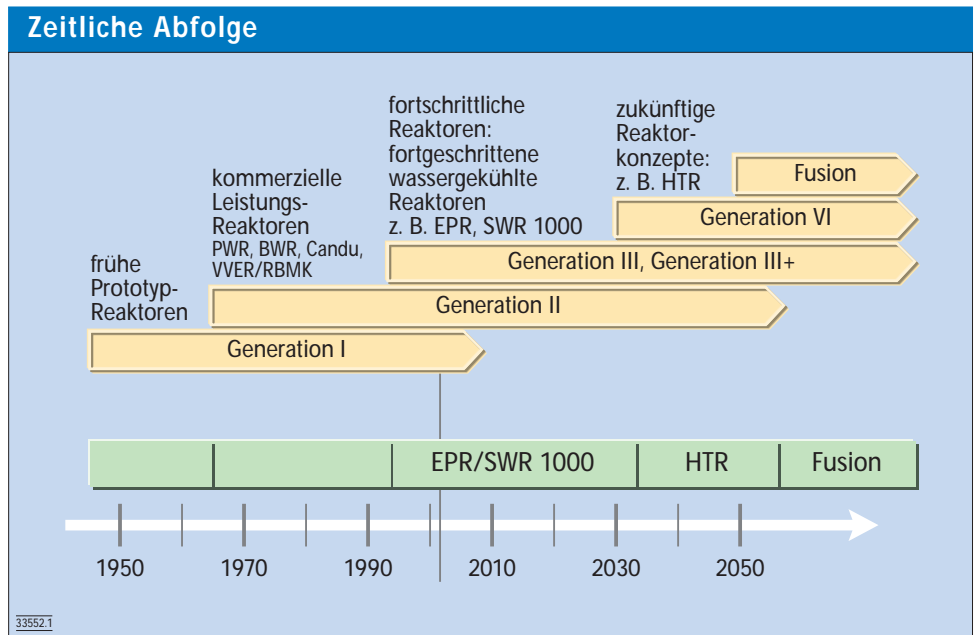


Bild 1. Reaktorgenerationen I bis IV: Entwicklungen der Vergangenheit, gegenwärtiger Stand der Technik und Ausblick auf die Zukunft

Quelle: Güldner

kommt der von Washington in Gang gesetzten Unternehmung »Generation IV International Forum – Nuclear Energy Systems« (GIF) in der Tat eine international wirksame Schrittmacherfunktion zu. Dort sind neben den USA neun Länder beteiligt, nämlich Argentinien, Brasilien, Frankreich, Großbritannien, Japan, Kanada, Schweiz, Südafrika und Südkorea, sowie die Europäische Kommission, die OECD und die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) [3].

Eine gemeinsam erarbeitete Roadmap dient der langfristigen Ausrichtung der zu leistenden umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben (Bild 2). Diese Initiative wird getragen vom Department of Energy (DOE) durch das Nuclear Energy Research Advisory Committee (Nerac) und durch die Nuclear Energy Division (NE) sowie vom GIF [1].

Varianten in der Roadmap des GIF

Das GIF hat aus einer Fülle von Varianten für Reaktoren, die alle im Prinzip technisch realisierbar wären, sechs Technologielinien zur Untersuchung herausgegriffen. Besonders wurden folgende Auswahlkriterien unter der Überschrift »top-ranked sustainability« herangezogen:

- Die Kapitalkosten sind im Vergleich zu heutigen Systemen deutlich zu reduzieren.
- Es muss eine verstärkte Sicherheit in dem Sinn gewährleistet sein, dass beim schwersten denkbaren Störfall keine Folgen außerhalb des Betriebsgeländes auftreten.
- Die Weiterbehandlung verbrauchten Brennstoffs geschieht möglichst weit On-site, so dass das Transportvolumen gefährlicher Stoffe weitgehend reduziert wird.
- Das Risiko einer heimlichen Nutzung zu militärischen Zwecken ist zu minimieren.

