

Anmerkungen zur Waffenfähigkeit der Atomkugeln aus AVR Jülich und THTR (Hamm) und zu einer Atomkugelabgabe in die USA

Dr. Rainer Moormann, Aachen
Jürgen Streich, Frechen-Königsdorf

Dritte aktualisierte Fassung: Oktober 2014

Zusammenfassung

Die in Jülich entwickelten deutschen Kugelhaufenreaktoren AVR und THTR wurden (anders als AKW mit Leichtwasserreaktoren) überwiegend mit hochangereichertem, waffenfähigem Uran betrieben. Hochangereichertes Uran (HEU) kann ein besonders hohes Proliferationsrisiko darstellen, da es bei ausreichend hoher Anreicherung - anders als Plutonium - den einfachen Bau von Atombomben z.B. durch terroristische Gruppen gestattet. Zur Verringerung von solchen Proliferationsgefahren haben die USA ein Rücknahmeprogramm für hochangereichertes Uran, allerdings nur aus Forschungsreaktoren zur Neutronenerzeugung, in denen das Uran anders als in AKW (wie AVR) nur unvollständig abgebrannt wird. Jülich verhandelt dennoch derzeit mit den USA über die Abgabe der 152 Jülicher Castoren mit AVR-Atomkugeln, deren zeitweise beabsichtigter Transport nach Ahaus in den vergangenen Jahren zu einer Protestwelle in NRW geführt hatte. Das unsichere Jülicher Zwischenlager mit 152 Castoren, dessen Genehmigung 2013 abgelaufen ist und das geräumt werden muss, enthält den Atomkugelabfall, der einer Elektrizitätserzeugung von knapp 1 Tag des aktuellen deutschen Gesamtelektrizitätsverbrauchs entspricht. Die verglichen mit neueren AKW relativ kleine erzeugte Strommenge von 1,5 Mrd kWh in 21 Jahren Leistungsbetrieb rührt daher, dass der AVR - wie alle deutschen AKW der ersten Generation - nur eine geringe elektrische Leistung aufwies (netto: 13 MW_{el}): Aus der großen Atommüllmenge wird der für Kugelhaufen-AKW typische, inakzeptabel große Anfall an radioaktivem Abfall deutlich und damit auch, dass es sich um ein veraltetes Nuklearkonzept handelt. Die auf den ersten Blick attraktiv erscheinende Option einer Abgabe der problematischen AVR-Atomkugeln in die USA fand Zustimmung bei Bundesregierung und NRW-Landesregierung, aber es gibt massiven Widerstand in der US-Bevölkerung und bei deutschen Umweltgruppen.

Wir haben die Proliferationsrisiken der AVR-Atomkugeln und der THTR-Atomkugeln (303 Castoren in Ahaus) verglichen mit dem Ergebnis, dass nur die in den Diskussionen bisher kaum betrachteten THTR-Atomkugeln ein beträchtliches Proliferationsrisiko darstellen, da der THTR bereits nach kurzem Betrieb aufgegeben werden musste, während die AVR-Atomkugeln aus Sicht der Proliferation wesentlich harmloser sind, da sie erheblich höher abgebrannt sind und zudem mit Brennelementen aus niedrig angereichertem Uran vermischt sind. Das Uraninventar der THTR-Castoren würde für 6 bis 9 relativ einfach zu bauende Atombomben des Hiroshima-Typs ausreichen. Die Waffenqualität des Urans der THTR-Castoren entspricht insgesamt etwa dem, welches in der Hiroshima-Bombe

verwendet wurde. Da die bei Extraktion des Spaltstoffs aus den Atomkugeln störende durchdringende Strahlung mit der Zeit deutlich abnimmt (und ab den Jahren 2250 - 2300 weitgehend verschwunden sein wird) nimmt die Proliferationsgefahr sogar langsam zu. Insgesamt ist also die von Jülich offenbar beabsichtigte Abgabe der AVR-Atomkugeln in die USA im Sinne eines Gesamtkonzepts der Atomkugelentsorgung nicht zu rechtfertigen und lässt Jülicher Partikularinteressen als Motiv mit dem hier eher vorgeschobenen Argument der Proliferationsgefahr vermuten. Angesichts der langen Transportwege in die und innerhalb der USA und aufgrund der Tatsache, dass die AVR-Atomkugeln in der Savannah River Site in riskanter, noch zu entwickelnder Weise wiederaufgearbeitet werden sollen und die Aufarbeitungsprodukte dort wie in Deutschland in ein Zwischenlager gebracht würden, wo sie dann wie in Deutschland auf ein noch zu schaffendes Endlager warten, ergeben sich aus ökologischer Sicht bei einer Abgabe in die USA deutliche Nachteile. Auch für die THTR-Atomkugeln mit ihren realen Proliferationsproblemen gibt es einfachere, in Deutschland durchführbare Wege als die Entwicklung einer Wiederaufarbeitung in den USA, um die Proliferationsgefahren zu beseitigen. In den USA würde durch die großen Mengen deutschen Atommülls die begonnene Sanierung der aus dem Kalten Krieg stammenden Atomwaffen-Produktionsstätte Savannah River Site mit ihren extremen radioaktiven Altlasten behindert und verzögert.

Massive Vorteile durch die Jülicher Planungen ergäben sich allerdings für zukünftige Hochtemperaturreaktoren, da mit der Entwicklung einer modernen Wiederaufarbeitung eine wesentliche technologische Schwachstelle dieser Reaktorlinie beseitigt werden könnte. Hier dürfte eine wesentliche Antriebsfeder für das Bemühen um die Atommüllverschiebung liegen – zumindest bei den in Jülich und beim DOE immer noch einflussreichen Verfechtern von Hochtemperaturreaktoren. Diese Vorteile für zukünftige Reaktoren können angesichts der beabsichtigten Energiewende aber keine Rechtfertigung für die Entwicklung der Wiederaufarbeitung sein, zumal Wiederaufarbeitung für deutschen kommerziellen Atommüll unzulässig ist. Um Struktur in die unübersichtliche Diskussion zur Atomkugel- und Kugelhaufenreaktorentsorgung zu bringen, fordern wir, dass FZ Jülich/RWTH Aachen dazu gebracht werden, endlich die leicht verzichtbare Nuklearforschung einzustellen und die freiwerdenden Kräfte auf Arbeiten zu Entsorgung/Rückbau von Kugelhaufenreaktoren zu konzentrieren. Wir vermuten, dass die seit mehr als 20 Jahren erfolgende Vernachlässigung dieser Arbeiten in FZ Jülich/RWTH Aachen zugunsten von Entwicklungsarbeiten für zukünftige Reaktoren dem schwierigen Kugelhaufenreaktor-Rückbau/Entsorgung schon erheblichen Schaden zugefügt hat.

