



---

## Sachstand

---

### Forschungsschwerpunkte und -mittel für Kernreaktoren der Generation IV

**Forschungsschwerpunkte und -mittel für Kernreaktoren der Generation IV**

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 007/19  
Abschluss der Arbeit: 18. Februar 2019  
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung  
und Forschung

---

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1.</b>	<b>Fünfte Generation der Atomreaktoren (Generation IV)</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Systeme und Ansätze der Generation IV</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Forschungsmittel im europäischen Kontext</b>	<b>10</b>
<b>4.</b>	<b>Fazit</b>	<b>12</b>
<b>5.</b>	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>12</b>

## 1. Fünfte Generation der Atomreaktoren (Generation IV)

Die Kernenergieforschung der ersten Generationen begann in den 50er Jahren, mit Generation II ab Mitte der 60er arbeiteten die Reaktoren in Kraftwerken für die Stromerzeugung. Die Reaktoren in Tschernobyl und Fukushima gehören zu dieser Generation. Verbesserte Leichtwasserreaktoren gehören zur Generation III und die Generation III+ ist durch die Verbesserung der Sicherheitskonzepte vorhandener und neuer Anlagen entstanden. Nach dem Atomausstieg Deutschlands geht die Kernenergieforschung weltweit weiter. Im Jahr 2001 haben sich neun Staaten zusammengeschlossen, um in den nächsten Dekaden die Generation IV (GenIV) zu entwickeln. Zunächst waren Argentinien, Brasilien, das Vereinigte Königreich, Frankreich, Japan, Kanada, Südafrika, Südkorea und die USA beteiligt, danach haben sich die Schweiz, Russland, China und Australien der GIF (Generation IV International Forum) angeschlossen. Die Europäische Atomgemeinschaft (Euratom) ist ebenfalls Mitglied der GIF und Deutschland damit indirekt an der GIF beteiligt.

Grundsätzliche Entwicklungsziele der sechs verschiedenen Reaktortypen sind die effektive Nutzung des Brennstoffs, erhebliche Reduzierung des Atommülls, Wettbewerbsfähigkeit, hohe Sicherheitsstandards und die Vermeidung von Missbrauch von waffenfähigem radioaktivem Material. Vier der sechs Reaktorsysteme haben sich in den letzten Jahrzehnten herausgebildet:

- SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor, schneller natriumgekühlter Reaktor); im Wesentlichen die Weiterentwicklung von seit Jahrzehnten bestehenden Reaktorsystemen
- VHTR (Very High Temperature Reactor, Höchsttemperaturreaktor); Weiterentwicklung der Hochtemperatur-Reaktoren, wie z. B. des Kugelhaufenreaktors
- LFR (Lead Cooled Fast Reactor, schneller bleigekühlter Reaktor); Weiterentwicklung von bestehenden kleinen Reaktoren für Schiffsantriebe
- MSR (Molten Salt Reactor, Flüssigsalzreaktor),

wobei sich SFR und VHTR am stärksten durchgesetzt haben. Die beiden übrigen Reaktorsysteme sind der GFR (Gas-cooled Fast Reactor, schneller gasgekühlter Reaktor) und der SCWR (Super-Critical Water-Cooled Reactor, überkritischer Leichtwasserreaktor). Hinzu kommen kleine leistungsfähige Anlagen, die unter den Begriff SMR (Small Modular Reactor) fallen.<sup>1</sup> Die grundsätzlichen Ziele der Reaktorsysteme finden sich auf den Internetseiten des „Generation IV Forum“,

---

1 Spektrum der Wissenschaft (2017). „Kernkraftwerke der Zukunft“, [https://www.spektrum.de/news/kernkraftwerke-der-zukunft/1527265Nuklear\\_Forum\\_Schweiz](https://www.spektrum.de/news/kernkraftwerke-der-zukunft/1527265Nuklear_Forum_Schweiz)

Nuklear Forum Schweiz (2018). Faktenblatt „Reaktorsysteme der Zukunft“, [https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713\\_Faktenblatt-Reaktorsysteme-der-Zukunft\\_d\\_Web.pdf](https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713_Faktenblatt-Reaktorsysteme-der-Zukunft_d_Web.pdf)

Swissnuclear (2019). „Kernspaltung“, <https://www.kernenergie.ch/de/zukunft/kerntechnik.html>

Generation IV International Forum (GIF) (2019). „Technology Systems“, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9353/systems](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9353/systems)

(GIF).<sup>2</sup> Eine Übersicht zu Forschungsstand und den zukünftigen Herausforderungen der Generation IV liefert auch der Artikel: “Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects“<sup>3</sup>.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den wichtigsten Forschungsfeldern der Generation IV und deren Mittel für Forschung, Entwicklung bzw. Demonstration<sup>4</sup>.

