

## **Entsorgung von deutschem „Atommüll“ in russischen Schnellen Brutreaktoren**

### **Zusammenfassung**

Das Problem „Atommüll“ läßt sich wesentlich entschärfen, wenn das Plutonium und die „Transurane“ sowie das abgereicherte Uran aus der Brennelementherstellung in sog.Schnellen Brüttern eingesetzt werden. Dazu müssen aus den abgebrannten Brennstäben in sog. Wiederaufbereitungsanlagen das verbliebene  $^{238}\text{U}$ , das Plutonium und die weiteren „Transurane“ isoliert werden. In diesen schnellen Brüttern werden das Plutonium und die „Transurane“ in kurzlebige Radionuklide umgewandelt. Dadurch reduziert sich die notwendige Endlagerzeit auf nur noch etwa 300 Jahre. Derzeit sind in Rußland mit den Reaktoren BN-600 und BN-800 weltweit die einzigen Schnellen Brüter in Betrieb. In mehreren anderen Ländern sind jedoch weitere Anlagen in Planung.

„Es sollte die Chance genutzt werden, den deutschen „Atommüll“ in Rußland aufzuarbeiten und das dort gewonnene spaltbare Material in den Brüttern BN-800 und Folgeanlagen einzusetzen statt die Endlagersuche in Deutschland weiter zu führen. Dafür sind entsprechende Verträge mit Rußland abzuschließen.

### **Grundlagen für den Betrieb von Kernreaktoren**

Das natürliche Uran besteht zu 99,3 % aus dem nicht spaltbaren Isotop  $^{238}\text{U}$  und nur zu 0,7 % aus dem spaltbaren Isotop  $^{235}\text{U}$ . Für den Betrieb der Leichtwasserreaktoren muss es vor Herstellung der Brennelemente auf etwa 3 bis 4 %  $^{235}\text{U}$  angereichert werden.

Das Isotop  $^{235}\text{U}$  wird mit sog. thermischen Neutronen gespalten, wobei 2-3 weitere Neutronen gebildet werden. Für den Betrieb in Leichtwasserreaktoren müssen diese schnellen Neutronen in thermische Neutronen abgebremst werden. Das erfolgt mit sog Moderatoren, wie z.B. vollentsalztem Wasser.

Beim Betrieb eines Kernreaktors wird ein Teil des vorhandenen  $^{238}\text{U}$  durch Neutroneneinfang in  $^{239}\text{U}$  umgewandelt. Dieses geht von selbst durch zwei aufeinander folgende  $\beta^-$ -Zerfälle in das spaltbare  $^{239}\text{Pu}$  über, das teilweise parallel zum  $^{235}\text{U}$  noch im Reaktor unter Energiegewinnung wieder gespalten wird.



Halbwertszeiten      23,5 min      2,355 d      24.000 a

### **„Schneller Brüter (1)“**

Ein Schneller Brüter ist ein Reaktor, der mit schnellen Neutronen arbeitet und mehr spaltbares Material (Plutonium) erzeugt als bei der Spaltung von  $^{235}\text{U}$  verbraucht wurde. So kann das eigentlich nicht spaltbare  $^{238}\text{U}$  in spaltbares Material umgewandelt werden. Desgleichen können nicht spaltbare Transurane durch Neutroneneinfang in spaltbare Transurane umgewandelt