Für die Beschreibung der in der Roadmap betrachteten Technologielinien werden die englischen Bezeichnungen verwendet, da sie international üblich sind und deutsche Übersetzungen zum Teil fehlen. Es handelt sich um folgende Typen:

- GFR – Gas Cooled Fast Reactor System, mit Helium als Kühlmittel und ohne Moderator;
- LFR – Lead-Cooled Fast Reactor System, mit Kühlung durch eine Blei-Wismut-Flüssigmetallegerung und ohne Moderator. Ein System, einsetzbar als »Battery« von 10 bis 30 Jahren Lebensdauer ohne zwischenzeitliche Ent- und Beladung;
- MSR – Molten Salt Reactor System, mit einer geschmolzenen Mischung aus Fluorsalzen von Na-

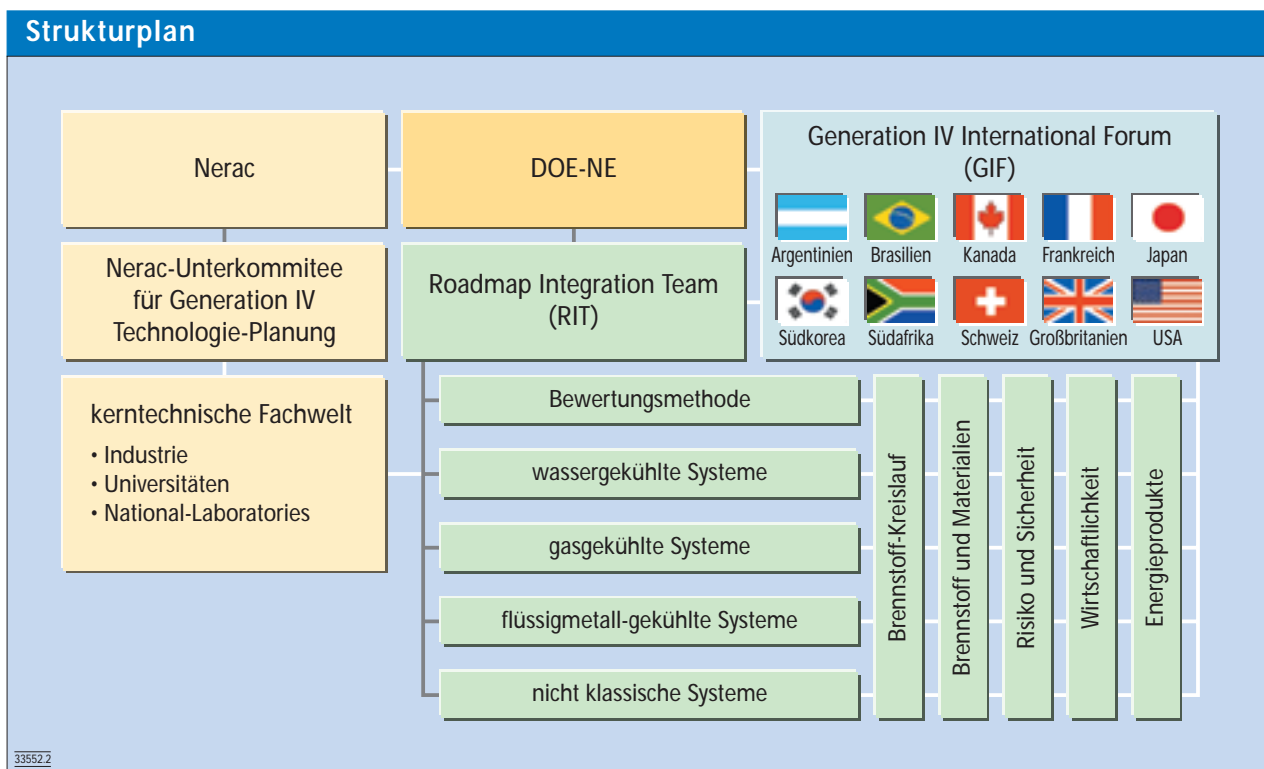


Bild 2. Roadmap zur langfristigen Ausrichtung der zu leistenden umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben der Reaktorgenerationen IV. DOE = Department of Energy, Nerac = Nuclear Energy Research Advisory Committee, NE = Nuclear Energy Division

Quelle: DOE Technology Roadmap for Generation IV

trium, Zirkonium und Uran, die gleichzeitig als Brennstoff wie Kühlmittel dient, mit Graphit als Moderator;