## 2. Systeme und Ansätze der Generation IV

Eine Übersicht zeigt die Einordnung der sechs Entwicklungsbereiche und verdeutlicht, welches System als „thermal“, „fast“ oder zu beiden Arten gehört. Die beiden ersten Systeme genießen in diesem Kontext höchste Priorität, danach folgen die beiden mit der niedrigsten.<sup>5</sup>

Overview of Generation IV Systems

System	Neutron spectrum	Coolant	Outlet Temperature °C	Fuel cycle	Size (MW <sub>e</sub> )
<b>VHTR</b> (Very-high-temperature reactor)	Thermal	Helium	900-1000	Open	250-300
<b>SFR</b> (Sodium-cooled fast reactor)	Fast	Sodium	500-550	Closed	50-150 300-1500 600-1500
<b>SCWR</b> (Supercritical-water-cooled reactor)	Thermal/fast	Water	510-625	Open/closed	300-700 1000-1500
<b>GFR</b> (Gas-cooled fast reactor)	Fast	Helium	850	Closed	1 200
<b>LFR</b> (Lead-cooled fast reactor)	Fast	Lead	480-570	Closed	20-180 300-1200 600-1000
<b>MSR</b> (Molten salt reactor)	Thermal/fast	Fluoride salts	700-800	Closed	1000

Einige Gen IV-Konzepte lassen sich auch modular umsetzen und fallen unter den Begriff „SMR (Small Modular Reactor)“. Die Idee des modularen Aufbaus gab es schon in den 50er Jahren und hat in den letzten Jahren zunehmend auf für die Generation IV im Kontext einer „zeitlich schnellen Überführung in den Betrieb“ an Bedeutung gewonnen.

Der Fokus der technologischen Entwicklung liegt stark auf der Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit. Entsprechende Arbeitsgruppen der GIF sollen die Ergebnisse forcieren und helfen,

2 Generation IV International Forum (GIF) (2019). „Generation IV Goals“, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9502/generation-iv-goals](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9502/generation-iv-goals)

3 Locatelle, G. (2013). “Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects“, <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S0301421513006083?via%3Dihub>

4 Als Demonstrationsanlagen gelten Reaktorsysteme, die ihre Sicherheit und Wirtschaftlichkeit noch nicht nachgewiesen haben und noch nicht zertifiziert sind.

5 Generation IV International Forum (2019). „Technology Systems“, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9353/systems](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9353/systems)

ein technologieneutrales Arbeitsmittel zu schaffen, um die Sicherheitskriterien aller Gen IV-Systeme evaluieren zu können (Integrated Assessment Methodology, ISAM). Das Generation IV Forum sieht Gen-IV-SMRs-Technologien als Möglichkeit, Kernenergie im Sinne des Klimaschutzes als nachhaltige Technologie einzusetzen, um fossile Anwendungen zu ersetzen und CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen. Das Interesse potentieller Betreiber, speziell an modularen Systemen, soll genutzt und Forschung und Entwicklung und wirtschaftliche Interessen zusammen gebracht werden. Hinzu kommen Aktivitäten, wie Ausbildung und Training insbesondere für junge Wissenschaftler, um diese für die Entwicklung der neuen nuklearen Systeme gewinnen zu können.<sup>6</sup>

Im Jahr 2016 hat beispielsweise die China General Nuclear Power Corporation (CGN) mit dem Bau eines schwimmenden Demonstrationskernkraftwerks begonnen. Das Kernkraftwerk ist mit einem Vielzweck-Offshore-Reaktor des Typs ACPR50S ausgestattet. Er stellt bis zu 60 Megawatt elektrische Leistung bereit. Zudem soll seine Wärmeenergie zur Entsalzung von Meerwasser verwendet werden können. Schwimmende Kernkraftwerke sollen, wie auch erneuerbare Energieerzeugungstechnologien, zur Versorgung von Inseln, abgelegenen Küstengebieten oder Offshore-Öl- und Gasförderanlagen geeignet sein. Die erste Stromerzeugung wird für 2020 erwartet.<sup>7</sup>

Beschreibungen zu den einzelnen Gen IV-Technologien, ihren technologischen Forschungsschwerpunkten und den Schwerpunkten einzelner Länder finden sich u. a. im Jahresreport der GIF.<sup>8</sup>

Das Öko-Institut hat in seiner umfangreichen Analyse zum Forschungsstand der neuen Reaktorsysteme ausgewählte Reaktorsysteme untersucht. In den einzelnen Zusammenfassungen der Analyse sind die Vor- und Nachteile der Forschungskriterien beschrieben:

„Im Rahmen dieser Studie werden der gegenwärtige Entwicklungsstand verschiedener ausgewählter Reaktorkonzepte dargestellt, ausgewählte historische Erfahrungen mit der