In einem Anhang stellen wir die Chronologie der AVR-Atomkugeln für die vergangenen 50 Jahre dar, welche eine bis heute andauernde durchaus erschreckende Mischung aus Skrupellosigkeit, Hilflosigkeit und Schlampigkeit vieler Akteure bei FZJ und AVR offenbart. Weitere Details werden einem in Vorbereitung befindlichen Buch zu Kugelhaufenreaktoren der beiden Autoren dieses Papiers zu entnehmen sein.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	4
Behandlung von deutschen Atomkugeln in den USA.....	5
AVR-Castoren.....	6
THTR-Castoren.....	9
Gewinnung von Spaltstoff aus Atomkugeln.....	11
Schlussfolgerungen.....	12
Anhang: Chronologie zu den AVR-Atomkugeln.....	13

Einleitung

94 % der in Deutschland vorhandenen abgebrannten ca. 900.000 HTR-Brennelemente (Atomkugeln) aus AVR Jülich und THTR-300 (Hamm) wurden mit hoch waffenfähigem Uran (92 -93 % U-235), etwa 1 g pro Kugel, gefertigt.¹ Insgesamt wurden bis 1977 ca. 1250 kg HEU für Kugelhaufenreaktoren aus den USA nach Deutschland geliefert. Hier liegt eines der vielen ungelösten Entsorgungsprobleme von Kugelhaufen-HTR. Alle anderen AKW in Europa verwendeten demgegenüber aus Proliferationssicht weniger problematisches, niedrig angereichertes Uran. Hochangereichertes Uran lässt sich nur in komplexen, aufwändigen Anreicherungsanlagen gewinnen (s. aktuelle Iran-Diskussion), nicht auf chemischem Wege. Aber Uran lässt sich chemisch aus Gemischen mit anderen Elementen abtrennen: Wenn also HEU in einem Brennelement vorhanden ist, lässt es sich auf chemischem Wege wieder daraus isolieren.

Waffenfähiges Uran stellt – im Vergleich mit dem in konventionellen Reaktoren in großem Umfang erzeugten Plutonium – ein besonders hohes Proliferationsrisiko dar, wenn man terroristische Bedrohungen berücksichtigt. Das liegt daran, dass eine A-Bombe mit hochangereichertem Uran verhältnismäßig leicht gebaut werden kann: Die sog. Gun (Kanonenrohr) Anordnung erfordert nur geringe spezifische Kenntnisse und ist mechanisch leicht zu konstruieren. Die Hiroshima-Bombe arbeitete nach diesem Prinzip, sie ist bezeichnenderweise vor dem Abwurf nie getestet worden, im Unterschied zur andersartigen Nagasaki-Bombe. Nachteile dieses Bombentyps sind der verhältnismäßig schlechte Wirkungsgrad (Hiroshima-Bombe: 1.5 %, z. Vgl. Nagasaki-Bombe: 17 %), der höhere Spaltstoffbedarf für eine kritische Anordnung und die geringe Flexibilität, so dass er heute militärisch keine Rolle mehr spielt (die letzten A-Bomben nach dem Gun-Prinzip waren die 6 im Jahr 1993 demontierten Bomben der südafrikanischen Apartheid-Regierung: Südafrika² scheute den hohen Entwicklungsaufwand für moderne Implosionswaffen).

Als terroristische Waffen wären solche A-Bomben nach dem Gun-Prinzip jedoch weiterhin hoch bedrohlich. Diese Position wird auch von der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA vertreten:

Pablo Adelfang, IAEA (2011):

Why is HEU perceived as a threat?

- *A group of persons with some knowledge of physics, machining, explosives, and the chemical and physical properties of the nuclear material to be used –available in the unclassified literature– could potentially build a nuclear bomb from stolen nuclear material*
- *It is therefore plausible that non-state actors be able to make at least a simple gun-type device, with a yield perhaps as large as the Hiroshima bomb*

Plutonium lässt sich mit einer Gun-Anordnung nicht zur Explosion bringen, da die Spontanspaltungsrate zu hoch ist; das führt in einer Gun-Anordnung zu Frühzündung. Hier wird die sehr viel komplexere Implosionsanordnung benötigt. Für Terroristen dürfte die Entwicklung einer

1 Man unterscheidet niedrig angereichertes Uran (LEU < 20% U-235, nicht waffenfähig), hoch angereichertes Uran (HEU > 20 % U-235, waffenfähig). Für Anreicherungen > 90 % ist der Begriff weapon grade uranium WGU üblich, da es überwiegend in Kernwaffen zum Einsatz kommt

2 FZ Jülich/RWTH Aachen waren übrigens in das Atomwaffenprogramm der südafrikanischen Apartheid-Regierung wie folgt involviert: Die Südafrikaner benötigten know how zum Bau von kleinen AKW als Antrieb von Atom-U-Booten, welche die A-Bomben aufnehmen sollten. Wegen des internationalen Embargos konnten sie solches know how nicht erhalten, bis die Jülich/Aachener Reaktorentwickler unter dem Deckmantel von wissenschaftlicher Zusammenarbeit in die Bresche sprang und ab 1988 das know-how für Kugelhaufenreaktoren lieferten. Nach Ende der Apartheid entstand daraus das zivile südafrikanische PBMR-Projekt, das 2010 scheiterte.

Implosionsanordnung ohne Zugang zu entsprechenden detaillierten Unterlagen/Erfahrungen kaum machbar sein.

Seit Längerem gibt es daher Stimmen, welche die Produktion von HEU generell beenden wollen. Aufgrund dieser besonderen Proliferationsrisiken von hochangereichertem Uran haben sich die USA und Russland verpflichtet, abgebrannte Brennelemente mit in der Vergangenheit von ihnen geliefertem hochangereichertem Uran zurückzunehmen. Details zu diesen Vereinbarungen finden sich z.B. in http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1593_Web.pdf. Diese Vereinbarung bezieht sich streng genommen nur auf Forschungsreaktoren, also Reaktoren, die anders als AVR und THTR keine Energie sondern Neutronen für die Forschung erzeugen. Früher wurde HEU-Brennstoff in Forschungsreaktoren häufig verwendet, mittlerweile sind viele Forschungsreaktoren auf LEU umgestellt. Bei Forschungsreaktoren ist das Proliferationsrisiko auch des abgebrannten Brennstoffs hoch, da eine ausreichende Neutronenproduktion nur mit niedrig abgebranntem Brennstoff möglich ist: In abgebranntem HEU-Brennstoff aus Forschungsreaktoren findet man häufig noch Uran mit einem Anreicherungsgrad von 70 - 85 %. In Atomkraftwerken ist der Einsatz von waffenfähigem Uran nicht üblich und auch nicht notwendig, die Kugelhaufenreaktoren a la Jülich stellten hier, wie oben erwähnt, eine Besonderheit dar, da man mit Thorium brüten wollte (was waffenfähiges Uran erfordert). In AKW versucht man - im Unterschied zu Forschungsreaktoren – möglichst hohe Abbrände zu erzielen. Ab 1977 stellten die USA die Ausfuhr von HEU (WGU) nach Deutschland wegen der damit verbundenen Proliferationsgefahren ein. Daher sind in geringerem Umfang auch Atomkugeln mit niedrig angereichertem Uran und ohne Thorium als Brutstoff in Deutschland vorhanden (LEU-Atomkugeln des AVR).

Die USA haben offenbar 2012 – angesichts der kontroversen Diskussion in NRW um den Verbleib der abgebrannten ca. 290.000 Atomkugeln des AVR-Reaktors - erkennen lassen, dass sie bereit wären, auch diese Brennelemente im Rahmen des vorgenannten Rücknahmeprojektes zu übernehmen, obwohl es sich nicht um Forschungsreaktorbrennelemente sondern AKW-Brennelemente handelt. Jülich soll allerdings in den USA ein Rechtsgutachten vorgelegt haben, welches den AVR quasi zum Forschungsreaktor umdeklariert. Jülich führte nun entsprechende Verhandlungen und die Regierungen haben im April 2014 ein Statement of Intent unterzeichnet, das die Abgabe von AVR- und auch THTR-Atomkugeln in die USA vorsieht. Die AVR-Atomkugeln befinden sich aufgrund des zeitweise störfallähnlichen Betriebs des Reaktors in einem sehr schlechten Zustand: Große Mengen an Radioaktivität sind aus den Brennstoffpartikeln entwichen und haben sich über die gesamte Atomkugel verteilt. Eine verantwortbare Endlagerung würde also eine sehr kostenintensive Vorbehandlung (Konditionierung) erfordern.