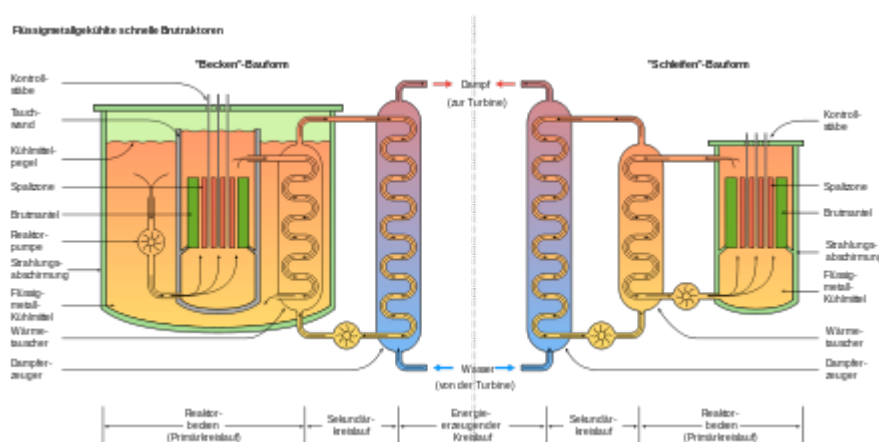
werden. Damit bleiben als „Atommüll“ nur noch die Spaltprodukte übrig.

Von den entstehenden Spaltprodukten sind 80 % nach einigen Jahren unschädlich, der Rest nach 300 Jahren und wäre damit auf dem Aktivitätsniveau von Granit. Damit wäre das Argument : „Endlager für 300.000 Jahre“ vom Tisch. Niemand kann über so lange Zeit für die Sicherheit eines Endlagers garantieren. Siehe dazu der Flyer „Wohin mit dem Atommüll“ bei <http://nuklearia.de/atommuell> (3).

## „Aufbau eines Schnellen Brütlers“ (1)

Der Schnelle Reaktor besteht aus einer Spaltzone und einem Brutmantel.

Schnelle Neutronen lösen neue Kernspaltungen mit wesentlich geringerer Wahrscheinlichkeit aus als thermische Neutronen. Deshalb muss im Vergleich zu Leichtwasserreaktoren die Spaltstoffkonzentration in der Spaltzone erhöht werden. Der Spaltstoff ist Mischoxid aus 15 bis 20 % Plutoniumoxid und 80 bis 85 % Uranoxid. Als Kühlmittel – verwenden die meisten Brutreaktoren flüssiges Natrium.



Schneller Brutreaktor in Becken-Bauweise (links) und in Schleifen-Bauweise (rechts)

Quelle: Siehe Bildnachweis

Der Brutmantel ist um die Spaltzone herum angeordnet und umgibt diese vollständig. Er ist mit angereichertem Uranoxid aus der Brennelementherstellung, geschätzter Vorrat 85.000 t , Reichweite 1200 Jahre (Vortrag Rainer Klute) als Brutstoff gefüllt. Angereichertes Uran ist der beim Uran-Anreicherungsprozess zwangsläufig anfallende Reststoff. (mehr als 99,7%  $^{238}\text{U}$ ).

Das „Brüten“ erfordert, daß die Spaltung eines Atomkerns durchschnittlich mehr als zwei Neutronen freisetzt, denn ein Neutron wird zum Auslösen der nächsten Spaltung benötigt und ein weiteres Neutron trägt dazu bei, ein nicht spaltbares Atom ( $^{238}\text{U}$ ) in ein spaltbares ( $^{239}\text{Pu}$ ) umzuwandeln.

Die bei der Spaltung eines  $^{235}\text{U}$ -Kerns entstehenden Spaltprodukte tragen mit 87 % den größten Anteil vom Energiegewinn der Reaktion, als kinetische Energie. Sie werden im umgebenden Brennstoffmaterial abgebremst und erhitzen dieses. Der primäre Natriumkühlkreis nimmt die Wärme auf und gibt sie über einen Wärmetauscher an einen Sekundärnatriumkühlkreis weiter. Dieser Sekundärkreislauf produziert in einem Dampferzeuger Frischdampf, der – wie in einem konventionellen, kohle- oder ölbefeuerten Kraftwerk – die Turbine antreibt.