- 
- 6 Europäische Kommission (2016). „Nuclear Illustrative Programme presented under Article 40 of the Euratom Treaty for the opinion of the European Economic and Social Committee“, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1\\_EN\\_autre\\_document\\_travail\\_service\\_part1\\_v10.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_autre_document_travail_service_part1_v10.pdf), Kap. 3.5
- Generation IV International Forum (2017). „GIF Annual Report“, [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif\\_annual\\_report\\_2017\\_210918.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif_annual_report_2017_210918.pdf), Seite 3-4
- 7 Nuklearforum Schweiz (2016). „China baut schwimmendes Kernkraftwerk“, [https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/Kernpunkte\\_11\\_16\\_dt.pdf](https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/Kernpunkte_11_16_dt.pdf)
- 8 Generation IV International Forum (2017). „GIF Annual Report“, [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif\\_annual\\_report\\_2017\\_210918.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif_annual_report_2017_210918.pdf), Kap. 2 und 3
- Institute de Radioprotection de Sûreté Nucléaire (IRSN) (2015). „Review of Generation IV Nuclear Energy Systems“, [https://www.irsn.fr/en/newsroom/news/documents/irsn\\_report-geniv\\_04-2015.pdf](https://www.irsn.fr/en/newsroom/news/documents/irsn_report-geniv_04-2015.pdf)
- United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC). (2018). „Backgrounder on Research and Test Reactors“, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/research-reactors-bg.html>
- Der Tagesspiegel (2010). „Das vierte Atomzeitalter“, 14.6.2010, <https://www.tagesspiegel.de/wissen/kernenergie-das-vierte-atomzeitalter/1858826.html>

Entwicklung solcher Reaktorsysteme zusammengefasst und eine grundsätzliche Bewertung der Erreichbarkeit der postulierten Vorteile der jeweiligen Systeme mit Blick auf verschiedene Bewertungskriterien (Sicherheit, Ressourcen und Brennstoffversorgung, Abfallproblematik, Ökonomie und Proliferation) vorgenommen. Bei den betrachteten Systemen handelt es sich um Schnelle Brutreaktoren (FBR), Hochtemperatur-Reaktoren (HTR), Salzschnmelze-Reaktoren (MSR) und kleine, modulare Reaktoren (SMR). Keines dieser Reaktorkonzepte konnte – trotz teilweise bereits jahrzehntelanger Forschung und Entwicklung – bisher erfolgreich am Markt etabliert werden.

Übergeordnet kann festgestellt werden, dass zwar einzelne Reaktorkonzepte in einzelnen Bereichen tatsächlich potenzielle Vorteile gegenüber der heutigen Generation von Kernkraftwerken erwarten lassen. Kein Konzept ist jedoch in der Lage, gleichzeitig in allen Bereichen Fortschritte zu erzielen. Vielfach stehen die einzelnen Kriterien untereinander im Wettbewerb, so dass Fortschritte in einem Bereich zu Nachteilen bei anderen Bereichen führen. So führen beispielsweise häufig Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit zu Nachteilen im Bereich der Ökonomie, Vorteile bei der Ressourcenausnutzung stehen vielfach im Widerspruch zu einer Verbesserung im Bereich der Proliferation. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass ein Reaktorkonzept, welches nur in einzelnen Bereichen Fortschritte bietet, zu einer deutlich verbesserten gesellschaftlichen Akzeptanz der Kernenergienutzung beitragen könnte.“<sup>9</sup>

Die Berichte aus der Kernenergieindustrie sind dagegen deutlich positiver. Insbesondere im Bereich SMR gehen die Betreiber von baldiger erfolgreicher Umsetzung aus.<sup>10</sup>

Die europäische „Sustainable Nuclear Energy Technology Platform“ (SNETP) soll helfen, die Forschungsziele der „Strategischen Forschungs- und Innovationsagenda“ (SRIA, ehemals SRA) der über 70 Mitglieder umzusetzen. Die Forschung soll zum europäischen Strategieplan (Strategic Energy Technology Plan, SET Plan) im Rahmen der europäischen Energiepolitik und der „European Sustainable Nuclear Industrial Initiative“ (ESNII) beitragen.“ Der „SET plan“ sieht vor, dass die „Kernspaltungsenergieerzeugung durch Anlagen der Generation IV und Fusionsenergie“ bis zum Jahr 2050 „mit einem großen Anteil“ zum Energiemix beiträgt.

---

9 Öko-Institut e.V. im Auftrag der Schweizer Energiestiftung (2017). „Neue Reaktorkonzepte. Eine Analyse des aktuellen Forschungsstands.“, [https://energiestiftung.ch/files/energiestiftung/publikationen/pdf/2017\\_Oeko-Institut\\_Gen\\_IV.pdf](https://energiestiftung.ch/files/energiestiftung/publikationen/pdf/2017_Oeko-Institut_Gen_IV.pdf)

10 Nuklear Forum Schweiz (2018). Faktenblatt „Reaktorsysteme der Zukunft“, [https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713\\_Faktenblatt-Reaktorsysteme-der-Zukunft\\_d\\_Web.pdf](https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713_Faktenblatt-Reaktorsysteme-der-Zukunft_d_Web.pdf)