In diesem Papier werden die Proliferationsrisiken von AVR- und THTR-Brennelementen untersucht und verglichen. Zuerst wird das vermutliche weitere Schicksal der Brennelemente nach einer Lieferung in die USA skizziert.

Behandlung von deutschen Atomkugeln in den USA

Die deutschen Atomkugelcastoren sollen in das US-Militärgelände (Atomwaffenentwicklung) Savannah River in South Carolina gebracht werden und dort in der Wiederaufarbeitungsanlage H-Canyon, die nicht den Kontrollen der IAEA unterliegt, wiederaufgearbeitet werden. Dazu soll ein Verfahren entwickelt werden, bei dem die Kugeln in flüssigem Salz behandelt werden und der Graphit vom Kernbrennstoff abgetrennt wird. Solche Wiederaufarbeitungen sind wegen der großen Umweltbelastung seit 2005 für kommerziellen deutschen Atommüll eigentlich unzulässig. Eine Option sieht vor, den Kernbrennstoff durch Zumischen von U-238 abzureichern („blend down“). Der Atommüll einschließlich der großen Mengen kontaminierten Graphits (langlebiges radioaktives C-14) soll in den USA verbleiben.

Die USA besitzen aus ihren in den 70'ern bzw. 80'ern stillgelegten Hochtemperaturreaktoren Peach Bottom HTGR und Fort St. Vrain im Prinzip ähnliche Brennelemente wie die aus AVR/THTR. Diese US-Brennelemente werden derzeit zwischengelagert und sollten bisher ohne Aufarbeitung endgelagert werden. Der abgebrannte Brennstoff des größeren Fort St. Vrain Reaktors befindet sich in einem Zwischenlager nahe dem früheren Standort des Reaktors, welches eine Betriebsgenehmigung bis 2033 besitzt. (<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1036/ML103640368.pdf>) Vermutlich würde man diese US-Brennelemente nach dem gleichen Verfahren aufarbeiten, wie es für die deutschen Atomkugeln entwickelt werden soll. Die US-HTR-Brennelemente enthielten ebenfalls HEU-Brennstoff.

Vorteilhaft wäre die Entwicklung dieser Wiederaufarbeitung vor allem für zukünftige HTR wie etwa den in den USA in Planung befindlichen NGNP (prismatische Brennelemente) und den in China mit Hilfe aus Jülich in Bau befindlichen Kugelhaufenreaktor HTR-PM, da das Fehlen einer großtechnisch demonstrierten Wiederaufarbeitung als gravierende technologische Schwachstelle dieser Reaktorbaulinie gilt. Es ist bisher unklar, ob und in welchem Umfang deutsche Kugelhaufenreaktorbefürworter und US-HTR-Entwickler die Pläne zur Atommüllverschiebung unter dem Deckmantel der Entsorgung vorangetrieben haben, um hier verdeckt Entwicklungsarbeiten für zukünftige Reaktoren voranzutreiben.

Bei der Savannah River Site (SRS) in South Carolina, wo die Atomkugeln aufgearbeitet werden sollen und der Atommüll mangels Endlager verbleiben soll, handelt es sich um eine Atomwaffenproduktionsstätte aus den 1950'er Jahren. Aktuell wurde begonnen, die enormen radioaktiven Altlasten auf diesem Gelände zu beseitigen, wobei Kosten von 70 Mrd US-\$ und eine Dauer von mehr als 30 Jahren im Gespräch sind. Die Verschiebung des deutschen Atommülls nach SRS würde die Sanierung verzögern und behindern, zumal in SRS keine geeigneten Lagermöglichkeiten vorhanden sind. Das verschärft die Frage nach der Verantwortbarkeit der geplanten Atommüllverschiebung.

Die Kosten der Übernahme von Forschungsreaktor-Brennelementen durch die USA liegen bei bis zu 4500 US-\$/kg (ohne Transport). Kosten für Atomkugeln sind noch nicht bestätigt. In den USA wird mit Einnahmen bei Atomkugelübernahme von etwa 1 Mrd US-\$ verteilt über 5 bis 6 Jahre gerechnet.

AVR-Castoren

80 % der ca. 290.000 AVR-Atomkugeln, die sich in 152 Castoren in Jülich befinden, basieren auf hochangereichertem Uran. Die Brennelemente wurden überwiegend in Deutschland gefertigt, aber das HEU (welches in Deutschland gemäß Atomwaffensperrvertrag nicht gewonnen werden darf) wurde ausnahmslos aus den USA importiert (1 g HEU pro Brennelement von 200 g).

Es ist anzumerken, dass die 152 AVR-Castoren einer Nettostromerzeugung von 1.5 TWh entsprechen. Soviel Elektrizität wird in Deutschland heute im Mittel innerhalb von knapp 1 Tag verbraucht. Diese nach heutigen Maßstäben geringe Strommenge liegt darin begründet, dass der AVR wie alle in den 1950'er Jahren entwickelten AKW nur eine geringe elektrische Leistung aufwies (13 MW_{el} netto). Der AVR war jedoch von 1967-88 mit dem Stromnetz synchronisiert, erzeugte in diesem Zeitraum mit einer Zeitverfügbarkeit von 66 % und einer Arbeitsverfügbarkeit von 60 % Strom und die Elektrizität wurde an RWE verkauft, wie in einem Stromliefervertrag vom 07./24.06.1968 festgelegt ist. Aus dem außerordentlich ungünstigen Verhältnis von erzeugter Strommenge zu Atommüllanfall wird ein Kernproblem der Kugelhaufenreaktoren deutlich, nämlich das riesige Volumen an radioaktivem Abfall, welches dieses Reaktorkonzept auch im Vergleich zu anderen Reaktoren als unausgereift und überholt kennzeichnet. Das große Volumen liegt daran, dass

ein Brennelement nicht nur den Brennstoff, wie in anderen Reaktoren, sondern auch den ganzen Graphitmoderator enthält, was das Abfallvolumen um mehr als den Faktor 20 vergrößert.

Für die abgebrannten AVR-Kugeln sind Inventare an Spaltstoffen durch FZJ veröffentlicht worden (Monographien des FZJ, Bd. 8 (1993): Fortschritte in der Energietechnik, S. 363). Allerdings führt die bekanntermaßen etwas oberflächliche Dokumentation der AVR-Atomkugeln durch FZJ („Atomkugellaire“ 2011) zu gewissen Ungenauigkeiten: In der o.g. Veröffentlichung ging man nämlich noch davon aus, es seien insgesamt nur 281.000 Brennelemente in den AVR gegeben worden, seit 2011 liegt die offizielle Zahl um ca. 10.000 Kugeln höher. Daher haben wir die Inventare der o.g. Veröffentlichung um 3 % erhöht. Angaben zum Uran-236 finden sich in o.g. Veröffentlichung zwar nicht, aber dessen Inventar lässt sich leicht berechnen, da auf 5,6 Spaltungen von U-235 etwa 1 Atom U-236 gebildet wird. Ähnliche Abschätzungen machten wir für das (geringe) Inventar an Uran-234. Damit enthalten die 152 Jülicher Castoren die in der Tabelle angegebenen Uraninventare. Zusätzlich in der Tabelle angegeben sind Zahlenwerte, die aus den 1999 veröffentlichten Aktivitätswerten aller Nuklide in den AVR- und THTR-Castoren berechnet wurden (Dieter Niephaus: Referenzkonzept zur direkten Endlagerung von abgebrannten HTR-Brennelementen in CASTOR THTR/AVR Transport- und Lagerbehältern. FZJ-Bericht Jül-3734 (1999)). Die letztgenannten Aktivitätsangaben bei Niephaus sind nach Angaben im Bericht allerdings so gewählt, dass sie mit den offiziellen Angaben zur Spaltstoffflusskontrolle an EURATOM/IAEA nicht kollidieren. Wegen der relativ großen Unsicherheiten zum Inventar speziell beim AVR - aufgrund unzureichender Dokumentation und nicht funktionierender Abbrandmessungen - ergeben sich dabei allerdings verhältnismäßig große Unterschiede zu den eher wissenschaftlich und am realen Verhalten orientierten FZJ-Angaben in der vorgenannten Veröffentlichung von 1993. Zuverlässige kritische Massen sind von der EU-Kommission in http://ec.europa.eu/energy/nuclear/transport/doc/irsn_sect03_146.pdf veröffentlicht worden.