Der Wärmeträger Natrium schmilzt bei 98 °C und siedet bei 883 °C. Wegen dieses hohen Siedepunkts ist im Natriumkreislauf ein Druck von nur etwa 10 bar notwendig. Zwischen dem Natriumkreislauf, der die Brennelemente kühlt (Primärkreislauf) und dem Wasser-Dampf-Kreislauf ist als Sekundärkreislauf noch ein 2. Natriumkreislauf installiert. Das ist aus Sicherheitsgründen notwendig, damit im Fall einer Dampferzeuger-Leckage nur nicht-radioaktives Natrium mit dem Wasser reagiert.“

## Technischer Betrieb von Brutreaktoren

Derzeit werden weltweit mit dem BN-600 (600MW) und seit 2014 mit dem BN-800 im Kernkraftwerk Belojarsk zwei stromerzeugende Brutreaktoren in Russland betrieben. In der Volksrepublik China und in Indien sind Anlagen im Bau.

Der erste deutsche natriumgekühlte Versuchsreaktor KNK-I (Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe) wurde in den Jahren 1971 bis 1974 im Kernforschungszentrum Karlsruhe gebaut. Die Anlage wurde 1977 zu einem Schnellen Brüter mit der Bezeichnung KNK-II umgerüstet und war bis 1991 in Betrieb.

Der Schnelle Brüter Phenix in Frankreich war in kommerziellen Betrieb zwischen 1973 und 2010 mit einer elektrischen Leistung von 250MW.

Am Niederrhein bei Kalkar wurde ab 1973 ein industrielles deutsch-belgisch-niederländisches Brutreaktor-Prototypkraftwerk mit der Bezeichnung SNR-300 gebaut. Nach zahlreichen Protesten und dem Reaktorunfall bei Tschernobyl 1986 kam es nie zur Inbetriebnahme oder gar Stromerzeugung, die für 1987 vorgesehen war. Im wesentlichen verantwortlich für die Fehlentscheidung war der damalige NRW-Ministerpräsident Johannes Rau.

In Indien soll 2015 der PFBR in Betrieb genommen werden, mit einer Leistung von 500MW, welcher Thorium statt abgereichertes Uran im Brutmantel enthält. Indien hat die größten Thoriumvorräte weltweit.“

## Weitere Schnelle Reaktoren in der Entwicklung

Schnelle Reaktoren wie der IFR (Integral Fast Reactor) oder PRISM, die Atommüll als Brennstoff nutzen können, sind fertig entwickelt und warten nur auf ein politisches Signal. GE-HitachiNuclear Energy möchte 2 PRISM-Reaktoren in Großbritannien bauen und damit die Plutoniumvorräte des Landes entsorgen. (2)

Der IFR war in den 1980er und frühen 90er Jahren in den USA fast fertig entwickelt, nachdem die Brütertechnik 30 Jahre lang an der Versuchsanlage EBR-II mit großem Erfolg getestet wurde. 1994 mußte die Forschung unterbrochen werden, da die Clinton-Administration die Fördermittel einstellte. Inzwischen ist das Projekt von mehreren Firmen und dem Argonne Laboratory wieder aufgegriffen worden, um den Reaktor unter dem Namen PRISM (Power Reactor Innovative Small Module) zur Marktreife zu entwickeln (3)

Flüssigsalzreaktoren: Trotz einiger Vorteile von Flüssigsalzreaktoren wurden bis heute weltweit nur zwei kleinere Forschungsreaktoren gebaut. Für die kommerzielle Energiegewinnung im großen Stil werden sie – neben fünf anderen Konzepten – im Rahmen des Generation IV International Forum für zukünftige Kernkraftwerke untersucht. Ein privates deutsches Forschungsinstitut (IFK Institut für Festkörperphysik Berlin) bringt seit 2011 einen Dual Fluid Reaktor (DFR) mit Flüssigkern (bevorzugt Chloridsalze, aber auch flüssiges Metall) und Bleikühlung sowie schnellem Neutronenspektrum und kombinierter Online-Hochtemperatur-wiederaufarbeitung in die Diskussion und bewirbt ihn mit herausragenden Sicherheitseigenschaften, extrem niedrigen Kosten sowie der Fähigkeit, nicht direkt spaltbare Transurane in kurzen Zeiträumen zu vernichten. Es wird behauptet, schnelle Reaktoren wie der DFR könnten innerhalb von 300 Jahren sogar die natürliche Radioaktivität vermindern.<sup>1</sup> Das exakte Zitat lautet "Schon nach 100 Jahren sind 90 Prozent der Reststoffe harmlos, und nach 300 Jahren ist die restliche Aktivität niedriger als die des geförderten Uranerzes und gilt damit als abgeklungen. Kernreaktoren reduzieren damit sogar die natürliche Radioaktivität". Für das DFR-Konzept wurde 2012 ein Patentantrag beim Deutschen Patentamt eingereicht. Stand März 2015: Patenterteilung steht noch aus.