Odenwald, M., Weather Channel Burda, (2016). Amerikas Energieplan: Neue Generation von AKW soll Kernkraft revolutionieren“, <https://weather.com/de-DE/wissen/klima/news/zuruck-zur-atomkraft-usa-bauern-neue-akw-unter-der-erde>

Süddeutsche Zeitung (2019). „Atomenergie – Kernkraft fürs Klima?“, vom 4.2.2019, <https://www.sueddeutsche.de/wissen/kernenergie-klimawandel-atomkraft-gates-laufwellenreaktor-1.4312993>

Nuklear Forum Schweiz (2018). Faktenblatt „Innovativer Reaktor mit Kugeln als Brennstoff“, [https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713\\_Kugelhaufenreaktor\\_d\\_Web.pdf](https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713_Kugelhaufenreaktor_d_Web.pdf)

Die SNET-Plattform umfasst verschiedene Forschungsthemen. Dazu gehören der Bau des mit Natrium gekühlten Schnellen Reaktors „Astrid“, der bleigekühlte Schnelle Reaktor „Alfred“ und der gasgekühlte Schnelle Hochtemperatur-Reaktor „Allegro“ und der multidisziplinäre Forschungsreaktor „Myrrha“, der mit einem externen Beschleunigersystem (Accelerator, Driven System, ADS) betrieben wird und neben der Reaktorforschung zur Forschung über radioaktive Abfälle dienen soll.<sup>11</sup>

Die European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) fördert die Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsprojekte und die Überführung der Projekte wie „Astrid“, „Myrrha“, „Alfred“ und „Allegro“ in den Betrieb.

Für eine nachhaltige und effiziente Kernenergienutzung wird die Entwicklung eines weitgehend geschlossenen Kernbrennstoffkreislaufs in den Fokus der Forschung gerückt. Innovative Konzepte beinhalten neben der Rezyklierung von Uran und Plutonium auch die Abtrennung langlebiger Radionuklide aus abgebranntem Kernbrennstoff und ihre anschließende Transmutation in kurzlebige und stabile Isotope. Im Rahmen des Projekts „Myrrha“ forscht das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit 36 Partnern im Rahmen der Gen IV-Projekte an der Transmutation. Dabei sollen besonders problematische radioaktive Elemente gezielt aus den abgebrannten Brennelementen abgetrennt (Partitioning) und in weniger langlebige Isotope umgewandelt (Transmutation) werden. Bisher gelang dies nur im Labormaßstab.<sup>12</sup>

Die Gesamtkosten für die Entwicklung der oben genannten Demonstrationsanlagen werden auf 8 bis 9 Milliarden Euro geschätzt.<sup>13</sup>

---

11 Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP) (2013). „Strategic Research and Innovation Agenda“, [http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2014/05/sria2013\\_web.pdf](http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2014/05/sria2013_web.pdf)

Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP) (2013). „Strategic Research and Innovation Agenda (SRA) Results of the public consultation (17 Dec – 10 January 2013)“, [http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2014/04/snetp\\_sria\\_public\\_consultation\\_comments\\_answers\\_final.pdf](http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2014/04/snetp_sria_public_consultation_comments_answers_final.pdf)

Europäische Kommission „Strategic Energy Technology Plan“, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan>

Europäische Kommission (2007). Mitteilung „Auf dem Weg zu einem Europäischen Strategieplan für Energietechnologie“, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0847&from=EN>

12 Deutsche Physikalische Gesellschaft, DPG-Vortragsreihe (2010). „Nachhaltige Kernenergie – Wege zu einem geschlossenen Kernbrennstoffkreislauf“, <https://www.dpg-physik.de/veranstaltungen/2010/nachhaltige-kernenergie-wege-zu-einem-geschlossenen-kernbrennstoffkreislauf>

Helmholtz Gemeinschaft, (2011). „Geschäftsbericht 2011“, [http://www.helmholtz.de/fileadmin/user\\_upload/publikationen/Geschaeftsberichte/Helmholtz\\_GB2011.pdf](http://www.helmholtz.de/fileadmin/user_upload/publikationen/Geschaeftsberichte/Helmholtz_GB2011.pdf)

13 Europäische Kommission (2016). „Nuclear Illustrative Programme presented under Article 40 of the Euratom Treaty for the opinion of the European Economic and Social Committee“, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1\\_EN\\_autre\\_document\\_travail\\_service\\_part1\\_v10.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_autre_document_travail_service_part1_v10.pdf) Seite 20