Das Endgemisch enthält also 13 % Spaltstoff. Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass U-233 eine kleinere kritische Masse hat als U-235 (für U-235 wird eine Anreicherung von mindestens 20 % als Grenze angesehen, unterhalb derer eine A-Bombenbau faktisch ausgeschlossen werden kann, bei U-233 liegt diese Grenze bei 12 %) **ist dieses Urangemisch kein HEU sondern LEU und damit wenig proliferationsrelevant.** Das gilt auch, wenn die Inventardaten nach Niephaus verwendet werden.

Uranisotop	Vorhandene Masse in AVR-Castoren [kg]*	Kritische Masse (isotopenrein, Kugel, keine Reflektoren) [kg]
U-233	19,7 (25,4)	17
U-234	4,2	145
U-235	59 (49)	48
U-236	37	-
U-238	437 (411)	-
Σ	557	

*in Klammern: Werte nach Niephaus (FZJ-Bericht Jül-3734 (1999))

Etwas problematischer wird es, wenn man davon ausgeht, dass die ca. 56.000 LEU-Kugeln des AVR mit hohem U-238-Anteil ausgesondert werden (bei erheblichem Aufwand ist das theoretisch möglich), und nur die verbleibenden HEU-Kugeln aufgearbeitet werden.³ Unter Berücksichtigung

3 Wie eine kleine Bundestagsanfrage im September 2014 ergab, enthalten 97 der 152 AVR-Castoren ausschließlich HEU-Kugeln, sodass gegenwärtig 184.000 der 235.000 HEU-Kugeln bereits vom LEU separiert sind.

der Tatsache, dass die LEU-Kugeln einen niedrigeren Abbrand aufweisen als die HEU-Kugeln (da Erstere erst gegen Betriebsende in den Reaktor eingegeben wurden, s. o.g. FZJ-Veröffentlichung), ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle angegebenen angenäherten Uraninventare in den ca. 235.000 HEU-Kugeln aus dem AVR (Annahme: relativer U-235-Verbrauch in AVR-LEU-Brennstoff = 83 % desjenigen in HEU). Enthalten sind auch die gemäß Spaltstoffflusskontrolle angegebenen Werte, die Niephaus veröffentlicht hat. Der Spaltstoffgehalt betrüge also 57 % (56 % nach Niephaus) und das Gemisch würde damit als HEU und (bedingt) waffenfähig einzustufen sein. Das Gemisch der 3 spaltbaren Isotope ohne die nicht spaltbaren Isotope besitzt eine kritische Masse von 45 kg. Nimmt man für U-236 eine ähnliche inhibierende Wirkung bei Mischung mit dem spaltbaren Uran wie für U-238 an, und unterstellt für U-233 und U-234 ein qualitativ ähnliches Verhalten wie es für U-235 beschrieben wurde (https://www.princeton.edu/~aglasler/2006aglasler_sgsvol14.pdf) würde man mit der realen Isotopenzusammensetzung 110 - 120 kg Uran für eine kritische Masse benötigen, also etwas mehr als das in den HEU-Kugeln insgesamt vorhandene Uran (jeweils Kugelanordnung ohne Reflektor). In einer A-Bombe benötigt man aber im Moment der Zündung eine deutlich überkritische Masse: Die Effizienz der Explosion nimmt mit der Überkritikalität sehr stark zu (Effizienzgleichung nach Robert Serber): Bei 1,05-facher Überkritikalität erfolgt keine über konventionelle Sprengsätze hinausgehende Explosion, zwischen 1,05 und 1,5 nimmt die Explosionsstärke um den Faktor 400 zu. In der Hiroshima-Bombe war eine 2,4-fach kritische Masse zum Zündzeitpunkt vorhanden, was eine weitere Steigerung um den Faktor 30 zur Folge hatte. Andererseits lässt sich die kritische Masse in A-Bomben durch Neutronenreflektoren verringern, bei entsprechendem know-how sogar deutlich mehr als halbieren. Insgesamt könnte man mit dem gesamten Uraninventar aller AVR-HEU-Kugeln mit guter Reflektorkonfiguration (Wirksamkeit Faktor 2) bestenfalls eine 1,9-fache Überkritikalität erreichen, und damit eine A-Bombe mit einer Effizienz von 20 % von jener der Hiroshima-Bombe. Da bei der Brennstoffgewinnung aus den Kugeln aber Verluste auftreten, würde man in der Realität darunter bleiben. Bei Beschränkung auf das Uraninventar der 97 reinen HEU-Castoren würde sich die Bombeneffizienz um einen Faktor 5 vermindern. Verglichen mit abgebranntem HEU-Brennstoff aus Forschungsreaktoren sind die abgebrannten AVR-HEU-Brennelemente also wesentlich unproblematischer, da sie viel stärker abgebrannt sind.

Uranisotop	Vorhandene Masse in AVR-HEU Kugeln [kg]*	Kritische Masse (isotopenrein, Kugel, keine Reflektoren) [kg]
U-233	19,7 (25,4)	17
U-234	4,2 (4,6)	145
U-235	38 (30)	48
U-236	29 (33,3)	-
U-238	17 (13)	-
Σ	107,9 (106,3)	

*in Klammern: Werte nach Niephaus (FZJ-Bericht Jül-3734 (1999))

Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass diese Angaben für die HEU-Brennelemente nur bei vollständiger Abtrennung der AVR-LEU-Brennelemente gelten. Bereits geringe Anteile von nicht abgetrennten LEU-Brennelementen würden die Waffenfähigkeit deutlich verschlechtern. Der Gehalt an durch γ -Strahlung die Aufarbeitung und den Bombenbau störenden U-232 liegt bei 80 bis 100 ppm (US-Grenzwert für Waffeneignung/Implisionsbomben: 50 ppm). Durch geeignete Behandlung (Vermischung) ließe sich die Abtrennbarkeit von HEU aus dem Atomkugelmisch leicht verschlechtern.