Das IFK-Team hatte sich 2013 um den Greentec Award, Europas größten Umweltwettbewerb beworben. Daraus wurde nichts, trotz des klar gewonnenen online-Votings.. Offizielle Begründung: Das Projekt propagiere die Abkehr von einem zentralen Endlager. Damit schloß die Jury den Beitrag vom Wettbewerb aus. (4,5,6)

In der Republik Korea befindet sich der Prototyp eines natriumgekühlten Schnellen Reaktors (SFR) mit 150 MWe Leistung in der Entwicklung. Der Entwickler plant, die Genehmigung für den Bau dieser Anlage bis zum Jahr 2020 zu erhalten. (7)

In Belgien wird zurzeit ein Forschungsreaktor der sogenannte MYRRHA-Reaktor, eine „subkritische“ Transmutationsanlage, konzipiert. Dabei wird ein unterkritischer, durch Blei-Wismut passiv gekühlter Reaktorkern durch einen Protonenstrahl von 600 MeV angetrieben. Der Reaktor wird Uran-Plutonium-Mischoxid-Brennstäbe enthalten. Zweck dieser Anlage wird es sein, neben anderen Forschungsgebieten die Technologie der Transmutation im Protonenstrahlgetriebenen Reaktor im Piloteinsatz zu testen. In der Anlage sollen die langlebigen Produkte wie Plutonium und weitere Transurane wie Neptunium, Americium und Curium in kürzerlebige Produkte umgewandelt werden und damit der Betrieb eines Endlagers auf mehrere 100 Jahre verkürzt werden. Myrrha soll seine volle Leistung etwa 2025 erreichen.

Im Februar 2012 wurde in diesem Zusammenhang erstmals eine Anlage, die einen Teilchenstrahl mit einem bleigekühlten Reaktorkern koppelt, in Betrieb genommen. Mit der „GUINEVERE“ genannten Anlage sollen Erfahrungen für MYRRHA gesammelt werden. (8,9,10,11).

## **Näheres zu den Brutreaktoren in Rußland.**

Mit 35 Jahren Betriebszeit und einer Verfügbarkeit von über 74% ist der BN-600 in Belojarsk (in der Ural-Region) neben dem französischen Reaktor Phenix einer der erfolgreichsten Brutreaktoren der Welt, die ans Netz angeschlossen wurden. Seit 2012 wird der BN-600 zur Verbrennung von Plutonium aus den russischen Kernwaffen verwendet. (12)