Auf der internationalen IAEA-Konferenz<sup>14</sup> im Jahr 2017 wurden Ergebnisse zur Entwicklung im Bereich der schnellen Reaktoren und der damit verbundenen Brennstoffkreislauftechnologien vorgestellt und mögliche Maßnahmen diskutiert. Beiträge einzelner Länder und ausführliche Zusammenfassungen von Euratom, GIF, OECD, und IAEA wurden ebenfalls publiziert. Beispielsweise beschreibt ein Artikel von Forschern aus Russland Probleme und Ansätze von Forschungsaktivitäten zu Schnellen Brütern der Generation IV (BREST-Reaktor) im Rahmen des Projekts "PRORYV" von 2010-2015. Die Autoren sind zuversichtlich, diesen Reaktortyp in den Betrieb überführen zu können. Der erste des Demonstrationsprojekts soll 2020 starten. Russland ist derzeit der Hauptentwickler des natriumgekühlten Schnellen Reaktors (BREST-Reaktor).<sup>15</sup> In einem Vortrag berichten Forscher aus Frankreich beispielsweise über die Forschung am natriumgekühlten Schnellen Brüter, des sich bis 2019 in der Planungsphase befindenden ASTRID-Projekts.<sup>16</sup> Eine Zusammenfassung der Forschungsaktivitäten liefert die Eröffnungsrede der Konferenz: „Fast Reactor Development and International Cooperation“.<sup>17</sup> Ebenfalls Informationen über Forschungsaktivitäten zu natriumgekühlten Schnellen Brütern liefern Forscher aus Indien.<sup>18</sup> Abstracts zu den einzelnen Sessions wie: Innovation Fast Reactor Designs, Fast Reactor Operation and Decommissioning, Fast Reactor Safety Design, Fuel Cycle Sustainability, Environmental Considerations and Waste Management, Fast Reactor Materials (Fuels and Structures) and Technology, Fast Reactors, Experiments, Modelling and Simulations, Fast Reactors and Fuel Cycles: Economics, Deployment and Proliferation Issues; Professional Development and Knowledge Management geben eine Übersicht über das enorme Spektrum von Forschung und Entwicklung allein zu den Schnellen Brütern.

- 
- 14 International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017). „Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, <https://www.iaea.org/events/fr17>
- 15 Adamov, E.O. ITC "PRORYV" Project, Moscow, Russian Federation, International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017). „Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development FR17“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, „Closed Fuel Cycle Technologies Based on Fast Reactors as the Corner Stone for Sustainable Development of Nuclear Power“, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1836web.pdf>, Seite 17-34
- Generation IV International Forum (GIF) (2017). „Annual Report 2017“, [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif\\_annual\\_report\\_2017\\_210918.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif_annual_report_2017_210918.pdf), Seite 33
- 16 Pivet, S., Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Paris (2017). „France Status of the French Fast Reactor Programme“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, „Closed Fuel Cycle Technologies Based on Fast Reactors as the Corner Stone for Sustainable Development of Nuclear Power“, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1836web.pdf>, Seite 36 - 39
- 17 Cheatal, S.C. (2017). „Fast Reactor Development and International Cooperation“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1836web.pdf>, Seite 6
- 18 Bhaduri, A. K., Puthiyavinayagam, P., Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam-603012, India (2017). „Indian Fast Reactor Programme: Status and R&D Achievements“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, „Closed Fuel Cycle Technologies Based on Fast Reactors as the Corner Stone for Sustainable Development of Nuclear Power“, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1836web.pdf>, Seite 40-54

### 3. Forschungsmittel im europäischen Kontext

„Die Forschung auf dem Gebiet der Kernenergie in Europa wird durch mehrjährige Rahmenprogramme finanziert. Das Programm Euratom für Forschung und Ausbildung auf dem Gebiet der Kernenergie ist eine eigenständige Ergänzung des europäischen Rahmenprogramms für Forschung und Innovation „Horizont 2020“. Für den Zeitraum 2014-2018 wurden für das Programm Euratom 1.608 Mio. EUR zur Verfügung gestellt. Die Mittel wurden auf drei Einzelbereiche verteilt: indirekte Maßnahmen zu Fusionsforschung (728 Mio. EUR), indirekte Maßnahmen zu Kernspaltung und Strahlenschutz (315 Mio. EUR) und direkte Maßnahmen der Gemeinsamen Forschungsstelle der Kommission (559 Mio. EUR).“<sup>19</sup>

Die Gesamtkosten, die zwischen 2015 und 2050 für Forschung zum nuklearen Brennstoff-Kreislauf ausgegeben werden sollen, werden auf 650 bis 760 Milliarden Euro geschätzt.<sup>20</sup>

Mittel aus dem aktuellen Zeitraum (2019-2020) des Euratom-Programms sind mit 770.220.000 Euro veranschlagt. Von diesem Betrag entfallen 349.834.000 Euro für indirekte Maßnahmen für das Fusionsforschungs- und -entwicklungsprogramm, 151.579.000 Euro für indirekte Maßnahmen im Bereich Kernspaltung, nukleare Sicherheit und Strahlenschutz und 268.807.000 Euro für direkte Maßnahmen.<sup>21</sup>

---

19 Gouarderes, F. (2018). „Kernenergie“, [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches\\_techniques/2017/N54594/de.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches_techniques/2017/N54594/de.pdf)

Europäisches Parlament (EPRS) (2015). „Overview of EU Funds for research and innovation“, [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568327/EPRS\\_BRI\(2015\)568327\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568327/EPRS_BRI(2015)568327_EN.pdf)