Die Masse von ca. 80 kg spaltbarem Uran, davon 30 - 38 kg als Überrest des aus den USA als HEU für den AVR gelieferten U-235, verteilt sich auf Castoren mit einem Gesamtgewicht von gut 4000 t. Dieses Missverhältnis von proliferationsrelevantem Inhalt zum Gesamtgewicht der Castoren wirft weitere Fragen nach dem Sinn der geplanten Atommüllverschiebung auf.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Proliferationsgesichtspunkte bei den AVR-Brennelementen nicht ganz unberücksichtigt bleiben sollten, aber im Vergleich mit den in Ahaus befindlichen 600.000 THTR-Kugeln, die im nächsten Abschnitt behandelt werden, von eher untergeordneter Bedeutung sind. Durch geeignete Behandlung in Deutschland könnte das Proliferationsrisiko der Atomkugeln vollständig beseitigt werden. Proliferationsaspekte sollten also kein Hindernis für die Zwischen/Endlagerung der AVR-Atomkugeln in Jülich/Deutschland darstellen und eine Überstellung in die USA wegen Proliferationsgefahr erscheint als nicht gerechtfertigt und das Proliferationsargument als Vorwand. Eine Atommüllverschiebung böte überwiegend Nachteile: Der Grundsatz, dass Atommüll dort zu entsorgen ist, wo er entstanden ist, wird verletzt und die Müllproblematik einer anderen Weltregion aufgebürdet, die schon mit schwersten nuklearen Altlasten zu kämpfen hat. Es handelt sich also um einen Freikauf von der Entsorgungsverantwortung und ist zudem rechtlich gesehen mindestens fragwürdig, nach neueren Rechtsgutachten sogar unzulässig. Es ist unverständlich, dass FZJ sich bisher nicht für den Neubau eines sicheren Zwischenlagers in Jülich engagiert hat, obwohl die schweren Sicherheitsmängel des aktuellen Zwischenlagers (s. Anhang) seit ca. 2000 bekannt sein müssen.

THTR-Castoren

Die THTR-Kugeln sind aus Proliferationsicht aus mehreren Gründen erheblich problematischer als die AVR-Kugeln:

- Der hochangereicherte Brennstoff wurde nur sehr unvollständig abgebrannt, da der THTR-300 in Hamm wegen massiver technischer und sicherheitsrelevanter Probleme, welche die Betreibergesellschaft 1989 an den Rand des Konkurses brachten, bereits nach 14 Monaten Volllastbetrieb aufgegeben werden musste. Der Abbrand seiner Brennelemente ist ähnlich niedrig wie in Forschungsreaktoren.
- Die THTR-Brennelemente waren für besonders hohe Brutraten an spaltbarem Uran-233 mit kleiner kritischer Masse konzipiert
- Der THTR enthielt keinerlei die Waffenfähigkeit vermindern den LEU-Brennstoff mit hohem nicht spaltbarem Uran-238-Gehalt

Inventare für die THTR-Castoren sind nur aus der Veröffentlichung von Niephaus (Jül-3734) zu entnehmen, die sich weitgehend an den für die Spaltstoffflusskontrolle übermittelten Angaben orientiert. Wegen der im Falle der AVR-Castoren recht großen Unterschiede zwischen den Niephaus-Werten und auf wissenschaftlicher Basis ermittelten Inventaren haben wir auch eigene „best estimate“ Abschätzungen zu den Inventaren vorgenommen. Bemerkenswert ist, dass der Aspekt eines Proliferationsrisikos der THTR-Kugeln bisher nirgendwo diskutiert wurde, wohl um diesen brisanten Sachverhalt aus der Diskussion herauszuhalten. Angesichts der erkennbaren Fehlentwicklungen in den Jülicher Plänen zur Entsorgung von Atomkugeln aus Kugelhaufenreaktoren (s. Anhang) und der Schwerfälligkeit/Unwilligkeit von FZJ und AVR bei der Aufarbeitung seiner nuklearen Vergangenheit und bei einer Beseitigung der Altlasten bleibt aber keine andere Wahl, als auf dieses Problem öffentlich aufmerksam zu machen, konkrete Zahlen zu generieren und das Proliferationsrisiko zu quantifizieren.

Veröffentlicht wurde für den THTR der Abbrand der entladenen Brennelemente

(<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0215/ML021510148.pdf>). Er liegt im Mittel bei 5,2 % fima⁴, während der Zielabbrand zu 11,4 % fima vorgegeben war. Das heißt, dass die Kugeln nur 46 % des eigentlich vorgesehenen Abbrands erreicht haben und dementsprechend noch viel Spaltstoff enthalten.

Nehmen wir für alle THTR-Kugeln näherungsweise einen Abbrand von 5,2 % fima an, lässt sich aus zugänglichen Abbrandrechnungen für Kugeln des THTR-Typs das noch vorhandene Uraninventar in den THTR-Castoren abschätzen. Das führt zu den in der folgenden Tabelle genannten Werten. Aufgrund der verwendeten Näherungen sind diese Inventare zwar fehlerbehaftet, geben aber die Grundtendenz mit großer Wahrscheinlichkeit korrekt wieder. Der in der Tabelle nicht angegebene Gehalt an Uran-232 liegt nach Niephaus in Einklang mit unseren Abschätzungen bei knapp 25 ppm.

Daraus ergibt sich ein Spaltstoffgehalt von knapp über 75 % (bzw. bei etwas unter 77 % nach Niephaus) und damit eine recht gute Waffenfähigkeit (eher höher als diejenige von typischem abgebranntem HEU-Brennstoff aus Forschungsreaktoren, für den das US-Rücknahmeprojekt hauptsächlich gedacht ist). Die kritische Masse einer unreflektierten Kugelanordnung für die Mischung allein aus den 3 spaltbaren Isotopen Isotopenzusammensetzung läge bei 42 kg. Die Verdünnung durch die nicht spaltbaren Uranisotope lässt die kritische Masse auf 60 bis 65 kg ansteigen (s. Diskussion im AVR-Abschnitt).

Uranisotop	Vorhandene Masse in THTR Castoren [kg]*	Kritische Masse (isotopenrein, Kugel, keine Reflektoren) [kg]
U-233	81 (79)	17
U-234	7 (10)	145
U-235	225 (234)	48
U-236	63 (63)	-
U-238	40 (35)	-
Σ	416 (421)	

*in Klammern: Werte nach Niephaus (FZJ-Bericht Jül-3734 (1999))

Anders als im Fall der AVR-Castoren ist hier die Übereinstimmung zwischen den Werten für die Spaltstoffflusskontrolle (Niephaus) und den „best estimate“-Inventaren befriedigend.

Zur Frage der Verwendbarkeit in Gun-Anordnungen ist noch zu klären, ob die Zahl der Spontanspaltungen für diese Isotopenzusammensetzung hinreichend niedrig ist: In der Hiroshima-Bombe wurden die Spontanspaltungen vom U-238-Gehalt bestimmt, dessen Spontanspaltungsrate erheblich höher als die von U-235 ist. Mit den in <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/5141867-Cw4FoX/5141867.pdf> publizierten Spontanspaltungsraten für Uranisotope ergibt sich, dass die Spontanspaltungsrate von THTR-Uran etwa von der gleichen Größe wie diejenige im Uran der Hiroshima-Bombe ist; U-232 mit seiner relativ hohen Spontanspaltungsrate aber niedrigen Konzentration im THTR-Uran von weniger als 25 ppm (nach Niephaus Jül-3734 (1999)) ist dabei berücksichtigt. Damit ergeben sich daraus also keine Hindernisse für den Bau einer A-Bombe. Aufgrund der relativ intensiven α -Strahlung durch U-232 und U-233 müssten die Konzentrationen an Elementen mit niedriger Ordnungszahl (insbesondere Sauerstoff und Fluor) im Spaltstoff niedrig gehalten werden, um unerwünschte Neutronenproduktion durch die (α ,n)-Reaktion und damit Frühzündung eines Sprengsatzes zu

4 Fissions per initial heavy metal atoms

vermeiden. Das könnte im Rahmen von chemischen Standardprozessen leicht gewährleistet werden.