- SFR – Sodium Cooled Fast Reactor System, mit Uran und Plutonium als Brennstoff, Flüssignatrium als Kühlmittel und ohne Moderator, als Weiterführung von bisheriger Forschung und Entwicklung in den USA, in Japan, Frankreich, Deutschland, Großbritannien und Russland;

- SCWR – Supercritical-Water-Cooled Reactor System, mit leichtem Wasser in »überkritischem« Zustand (hohe Temperatur unter hohem Druck) als Kühlmittel und zugleich als Turbinenantrieb ohne Dampfentwicklung, mit Wasser als Moderator für eine Variante mit thermischen Neutronen oder ohne Moderator für eine Variante mit schnellen Neutronen;

- VHTR – Very-High-Temperature Reactor System, mit Helium als Kühlmittel und Graphit als Moderator sowie mit »inhärenter« Sicherheit (»natürliche« Notkühlung im Störfall, s. o.), vor allem auch für Anwendungen außerhalb der Stromerzeugung in industriellen Prozessen auf hohem Temperaturniveau

geeignet, nicht zuletzt gestützt auf deutsche Vorläufe in Forschung und Entwicklung.

Die vom GIF erarbeitete Roadmap enthält die in Bild 3 dargestellten Zeithorizonte.

Behandlung verbrauchter Brennstoffe

Spaltbar in einer exergetischen Kettenreaktion ist das Uranisotop 235. Die technische Anwendung dieses physikalischen Effekts ist realisierbar nach Anreicherung des U 235 im Brennstoff auf 3 % (Rest ist U 238 mit 97 %). Als Folgeprodukte der Reaktion treten auf

- unverbrauchte Brennstoffe,
- Spaltprodukte, d. h. radioaktive Isotope von chemischen Elementen auf mittleren Plätzen des Periodischen Systems,
- Aktiniden, d. h. in der Natur nicht vorkommende schwere chemische Elemente mit Ordnungszahlen jenseits der Obergrenze 92 im traditionellen Periodischen System (Transurane, besonders das wiederum spaltbare Plutonium 239).

Für die Behandlung verbrauchten Brennstoffs bieten sich vier Verfahren an:

1. »Once-Through-Cycle« mit direkter Endlagerung,
2. chemische Abtrennung von Plutonium mit partieller Rückführung in den kommerziellen Brennstoffkreislauf und Endlagerung des Rests,
3. Abtrennung von Plutonium mit vollständiger weiterer Umsetzung im Brennstoffkreislauf und
4. Rückführung aller Aktiniden in den Brennstoffkreislauf und schließliche Endlagerung von – gegenüber Once-Through – vergleichsweise geringen Mengen strahlenden Abfalls.

Ursprünglich wurde die erste Variante favorisiert, weil hierbei nicht das waffentaugliche Plutonium abgetrennt und dabei in relativ einfacher Weise für Unbefugte zugänglich wird. Indessen würden damit die bekannten Uranvorräte in rd. 50 Jahren erschöpft. Weiterhin werden die Standorte von geeigneten geologischen Formationen für die Endlagerung knapp. Als das geeignetste Verfahren sieht das GIF deshalb die vierte Variante an, bei der Plutonium mit den hoch radioaktiven Aktiniden vermischt bleibt und deshalb nur unter Inkaufnahme akuter Lebensgefahr für Unbefugte zu-