Europäische Union (2013). Verordnung des Rates (Euratom) Nr. 1314/2013 über das Programm der Europäischen Atomgemeinschaft für Forschung und Ausbildung (2014-2018) in Ergänzung des Rahmenprogramms für Forschung und Innovation Horizont 2020, Artikel 4 „Haushaltsmittel“: Der Finanzrahmen für die Durchführung des Euratom Programms beträgt 1.603.329.000 EUR. Dieser Betrag wird wie folgt aufgeteilt: a) indirekte Maßnahmen für das Fusionsforschungs- und -entwicklungsprogramm: 728.232.000 EUR, b) indirekte Maßnahmen im Bereich Kernspaltung, nukleare Sicherheit und Strahlenschutz: 315.535.000 EUR, c) direkte Maßnahmen: 559.562.000 EUR. Bei der Durchführung der indirekten Maßnahmen des Euratom Programms entfallen während der Laufzeit des Programms durchschnittlich bis zu 7 % und im Jahr 2018 höchstens 6 % auf Verwaltungsausgaben der Kommission.

20 Europäische Kommission (2016). „Nuclear Illustrative Programme“, <http://ec.europa.eu/transparency/reg-doc/rep/1/2016/EN/1-2016-177-EN-F1-1.PDF>

21 Europäische Union (2018). Verordnung 2018/1563 des Rates vom 15. Oktober 2018 über das Programm der Europäischen Atomgemeinschaft für Forschung und Ausbildung (2019-2020) in Ergänzung des Rahmenprogramms für Forschung und Innovation Horizont 2020 und zur Aufhebung der Verordnung (Euratom) Nr. 1314/2013, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1563&from=EN>

Für das Jahr 2019 wurden von der Europäischen Kommission Mittel in Höhe von 19.000.000 Euro für den Bereich „Nuclear safeguards“ und 2.000.000 Euro für „Nuclear safety and protection against radiation“ veranschlagt.<sup>22</sup>

Die aktuelle Planung im Rahmen des „Euratom Research and Training Programme 2019-2020“ ist in sechs Bereiche eingeteilt: Nukleare Sicherheit, Rückbau und Sanierung, Entsorgung, Ausbildung und Training, Strahlenschutz und medizinische Anwendungen und Forschungsinfrastruktur. Im Bereich „European Research Programme and Training“ sind aktuell verschiedene Projekte geplant. Beispielsweise „Support for safety research of Small Modular Reactors“, „Safety Research and Innovation for advanced nuclear systems“, „Safety Research and Innovation for Partitioning and/or Transmutation“, „Towards joint European effort in area of nuclear materials“ oder „Optimised use of European research reactors“.<sup>23</sup>

Nach Angaben der World Nuclear Association belaufen sich die geschätzten Gesamtkosten für die Zeit nach 2020 im Rahmen von ESNII für den Einsatz der Gen-IV-Prototypen auf 10,8 Mrd. Euro: Davon entfallen 5 Mrd. Euro für ASTRID, 1,96 Mrd. Euro für ALFRED und MYRRHA und 1,2 Mrd. Euro für ALLEGRO. Die Kosten für die Unterstützung der Infrastruktur werden auf 2,65 Mrd. Euro geschätzt. Das ESNII-Budget für den Zeitraum von 2010 bis 2012 betrug 527 Mio. Euro, davon allein waren 329 Mio. Euro für ASTRID.<sup>24</sup>

Das GIF hat im Jahr 2007 ein theoretisches Modell der Kostenschätzungen für den Bau von Reaktorsystemen der Generation IV erarbeitet. Das Modell besteht aus vier Teilen: Konstruktion und Produktion, Brennstoffkreislauf, Energieprodukte und Modularisierung. Auch die einzelnen Schritte des Entwicklungsprozesses wie z. B. erste Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die Konzeptentwicklung und -abnahme, Vorentwurf, Ausführungsplanung, Konstruktion und Wirtschaftlichkeit wurden betrachtet. Damit sollen neben den Forschungsmitteln auch die benötigten Betriebskosten geschätzt werden können.<sup>25</sup> Anhand eines konkreten Beispiels (russischer BREST-Reaktor) wurden mögliche Investitionskosten geschätzt.<sup>26</sup>

---

22 Europäische Kommission (2018). „Commission Decision of 12.12.2018 on the adoption of the annual work programme in the field of energy for 2019“, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/c\\_2018\\_8399\\_ener\\_2019\\_f1\\_commission\\_decision\\_en\\_v2\\_p1\\_1003784.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/c_2018_8399_ener_2019_f1_commission_decision_en_v2_p1_1003784.pdf)

23 Europäische Kommission (2018). „Commission of Implementing Decision of 14.12.2018 on the financing of indirect actions within the framework of Council Regulation (Euratom) No 2018/1563 and on the adoption of the work programme for 2019-2020“, [http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/euratom/h2020-wp1920-euratom\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/euratom/h2020-wp1920-euratom_en.pdf)