Das THTR-Uran entspricht waffentechnisch qualitativ etwa dem in der Hiroshima-Bombe verwendeten Uran (64 kg 80 % angereichertes Uran-235). Bei der Hiroshima-Bombe lag die kritische Urangesamtmasse (Kugelanordnung ohne Reflektoren) nämlich ebenfalls bei knapp 65 kg, wurde aber durch Reflektoren etwas mehr als halbiert. Die bei der Explosion einer Hiroshima-Bombe freigesetzte Energie entspricht derjenigen von 15.000 Tonnen TNT. Für die Hiroshima-Bombe wurde eine Wahrscheinlichkeit von etwa 8 - 9 % für eine Frühzündung abgeschätzt, was auf die unvermeidlichen Spontanspaltungen zurückzuführen ist. Für eine aus THTR-Uran gebaute Atombombe nach dem Gun-Prinzip läge diese Wahrscheinlichkeit bei 6 - 7 %. Sie wäre nur durch eine längere Beschleunigungsstrecke ("gun") zu reduzieren. Das Spaltstoffinventar der THTR-Castoren würde mit guten Reflektoren (Wirksamkeit Faktor 2) entsprechend den im AVR-Abschnitt diskutierten Regeln also für maximal ca. 9 einfach zu bauende Atombomben des Hiroshima-Typs ausreichen, wenn eine Effizienz von 1 kt TNT pro Bombe angestrebt wird, oder 6 Bomben einer Stärke von 15 kt TNT (wie in der Hiroshima-Bombe). Anders als das Uran der AVR-HEU-Kugeln erfüllt das THTR-Uran sogar die Kriterien der Waffeneignung für Implosionsbomben (U-232 < 50 ppm).

Zwei Castoren in Ahaus enthalten außerdem die Brennelemente des THTR-Hilfsreaktors (unter dem Kugelabzug des THTR-300 eingebauter zusätzlicher Reaktor sehr geringer Leistung), die aus 3.9 kg hochangereichertem Uran-235 legiert mit Aluminium bestanden und damit Brennstoff für Forschungsreaktoren sehr ähnelten. Dieser Spaltstoff ist in der obigen Aufstellung nicht enthalten.

Gewinnung von Spaltstoff aus Atomkugeln

Um das waffenfähige Uran aus den Atomkugeln zu isolieren, wäre folgender, im Labor getesteter und publizierter Prozess (Monographien des FZJ, Bd. 8 (1993): Fortschritte in der Energietechnik, S. 336 ff) durchzuführen:

- Verbrennen des Graphits
- Auflösen der Asche in Salpetersäure
- Extraktion des Urans und Trennung vom Thorium bei geeignetem pH-Wert mit Tributylphosphat/Kerosin
- Konvertierung der gewonnenen Uranverbindungen in metallisches Uran
- Reinigung des Urans von leichten Elementen (Sauerstoff, evtl. Fluor)

Abgesehen vom ersten Schritt, der Verbrennung des Graphits, entspricht dieses Verfahren den Standard-Wiederaufarbeitungsprozessen. Der Graphit enthält relativ viel C-14, und das entstehende CO₂ dürfte nach heutigen Maßstäben auch nach Reinigung von Radioaktivität nicht in die Umgebung emittiert werden, da C-14 als CO₂ vorläge. Da C-14 als β -Strahler nicht leicht zu detektieren ist, bestünden für eine heimliche Verbrennung mit Emission in die Umgebung gute Chancen, nicht entdeckt zu werden. Als Asche wäre bei den THTR-Castoren die überschaubare Menge von ca. 1 m³ zu erwarten, die dann nass-chemisch zu verarbeiten wäre.

In den USA soll an Stelle der Verbrennung eine Graphitabtrennung in flüssigem Salz entwickelt werden (s. Kapitel *Behandlung von deutschen Atomkugeln in den USA*). Da dieses Verfahren noch nicht existiert, soll es hier unberücksichtigt bleiben.

Für mindestens 200 Jahre nach Entnahme der Atomkugeln aus dem Reaktor sind diese Vorgänge, bei denen es sich um Standardoperationen der chemischen Verfahrenstechnik handelt, nur in Heißen Zellen mit Manipulatoren durchführbar, wenn Strahlenschutzvorschriften eingehalten werden

sollen. Der Zugang zu Heißen Zellen dürfte für Terroristen schwierig sein, so dass hier ein Hindernis zu vermuten ist. Werden jedoch hohe und potentiell schädliche Strahlendosen in Kauf genommen (was bei Gruppen, die Selbstmordattentate durchführen, nicht abwegig wäre), lassen sich Operationsweisen denken, die auch schon früher in einfacheren chemischen Labors durchgeführt werden können, ohne dass es zu sehr schweren akuten Schädigungen kommt (allerdings verbunden mit einer hohen Wahrscheinlichkeit, später an Strahlenkrebs zu erkranken). Die durchdringende γ -Strahlung (Cs-137, später U-232) nimmt in jedem Fall mit der Zeit stark ab⁵ und ist in einigen Jahrhunderten nur noch gering, sodass ein normales chemisches Labor dann ausreichen würde. Besonders problematisch werden die Atomkugeln aus Proliferationssicht also ab ca. 2250 - 2300. Die spaltbaren Uranisotope sind dann noch praktisch vollständig vorhanden.

Die bei Kugelhaufenbefürwortern gelegentlich anzutreffende Behauptung, Atomkugeln a la Jülich ließen sich nicht wiederaufarbeiten, da sie so extrem stabil seien, ist speziell für die vorhandenen AVR- und THTR-Atomkugeln als Propagandaargument einzustufen. Die HEU-Brennelemente von AVR und THTR enthielten ganz überwiegend nicht einmal SiC-Schichten auf den Brennstoffpartikeln und könnten also - abgesehen von Emissionsgefahren - problemlos verbrannt werden, wobei nur der Kernbrennstoff zurückbleibt. Die 336.000 unverbrauchten THTR-Brennelemente wurden in der schottischen Anlage Dounreay aufgearbeitet und ca. 300 kg U-235 nach Deutschland zurückgebracht.

Auch der Umgang mit dem isolierten Spaltstoff erfordert wegen der Strahlung durch U-232 bei Berücksichtigung von Strahlenschutzbestimmungen Heiße Zellen. Der U-232-Gehalt ist bei THTR-Spaltstoff aber um einen Faktor 3.5 geringer als beim AVR.

Schlussfolgerungen

Es wird deutlich, dass die THTR-Castoren ein gravierend höheres Proliferationsrisiko darstellen als die AVR-Castoren. Selbst wenn es gelänge, die LEU-Brennelemente aus den AVR-Castoren zu entfernen, blieben die THTR-Castoren bezogen auf die gleich Zahl von Kugeln sind um mindestens etwa den Faktor 4 - 5 problematischer als die HEU-Brennelemente der AVR-Castoren, absolut gesehen sogar um etwa den Faktor 10. Eine normale Endlagerung, ohne dieses Problem zu berücksichtigen und überzeugende Lösungen aufzuzeigen, dürfte für die THTR-Castoren nicht verantwortbar sein, da man sonst eine Mine für A-Bombenmaterial hinterlassen würde. Damit wird auch klar, dass die von Jülich angestoßene Diskussion zum Transport der AVR-Castoren im Rahmen des US-Projekts zur Rücknahme von hochangereichertem Brennstoff zur Verminderung von Proliferationsgefahren am falschen Objekt geführt wird: Die Diskussion über Proliferationsgefahren ist offensichtlich primär für die THTR-Castoren zu führen. Eine einfache Lösung, wie im Fall der AVR-Castoren, kann hier noch nicht gegeben werden, da entsprechende Vorarbeiten bisher unterlassen wurden und das Problem völlig ignoriert wurde. In jedem Fall darf aber davon ausgegangen werden, dass eine Entschärfung des Proliferationsrisikos in Deutschland möglich ist, und zwar mit Verfahren, die weniger belastend als die geplante Wiederaufarbeitung sind. Es ist aber mit erheblichen Kosten zu rechnen. Als nationale Lösung wäre auch eine rückholbare Endlagerung der THTR-Castoren für einige Jahrhunderte, bis eine Bearbeitung mit Beseitigung der Waffenfähigkeit vertretbar wird, zu diskutieren .