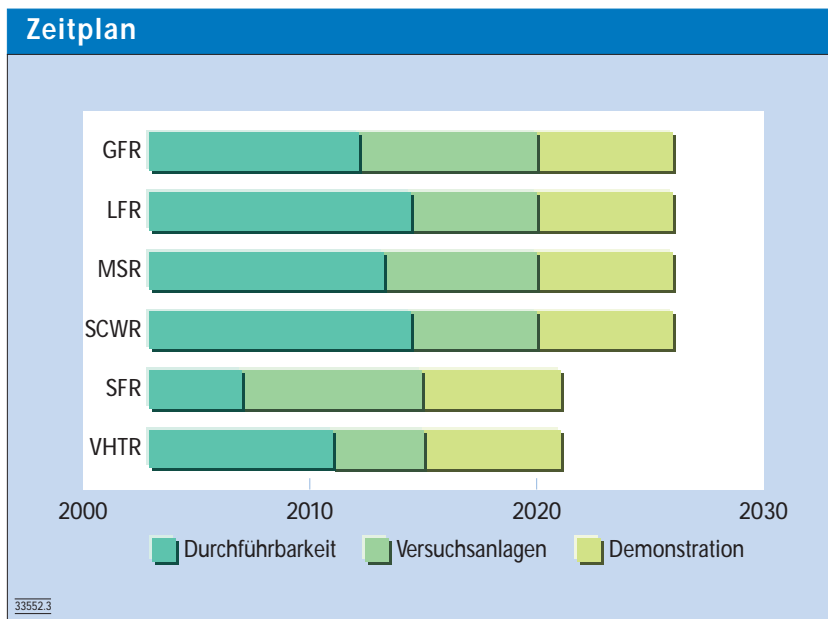


Bild 3. Zeithorizonte in der Roadmap

Quelle: DOE Technology Roadmap for Generation IV

gänglich wäre. Eine andere Variante wäre die Bestrahlung spaltbarer Transurane mit Teilchen aus einer externen Strahlungsquelle und nachfolgende Umwandlung in unschädliche Stoffe (Transmutation). Alle Überlegungen im Rahmen von GIF zum Brennstoffkreislauf richten sich auf eine möglichst vollständige Ausnutzung der natürlichen Uranressourcen bei gleichzeitiger

Minimierung der Gefahr illegaler Abzweigung von waffentauglichem Material. Eine weitere – in wenigen Jahren akute – Frage ist die Verfügbarkeit ausreichender Lagerstätten für verbrauchten Brennstoff. Einen Eindruck über den zu erwartenden Anfall vermittelt Bild 4. Die zeitliche Reichweite der Uranvorräte beim Einsatz unterschiedlicher Reaktortypen ist in Bild 5 dargestellt.

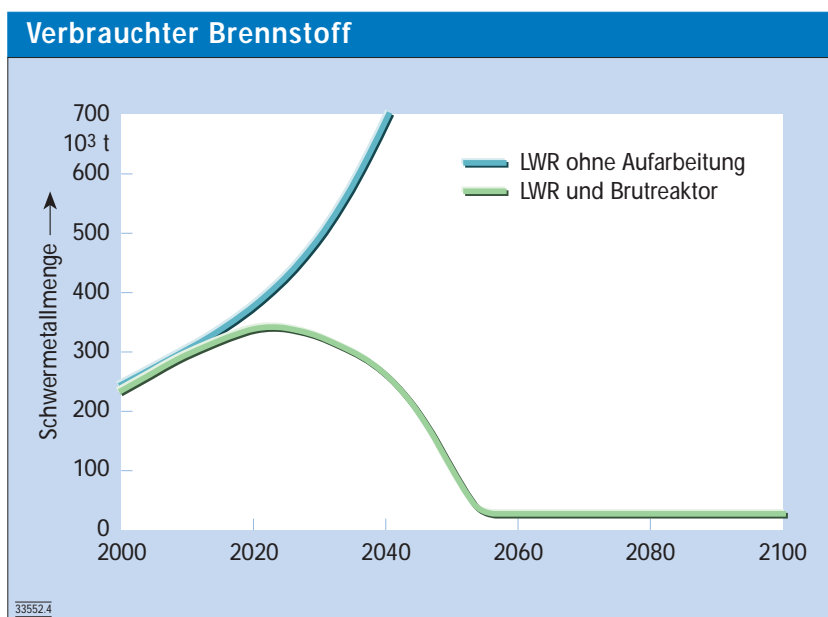


Bild 4. Mengen an endzulagerndem verbrauchten Brennstoff ohne Aufarbeitung bzw. mit Aufarbeitung und Rezyklierung in schnelle Brüter

Quelle: DOE Technology Roadmap for Generation IV

Wer bestimmt die internationale Agenda auf dem Gebiet der Kernenergie?