24 World Nuclear Association (2017). „Generation IV Nuclear Reactors“, <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>

25 Generation IV International Forum (GIF) (2007). „Cost estimating guidelines for Generation IV systems“, [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg\\_guidelines.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg_guidelines.pdf) Seite 119

26 Goltsov, N. Molokanov (2017). „Equipment Cost Estimation for Pilot Demonstration Lead-Cooled Fast-Neutron Reactor BREST-OD-300“ International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR-17) Yekaterinburg, Russian Federation 26-29 June 2017, <https://media.superevent.com/documents/20170620/c90048de4d4516eddafc6523211cf77d/fr17-536.pdf>

#### 4. Fazit

Forschungsaktivitäten im nuklearen Reaktorbau sind umfangreich und müssen langfristig, in Dekaden geplant werden. Nicht nur der sichere technische Betrieb des Reaktors, sondern auch die Reduzierung des Brennstoffs, die Endlagerproblematik und die Vermeidung von Proliferationsrisiken gehören zu einer modernen Entwicklung neuer Reaktor-Generationen. Ob ein Reaktorkonzept in Betrieb gehen kann, hängt auch davon ab, ob die Sicherheitsvorgaben erfüllt werden können. Die Betriebsgenehmigung hängt letztlich von den Vorgaben der einzelnen Staaten ab.

#### 5. Quellenverzeichnis

Adamov, E.O. ITC "PRORYV" Project, Moscow, Russian Federation, International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017). „Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development FR17“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, „Closed Fuel Cycle Technologies Based on Fast Reactors as the Corner Stone for Sustainable Development of Nuclear Power“, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1836web.pdf>

Bhaduri, A. K., Puthiyavinayagam, P., Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam-603012, India (2017). „Indian Fast Reactor Programme: Status and R&D Achievements“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, „Closed Fuel Cycle Technologies Based on Fast Reactors as the Corner Stone for Sustainable Development of Nuclear Power“, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1836web.pdf>

Cheatal, S.C. (2017). „Fast Reactor Development and International Cooperation“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1836web.pdf>

Der Tagesspiegel (2010). „Das vierte Atomzeitalter“, 14.6.2010, <https://www.tagesspiegel.de/wissen/kernenergie-das-vierte-atomzeitalter/1858826.html>

Deutsche Physikalische Gesellschaft, DPG-Vortragsreihe (2010). „Nachhaltige Kernenergie – Wege zu einem geschlossenen Kernbrennstoffkreislauf“, <https://www.dpg-physik.de/veranstaltungen/2010/nachhaltige-kernenergie-wege-zu-einem-geschlossenen-kernbrennstoffkreislauf>

Europäische Kommission (2007). Mitteilung „Auf dem Weg zu einem Europäischen Strategieplan für Energietechnologie“, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0847&from=EN>

Europäische Kommission (2016). „Nuclear Illustrative Programme presented under Article 40 of the Euratom Treaty for the opinion of the European Economic and Social Committee“, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1\\_EN\\_autre\\_document\\_travail\\_service\\_part1\\_v10.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_autre_document_travail_service_part1_v10.pdf)

Europäische Kommission (2016). „Nuclear Illustrative Programme“, <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2016/EN/1-2016-177-EN-F1-1.PDF>

---

Europäische Kommission (2018). „Commission Decision of 12.12.2018 on the adoption of the annual work programme in the field of energy for 2019“, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/c\\_2018\\_8399\\_ener\\_2019\\_f1\\_commission\\_decision\\_en\\_v2\\_p1\\_1003784.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/c_2018_8399_ener_2019_f1_commission_decision_en_v2_p1_1003784.pdf)

Europäische Kommission (2018). „Commission of Implementing Decision of 14.12.2018 on the financing of indirect actions within the framework of Council Regulation (Euratom) No 2018/1563 and on the adoption of the work programme for 2019-2020“, [http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/euratom/h2020-wp1920-euratom\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/euratom/h2020-wp1920-euratom_en.pdf)

Europäische Kommission „Strategic Energy Technology Plan“, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan>

Europäische Union (2018). Verordnung 2018/1563 des Rates vom 15. Oktober 2018 über das Programm der Europäischen Atomgemeinschaft für Forschung und Ausbildung (2019-2020) in Ergänzung des Rahmenprogramms für Forschung und Innovation Horizont 2020 und zur Aufhebung der Verordnung (Euratom) Nr. 1314/2013, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1563&from=EN>

Europäisches Parlament (EPRS) (2015). „Overview of EU Funds for research and innovation“, [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568327/EPRS\\_BRI\(2015\)568327\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568327/EPRS_BRI(2015)568327_EN.pdf)

Generation IV International Forum (GIF) (2007). „Cost estimating guidelines for Generation IV systems“, [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg\\_guidelines.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg_guidelines.pdf)