Zwar ist FZ Jülich - anders als bei den AVR-Castoren - nicht Besitzer der THTR-Atomkugeln. Aber:

- FZ Jülich hat das THTR-Brennelement entwickelt und im AVR-Reaktor getestet

5 Die gefährliche α -Strahlung bleibt zwar erhalten, aber dagegen kann man sich leichter schützen, ähnlich wie gegen chemische Gifte.

- FZ Jülich hat entscheidend zur Entwicklung des THTR-300 beigetragen
- Zum vielfachen „Milliardengrab“ THTR-300 wäre es höchstwahrscheinlich nicht gekommen, wenn Jülich die schon 1970 hochproblematischen Erfahrungen mit dem AVR-Reaktor nicht geschönt hätte.
- Außer in Jülich ist de facto kein know how zu den THTR-Atomkugeln mehr vorhanden

Insofern ist es mindestens erstaunlich und in Hinblick auf das Allgemeininteresse auch eher inakzeptabel, dass FZ Jülich hier offenbar überwiegend das eigene Interesse verfehlt, nämlich die AVR-Castoren aus Jülich wegzuschaffen, und die viel größeren Probleme mit den THTR-Castoren in Ahaus verschweigt. Hier sind das „Sankt Floriansprinzip“ und eine ähnliche Flucht vor der Verantwortung zu vermuten, welche seit mehr als 40 Jahren den Jülicher Umgang mit den AVR-Brennelementen und später auch mit den Hinterlassenschaften der Kugelhaufenreaktoren kennzeichnen (s. Anhang). Hinzu kommt der Umstand, dass keinerlei Rücksicht auf die großen Umweltprobleme in der SRS-Anlage genommen wird, wohin der Atom Müll verschoben werden soll.

Weiterhin gibt es mehrere Beispiele dafür (auf die wir separat aufmerksam machen werden), dass Fehler durch mangelndes Jülicher Engagement bzw. Desinteresse Kosten und Aufwand von Rückbau/Entsorgung der Kugelhaufenreaktoren erheblich vergrößert haben. Die Aachen/Jülicher Reaktortechnik, die auch noch in jüngerer Zeit durch kaum nachvollziehbare pro-nukleare Statements von sich Reden gemacht hat („Ich sehe das Risiko bei Tihange nicht“, <http://www.westcastor.de/ret.pdf>), ist als weitgehend desorientiert und im Lichte der Aufgaben der anstehenden Energiewende als konzeptionslos einzustufen. Nach Bekanntwerden des vernichtenden Expertenberichtes zum AVR im April 2014 hat FZJ immerhin angekündigt, die Kugelhaufenreaktortechnik einstellen zu wollen und hat eingeräumt, dass die Reaktortechnik in der Vergangenheit wissenschaftlich nicht immer seriös gearbeitet hat. Allerdings soll jetzt die LWR-Technik Forschungsgegenstand der Reaktortechnik werden. Hier gilt es anzusetzen und FZ Jülich/RWTH dazu zu bringen, die verzichtbare Reaktortechnik aufzugeben und durch engagiertere Beiträge hinreichend Verantwortung für die (mit)verursachten nuklearen Altlasten zu übernehmen und endlich ein nachvollziehbares Gesamtkonzept für die Kugelhaufenreaktorentsorgung und deren Brennelemente zu entwickeln. Mittelfristig dürfte es sinnvoll sein, diese das Image des FZJ als zukunftsgerichtete Forschungseinrichtung vermutlich belastenden nuklearen Arbeitsfelder und die zugehörigen Planstellen (einschließlich der jetzigen Reaktortechnik einige hundert) auszugliedern. Dazu bietet sich eine ebenfalls der öffentlichen Hand gehörende Firma (z.B. EWN) an, mit besserem Durchgriffsmöglichkeiten bei Fehlentwicklungen als im Falle der Forschungseinrichtung FZJ. Dabei müssten die AVR-Atomkugeln allerdings aus der Verantwortung des FZJ genommen werden und mit den Planstellen/Mitarbeitern an EWN übergeben werden. Hier ist daran zu erinnern, dass nach dem (gemäß Gutachten des Bundesrechnungshofes) desolaten Verlauf des AVR-Entsorgungsprojektes 1989-2002 der AVR-Rückbau aus der Jülicher Verantwortung an EWN übertragen wurde. Es ist davon auszugehen, dass die bisherige Favorisierung der HTR-Entwicklungsarbeiten durch FZ Jülich und die Unterstützung der HTR-Projekte in Südafrika (2010 gescheitert) und China massiv zu Lasten einer geregelten Entsorgung der HTR-Altlasten gegangen ist.

Anhang: Chronologie zu den AVR-Atomkugeln

- Ab 1964 werden bei der Nukem in Hanau die Atomkugeln für den AVR gefertigt. Die 1 g waffenfähiges Uran-235 für ein 200 g schweres Brennelement werden aus den USA geliefert
- Über Lagermöglichkeiten für abgebrannte Brennelemente wird anfangs nicht nachgedacht. Der AVR-Sicherheitsbericht beschreibt nur den Transport der Atomkugeln aus dem AVR

zurück in das FZJ. Im AVR können nur geringe Mengen an bestrahlten Atomkugeln (ca. 5000) zwischengelagert werden, im FZJ werden keine Zwischenlagermöglichkeiten für AVR gebaut.