Der Brutreaktor BN-800 ging 2014/2015 in Betrieb. (13) Der BN-800-Reaktor ist ein Natriumgekühlter Schneller Reaktor gefüllt mit Oxiden von Uran und Plutonium. Natrium als Kühlmittel hat den Vorteil, daß die schnellen Neutronen nicht abgebremst werden und daß das aktivierte Na-24 nur eine Halbwertszeit von 14,96 h hat. Die schnellen Reaktoren überführen das U-238 und die nicht spaltbaren Transurane durch Neutroneneinfang in spaltbare Transurane und spalten sie. Der BN-800 ist der momentan größte Brutreaktor der Welt. Das Besondere des BN-800: Das, was bei Leichtwasserreaktoren in irreführender Weise als „Atommüll“ bezeichnet wird, ist für den BN-800 Brennstoff. Schnelle Brüter können den weltweit angefallenen sog. „Atommüll“ aus den konventionellen Druckwasserreaktoren der letzten 60 Jahre vollständig verwerten und in wertvolle Energie verwandeln. Als Kernbrennstoff können 97 % der abgebrannten Brennelemente eingesetzt werden, natürlich muß dazu vorher eine Wiederaufbereitung durchgeführt werden, um die Spaltprodukte abzutrennen. Und es kann das abgereicherte Uran aus der Urananreicherungsanlage im Brutmantel des BN-800 eingesetzt werden. Der BN-800 kann Waffen-Plutonium, Reaktorplutonium und alle Transurane verarbeiten. (14,15,16) Mit dem BN-800 sollen Betriebserfahrungen und technologische Lösungen für den BN-1200 gewonnen werden.

Rußland plant bis Mitte 2020 mit dem größeren Reaktor BN-1200 in Betrieb zu gehen, der zu den Generation IV-Reaktoren gerechnet wird. Somit kann das Natururan effizienter als in herkömmlichen Reaktoren ausgenutzt werden (17).

Rußland entwickelt auch einen anderen schnellen Reaktor, der mit geschmolzenem Blei gekühlt wird. Bleikühlung ist chemisch inert gegenüber Wasser und Luft. Es wurde bisher noch nicht in

Kraftwerken angewandt, aber die Reaktoren in Rußlands nuklearen U-Booten wurden lange mit einer Bleilegierung gekühlt. Rosatom plant einen 300 MW bleigekühlten Demonstrationsreaktor, der in Belojarsk um 2020 in Betrieb gehen könnte.(18)

## **Beistellung Einsatzstoffe für den BN-800**

Neben dem abgereicherten Uran aus der Urananreicherung(19) kommen weitere Nuklide aus der

**Wiederaufbereitungsanlage**, die nach dem sog. Purex-Verfahren arbeitet (Plutonium-Uranium-Recovery-Extraction) (20,21). In dieser Anlage werden die Brennstäbe in kleine Stücke zersägt und in siedende Salpetersäure gegeben. Es entstehen Uranylнитрат  $UO_2(NO_3)_2$ , Plutonium(IV)-Nitrat  $Pu(NO_3)_4$ , sowie die Nitrate der Spaltprodukte und sonstigen „Transurane“. Die Abtrennung der Spaltprodukte und „Transurane“ erfolgt mithilfe des Extraktionsmittels TBP (Tri-n-Butyl-Phosphat, verdünnt mit 70% Kerosin), welches in Anwesenheit von Salpetersäure die Nitrate des Plutoniums und Urans unter Komplexbildung löst. Die Nitrate der Spaltprodukte und „Transurane“ verbleiben dagegen in der wässrigen Phase. Mit Abtrennung der organischen Phase können so Uran und Plutonium gemeinsam abgetrennt werden. Durch mehrmaliges Hintereinanderschalten dieses Prozesses wird eine möglichst vollständige Trennung von Plutonium+Uran von den Spaltprodukten + „Transuranen“ erreicht.

Uranylнитрат  $UO_2(NO_3)_2$ , Plutonium(IV)-Nitrat  $Pu(NO_3)_4$  verbleiben in der organischen Phase, die Spaltprodukte und „Transurane“ bleiben als Nitrate in der in der wässrigen  $HNO_3$ -Phase.

Wiederaufbereitungsanlagen werden betrieben in Frankreich (La Hague (22,23), Majak Rußland (24), Sellafield(GB) , Rokkasho (Japan) u.a. (25).

Anschließend werden Uran und Plutonium von einander getrennt, wie auch die „Transurane“ von den Spaltprodukten. Uran und Plutonium sowie die „Transurane“ werden dann nach entsprechender Weiterverarbeitung für den Einsatz im BN-800 konditioniert.(26) . Die Spaltprodukte werden in Glas eingeschmolzen.