In einer Reihe von westlichen Ländern verursachen die gesellschaftlichen Kräfte eine politische Pattsituation, in der es ideologische Vorbehalte gegenüber manchen Energieträgern gibt, ohne dass angesichts eines möglichen Aus für Kyoto wirkliche Lösungen der CO₂-Problematik angeboten würden. Eine solche Sichtweise muss indessen zur Kenntnis nehmen, dass andere Länder die Kernenergie nach wie vor als reale energiepolitische Option einschätzen, wobei auf Seiten der Betreiber wie der Hersteller eine weitgehende länderübergreifende Standardisierung – nicht zuletzt im Blick auf sicherheitstechnische Erfordernisse – angestrebt wird (Kraftwerk von der Stange). Dabei können gerade Unterzeichner der VN-Klimarahmenkonvention – darunter in prominenter Weise die USA – eine Rechnung aufmachen, dass sie ein konkretes technisches Konzept umsetzen, das für den Klimaschutz mehr herausholt, als es das Sich-Verlassen auf nur Wind und Sonne bewirken könnte. Das kann gelten sowohl für Staaten, die das Kyoto-Protokoll unterzeichnet haben, z. B. Frankreich und Großbritannien, als auch für solche, die das bislang ablehnen, z. B. USA und Russland.

Das GIF ist eine multilaterale Veranstaltung unter amerikanischer technologischer Führung. Unübersichtlich ist die Analogie zu anderen Foren auf dem Gebiet neuer Energietechnologien, wie klimafreundliche Kohleverstromung oder Wasserstoff. Über die sechste Reaktor-Technologielinie des GIF, nämlich das Very-High-Temperature-Reactor System (VHTR), besteht eine enge Querverbindung zur International Partnership for the Hydrogen Economy (IHPE). Bei all diesen länderübergreifenden Aktivitäten ist Innovation ein vordergründiger Aspekt, während dahinter die Konturen des amerikanischen Anspruchs auf »leadership« im Kontext der Energie- und Klimapolitik sichtbar werden.

Nicht zuletzt ist ein Blick auf die Liste der Mitglieder des GIF von Interesse für die internationale Politik. Erinnert sei an die Auseinandersetzungen über die deutschen Lieferungen nach Brasilien und Argentinien in den 1970er Jahren sowie

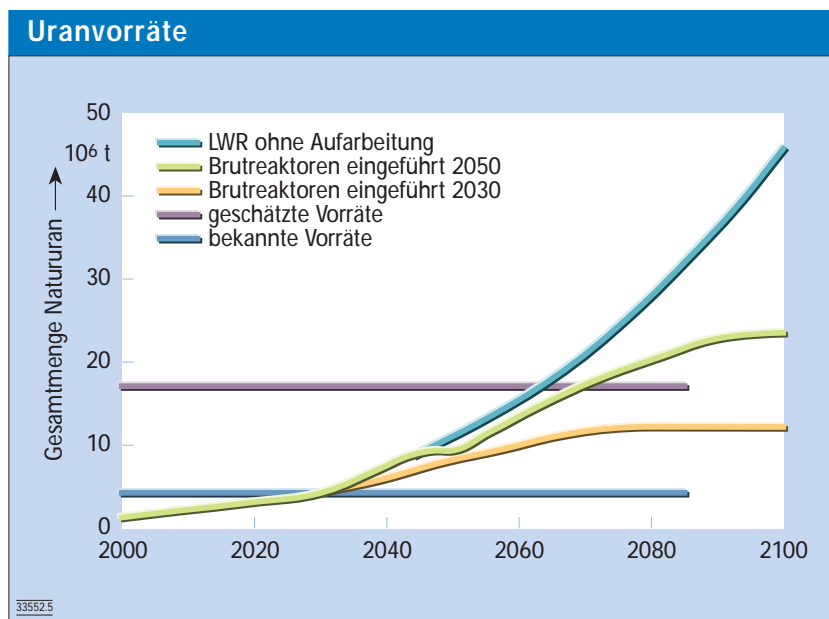


Bild 5. Zeitliche Reichweite der Uranvorräte beim Einsatz unterschiedlicher Reaktortypen
Quelle: DOE Technology Roadmap for Generation IV

die Nutzung der deutschen Trenndüsenttechnologie zur Urananreicherung durch Südafrika. Damit ist die nunmehrige Beteiligung dieser Länder, die ehemals auf Washingtons schwarzer Liste standen, unter amerikanischer Kuratel durchaus ein Politikum oder sogar ein Paradigmawechsel. Es bleibt zu sehen, ob auch Russland, China und Indien – nachdem entsprechende Einladungen schon ergangen sind – den Anschluss an das GIF finden.