Generation IV International Forum (GIF) (2017). „Annual Report 2017“, [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif\\_annual\\_report\\_2017\\_210918.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-09/gif_annual_report_2017_210918.pdf)

Generation IV International Forum (GIF) (2019). „Generation IV Goals“, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9502/generation-iv-goals](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9502/generation-iv-goals)

Generation IV International Forum (GIF) (2019). „Technology Systems“, [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9353/systems](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9353/systems)

Goltsov, N. Molokanov (2017). „Equipment Cost Estimation for Pilot Demonstration Lead-Cooled Fast-Neutron Reactor BREST-OD-300“ International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR-17) Yekaterinburg, Russian Federation 26-29 June 2017, <https://media.superevent.com/documents/20170620/c90048de4d4516eddaf6523211cf77d/fr17-536.pdf>

Gouarderes, F. (2018). „Kernenergie“, [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches\\_techniques/2017/N54594/de.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches_techniques/2017/N54594/de.pdf)

Helmholtz Gemeinschaft, (2011). „Geschäftsbericht 2011“, [http://www.helmholtz.de/fileadmin/user\\_upload/publikationen/Geschaeftsberichte/Helmholtz\\_GB2011.pdf](http://www.helmholtz.de/fileadmin/user_upload/publikationen/Geschaeftsberichte/Helmholtz_GB2011.pdf)

---

Institute de Radioprotection de Sûreté Nucléaire (IRSN) (2015). „Review of Generation IV Nuclear Energy Systems“, [https://www.irsn.fr/en/newsroom/news/documents/irsn\\_report-geniv\\_04-2015.pdf](https://www.irsn.fr/en/newsroom/news/documents/irsn_report-geniv_04-2015.pdf)

International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017). „Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, <https://www.iaea.org/events/fr17>

Locatelle, G. (2013). „Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects“, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513006083?via%3Dihub>

Nuklear Forum Schweiz (2018). Faktenblatt „Innovativer Reaktor mit Kugeln als Brennstoff“, [https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713\\_Kugelhaufenreaktor\\_d\\_Web.pdf](https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713_Kugelhaufenreaktor_d_Web.pdf)

Nuklear Forum Schweiz (2018). Faktenblatt „Reaktorsysteme der Zukunft“, [https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713\\_Faktenblatt-Reaktorsysteme-der-Zukunft\\_d\\_Web.pdf](https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/180713_Faktenblatt-Reaktorsysteme-der-Zukunft_d_Web.pdf)

Nuklearforum Schweiz (2016). „China baut schwimmendes Kernkraftwerk“, [https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/Kernpunkte\\_11\\_16\\_dt.pdf](https://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/Kernpunkte_11_16_dt.pdf)

Odenwald, M., Weather Channel Burda, (2016). Amerikas Energieplan: Neue Generation von AKW soll Kernkraft revolutionieren“, <https://weather.com/de-DE/wissen/klima/news/zurueck-zur-atomkraft-usa-bauern-neue-akw-unter-der-erde>

Öko-Institut e.V. im Auftrag der Schweizer Energiestiftung (2017). „Neue Reaktorkonzepte. Eine Analyse des aktuellen Forschungsstands.“, [https://energiestiftung.ch/files/energiestiftung/publikationen/pdf/2017\\_Oeko-Institut\\_Gen\\_IV.pdf](https://energiestiftung.ch/files/energiestiftung/publikationen/pdf/2017_Oeko-Institut_Gen_IV.pdf)

Pivet, S., Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Paris (2017). „FranceStatus of the French Fast Reactor Programme“, Proceedings of an International Conference Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, „Closed Fuel Cycle Technologies Based on Fast Reactors as the Corner Stone for Sustainable Development of Nuclear Power“, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1836web.pdf>

Spektrum der Wissenschaft (2017). „Kernkraftwerke der Zukunft“, <https://www.spektrum.de/news/kernkraftwerke-der-zukunft/1527265>Nuklear Forum Schweiz

Süddeutsche Zeitung (2019). „Atomenergie – Kernkraft fürs Klima?“, vom 4.2.2019, <https://www.sueddeutsche.de/wissen/kernenergie-klimawandel-atomkraft-gates-laufwellenreaktor-1.4312993>

Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP) (2013). „Strategic Research and Innovation Agenda“, [http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2014/05/sria2013\\_web.pdf](http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2014/05/sria2013_web.pdf)

Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP) (2013). „Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) Results of the public consultation (17 Dec – 10 January 2013)“, [http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2014/04/snetp\\_sria\\_public\\_consultation\\_comments\\_answers\\_final.pdf](http://www.snetp.eu/wp-content/uploads/2014/04/snetp_sria_public_consultation_comments_answers_final.pdf)

Swissnuclear (2019). „Kernspaltung“, <https://www.kernenergie.ch/de/zukunft/kerntechnik.html>

United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC). (2018). „Backgrounder on Research and Test Reactors“, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/research-reactors-bg.html>

World Nuclear Association (2017). „Generation IV Nuclear Reactors“, <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>

\*\*\*