### Literatur:

(1)<https://de.wikipedia.org/wiki/Brutreaktor>

(2) PRISM-Reaktor: <http://www.nukeklaus.de/home/prism-das-moderne-entsorgungszentrum>

(3) <http://nuklearia.de/atommuell>

(4) Flüssigsalzreaktor: <https://de.wikipedia.org/wiki/Flüssigsalzreaktor>

(5) IFK :Dual Fluid Reaktor. Heutige Kernenergie ist umweltfreundlich. Der DFR noch viel mehr. <http://dual-fluid-reaktor.de/technik/brennstoff>

(6) Neue Osnabrücker Zeitung 27.6.2013: <http://www.noz.de/deutschland-welt/politik/artikel/294/2806-atommuell-serie>

(7) Schneller Reaktor in Südkorea atw, Vol.60 (Jan.2015) S.27

(8) <http://myrrha.sckcen.be/>

(9) <https://wikipedia.org/wiki/rubbiatron>

(10) <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Transmutation-soll-Atommuell-entschaerfen-1563790.html>

(11) [http://www.energie-fakten.de/Partitionierung\\_Transmutation\\_\(PT\)\\_2.3.2011](http://www.energie-fakten.de/Partitionierung_Transmutation_(PT)_2.3.2011)

(12) <https://de.wikipedia.org/wiki/BN-Reaktor>

(13) <http://www.eike-klima-energie.eu/news-cache/atommuell-verwertender-brutreaktor-bn-800-ging-in-betrieb/>

(14) <http://www.blu-news.org/2015/07/19/brutreaktor-bn-800-ist-kritisch/>

(15) Russia bets its energy future on waste-free fast breeder nuclear reactors <http://www.extremetech.com/extreme/186023-russia-bets-its-energy-future-on-waste..>

(16) Fast Neutron reactors: <http://www.okbm.nnov.ru/english/npp>.

(17) Russia postpones BN-1200 in order to improve fuel design <http://www.world-nuclear-new.org/NN-Russia-postpones-BN-1200in-order-to-improve..>

(18). China, Russia and India are pushing forward with fast neutron nuclear reactors <http://nextbigfuture.com/2013/03/china-russia-and-india-are-pushing.html>

(19) Urenco: <http://www.buerger-fuer-technik.de/Kurzinfo427.pdf> Punkt 6

(20) <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/plutonium/plutonium.htm>

(21) <https://de.wikipedia.org/wiki/Plutonium>

(22)Wiederaufbereitungsanlage La Hague [https://de.wikipedia.org/wiki/Wiederaufbereitungsanlage\\_La\\_Hague](https://de.wikipedia.org/wiki/Wiederaufbereitungsanlage_La_Hague)

(23) [www.buerger-fuer-technik.de/body\\_wiederaufbereitungsanlage\\_\\_\\_\\_.html](http://www.buerger-fuer-technik.de/body_wiederaufbereitungsanlage____.html)  
Exkursion des VAA-IWT (VAA Interessenkreis für Wissenschaft und Technik) zur Wiederaufbereitungsanlage der COGEMA in La Hague.

(24) Wiederaufarbeitung in Majak Rußland [https://de.wikipedia.org/wiki/Kerntechnische\\_Anlage\\_Majak](https://de.wikipedia.org/wiki/Kerntechnische_Anlage_Majak)

(25) Wiederaufarbeitung: <https://de.wikipedia.org/wiki/wiederaufarbeitung>

(26) Status of Minor Actinide Fuel development – 5.Fabrication processes for fuels containing Minor Actinides [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1415\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1415_web.pdf)

## **Bildnachweis**

1. Schneller Brutreaktor in Becken-Bauweise (links) und in Schleifen-Bauweise (rechts)

Wikipedia: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LMFBR\\_schematics2.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LMFBR_schematics2.svg)

Copyright: Attribution-ShareAlike 3.0 Unported; CC BY-SA 3.0

[www.](http://www.)