Schlussbemerkung:
Die deutsche Stellung im internationalen Umfeld

Der deutsche Ausstieg aus der Kernenergienutzung bis zum Jahr 2020 sieht zunächst einmal wie eine fixe Rahmenbedingung aus. Es ist auch kaum zu erwarten, dass eine andere Bundesregierung als die derzeitige den Ausstieg mit einem Federstrich annullieren wird. Auf der anderen Seite sind seit jeher sowohl der technische Fortschritt als auch die wirtschaftlichen Beurteilungsmomente auf dem Gebiet der Kernenergienutzung – deutlich mehr als bei den traditionellen Energieträgern – von einer starken länderübergreifenden Vernetzung geprägt. Damit wird die deutsche Politik möglicherweise auf längere Sicht in eine Lage kommen, in der sie nollens volens mit technologischen Entwicklungen konfrontiert ist, die durch eine internationale Agenda

ohne deutsche Beteiligung bestimmt sind. Erste Anzeichen hierfür sind aktuelle Verlängerungen der staatlichen Betriebserlaubnis für amerikanische, kanadische und schwedische Kernkraftwerke [6].

Es könnte eine Lage eintreten, in der Deutschland eine Art nuklearenergiefreie Zone in der westlichen Welt bildet. Bei einem Ausbau der Kernenergie in unserer Nachbarschaft – etwa auch mit Nutzung der vom GIF untersuchten fortgeschrittenen Technologielinien durch Independent Power Producers (IPP) in Russland und in der Ukraine – sowie bei einer entsprechenden Verstärkung der Übertragungsnetze für elektrischen Strom könnte Deutschland zu einem Stromimportland werden.

Im Weiteren könnte eine Schwerpunktverlagerung der nukleartechnischen internationalen Kooperation vom atlantischen in den pazifischen Bereich stattfinden. Anzeichen dafür sind die oben angeführten amerikanischen Engagements in Fernost bei Reaktoren der Generation III. Auch die amerikanische Politik, bei der Standortauswahl für das multilaterale Fusionsprojekt International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) gegen den EU-Vorschlag Cadarache und für das japanische Angebot zu stimmen, passt in diese Richtung.

Soweit also bestehen für die deutsche Seite nur geringe Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Si-

cherheitskonzepte der im Ausland betriebenen Anlagen. Ein deutscher Entschluss, sich demgegenüber zur Verstärkung der eigenen Gestaltungsmöglichkeiten kooperativ in die internationale Entwicklung einzuklinken, könnte an Gebiete anknüpfen, wo – noch – hiesiges Know-how vorhanden ist. Das wäre in erster Linie der in die Generation III einzuordnende European Pressurized Water Reactor (EPR), für den es französisch-deutsche Vorstudien und sogar eine Kontaktaufnahme mit Russland gibt. Hinzu käme der in Jülich kurzzeitig betriebene Hochtemperaturreaktor, dessen Konzept (Pebble Bed) in jüngerer Zeit mehrfach vom amerikanischen Energieminister *Spencer Abraham* angesprochen wurde und als Vorläufer für eine Möglichkeit im Rahmen von Generation IV gilt. Beide Reaktortypen zeichnen sich durch

LITERATUR

erhöhte Sicherheit aus.

- [1] DOE Department of Energy (Hrsg.): A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Washington DC 2002, S. 19. <http://nuclear.gov/nerac/FinalRoadmapforNERACReview.pdf>.
- [2] *Guldner, R.*: Technische Perspektiven der Kernenergie. ETG Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.), Energietechnik für die Zukunft, Internationaler ETG-Kongress 2003, VDE-Verlag Berlin 2000.
- [3] Inel Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (Hrsg.): Generation IV Nuclear Energy Systems Initiative. www.inel.gov/initiatives/Generation.shtml.
- [4] *Kugeler, K.; Kugeler, M.; Phlippen, P.-W.*: Zukunft der Kernenergienutzung. Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), Symposium »Zukunft Strom« – Aspekte der künftigen Stromversorgung, Düsseldorf 24.1.2001.
- [5] *Müller, F.*: Kyoto-Protokoll vor dem Aus? SWP-Aktuell 40, Stiftung Wissenschaft und Politik Berlin, Oktober 2003.
- [6] Science and Environmental Policy Project (Hrsg.): Nuclear Energy Advances. The Week that Was, 6-March-2003. www.sepp.org.

(33552)