- 1967 erzeugt der AVR erstmals Strom
- Ab 1966 werden die Arbeiten zur Wiederaufarbeitung der Atomkugeln in Jülich unter Einbindung der Industrie begonnen. Ziel ist die Gewinnung von Spaltstoff aus den abgebrannten Brennelementen und Verglasung der nicht verwertbaren Abfälle. Eine Wiederaufarbeitungsanlage JUPITER wird in Jülich errichtet (330 Kugeln/Tag).
- Spätestens 1974 wird klar, dass der aus JUPITER zurückgewinnbare Spaltstoff im Reaktor (der sehr hoch angereichertes Uran benötigt) unbrauchbar ist. Man hat nämlich die Wirkung von Uran-236 übersehen bzw. unterschätzt (Originalzitat eines Berichts 1974: "Dieses Isotopengemisch [Anm.: aus der Wiederaufarbeitung] ist wegen der vergiftenden Wirkung von U-236 nicht wirtschaftlich weiterzuverwenden."). Vermutlich um diese Panne zu vertuschen und den Ruf der Jülicher Reaktorentwickler nicht zu verschlechtern, wird die Wiederaufarbeitung mit der verkürzten Begründung 'zu teuer' aufgegeben: JUPITER wird zwar fertiggestellt, aber nie in Betrieb genommen und in den 1980'ern verschrottet.
- Da ab 1974 große Mengen an abgebrannten AVR-Atomkugeln anfallen werden, für die es keine hinreichende Zwischenlagermöglichkeit oder Wiederaufarbeitung gibt, muss eine schnelle Lösung gefunden werden, da ansonsten der AVR-Betrieb eingestellt werden muss. Jülich setzt deshalb eine Genehmigung für das Verbringen von 100.000 AVR-Atomkugeln in die Asse-II durch, die am 04.03.1976 erteilt wird. Jülich ist damals die Problematik der Asse-II, etwa wie sie sich heute darstellt, vom Oberbergamt Clausthal vor Augen geführt worden (hohes Risiko des Absaufens, schwerer Wassereinbruch 1939...); Jülich läßt sich jedoch nicht von seinem Vorhaben abbringen.
- Trotz massiver, aus heutiger Sicht unsachlicher Jülicher Propagandakampagne im Kreis Wolfenbüttel (in dem die Asse liegt) für eine Einlagerung der Atomkugeln in die Asse etabliert sich ein starker lokaler Widerstand unter Führung des stv. Wolfenbüttler Landrates Stövesandt. U.a. mit Hilfe von Gerichtsverfahren gelingt es, die Einlagerung der Atomkugeln bis zum Auslaufen der Genehmigung 1978 zu verhindern. Zwischenzeitlich werden jedoch in der Asse alle Vorbereitungen für die Einlagerung der Atomkugeln auf der 750 m-Sohle abgeschlossen und Jülich beantragt sogar schon die Einlagerung von weiteren 60.000 Atomkugeln. Ende 1978 wird die Asse stillgelegt.
- Illegal in die Asse verbracht werden von Jülich jedoch ca. 52.000 Graphitkugeln aus dem AVR, die zwar keinen Kernbrennstoff, aber unzulässig große Mengen an radioaktivem Tritium und Kohlenstoff-14 enthalten, was von Jülich bei der Einlagerung nicht angegeben wird. Als das 2009 aufgrund des hohen Ausgasens von Tritium aus der Asse auffällt, rechtfertigt Jülich sich 2010 damit, man habe zu damaligen Zeiten diese radioaktiven Inventare noch nicht messen können. Untersuchungen dazu zeigen aber, dass diese Messungen 1973 längst vorlagen und diese Jülicher Behauptungen daher unwahr sind. (http://www.bi-ahaus.de/index.php?option=com_content&view=article&id=141:informationen-zur-illegalen-atommuellentsorgung-des-forschungszentrums-juelich&catid=44:informationen&Itemid=61)
- In die Asse verbracht werden von Jülich auch einige hundert hochradioaktive Atomkugeln vom AVR-Typ, die aber zu Versuchszwecken in anderen Reaktoren bestrahlt worden sind. Details zu diesen Atomkugeln werden von Jülich derzeit noch zurückgehalten.
- Ab Ende 1976 hätte der AVR wegen Ausschöpfung aller provisorischen FZJ-Lagermöglichkeiten für die Atomkugeln stillgelegt werden müssen. Um das zu vermeiden, werden die Atomkugeln viel länger als zulässig im Reaktor belassen, aber alle Graphitkugeln entnommen und durch frische Atomkugeln ersetzt. Das hat höchstwahrscheinlich zur

extremen radioaktiven Verschmutzung des AVR-Reaktors und damit zu dessen heute erkennbaren riesigen Entsorgungsproblemen beigetragen und den Effekt der zu hohen Temperaturen verstärkt. Die Atomkugeln sind nun auch äußerlich radioaktiv stark kontaminiert. Auch eine Mitsache am Dampferzeugerversagen 1978 mit Wassereinbruchstörfall (s.u.) ist nicht auszuschließen. Es sind ab 1974 2400 Kugeln mit 40 % höherem Spaltstoffgehalt (GLE-1) in den Reaktor gegeben worden, um einen weiteren Ausgleich für die schon sehr hoch abgebrannten, also Uran-armen anderen Atomkugeln zu schaffen. Diese GLE-1 Atomkugeln werden im AVR jedoch schnell zerstört und es wird 1976 (weitgehend vergeblich) versucht, sie wieder aus dem AVR zu entfernen.

- 1977 beendeten die USA aus Proliferationsgründen die Lieferung von atomwaffenfähigem Uran für deutsche Kugelhaufenreaktoren. Es werden daher Atomkugeln mit niedrig angereichertem Uran (LEU) entwickelt und bis zum Betriebsende 1988, vor allem ab 1983, werden 55.000 dieser LEU-Atomkugeln in den Reaktor gegeben.
- Durch den AVR-Wassereinbruchstörfall 1978, der zu Boden- und Grundwasserverseuchung unter dem Reaktor führt, und die anschließende lange Stillstandsphase entspannt sich die Entsorgungssituation. Es werden nun mehrere Behelfslagermöglichkeiten auf dem Gelände des FZJ geschaffen oder offiziell freigegeben: Abklingbecken der Heißen Zellen des FZJ, Brennelementelagerbecken der Forschungsreaktoren DIDO und Merlin, Trockenlager, HZ-Lagerbehälter..... Diese unübersichtliche Lagersituation dürfte eine Ursache der „Atomkugellaffaire 2011“ gewesen sein, zumal es auch zu Verwechslungen von Lagerbehältern kam.
- 1988 wird entdeckt, dass die maximal genehmigte Spaltstoffmenge in einem der Behelfslager überschritten ist. Die Aufsichtsbehörden müssen eingreifen.
- Da die Behelfslagermöglichkeiten nicht ausreichen, um die nach AVR-Stillegung Ende 1988 noch im Reaktor befindlichen ca. 110.000 Brennelemente aufzunehmen, wird bis 1993 in Jülich ein Zwischenlager für alle AVR-Atomkugeln errichtet (Betriebsgenehmigung bis 2013). Jülich kämpft 1990 für dieses Zwischenlager, denn es gibt damals auch Pläne, die AVR-Atomkugeln wie die THTR-Atomkugeln nach Ahaus zu bringen. Jülich kann sich mit dem Argument durchsetzen, die Lagerung zu halben Preis verglichen mit Ahaus sicherzustellen. Als Ergebnis wird ein sicherheitstechnisch mangelhaftes Gebäude errichtet, in das die Kugeln in Castorbehältern gebracht werden.
- 1994-99 werden die im AVR vorhandenen Atomkugeln unter enormen Kosten größtenteils entladen. Die nach Entladung erstellten Bilanzen insbesondere bezogen auf einzelne Brennelementtypen weisen große Fehler auf. Die genaue Anzahl der im Reaktor verbliebenen Atomkugeln ist zudem unklar, zumal der Bodenbereich des Reaktors zerbrochen ist und Atomkugeln sich in Rissen verklemmt haben bzw. hindurchgefallen sind. Die entladenen Atomkugeln werden in das neue Zwischenlager gebracht, das nun nach FZJ-Angaben 288.161 Atomkugeln und 124 Absorberkugeln ohne Brennstoff in 152 Castoren enthält. Nach Untersuchungen des TÜV ist die Unterscheidungsprozedur zwischen Atomkugeln und den ebenfalls im Reaktor befindlichen Graphitkugeln ohne Kernbrennstoff aber nicht absolut sicher, daher könnten bis zu 1000 der im Zwischenlager befindlichen Atomkugeln auch Graphitkugeln sein, was die Bilanzierung der Atomkugeln erschwert.
- 2008 beschließt der FZJ-Aufsichtsrat, die 152 AVR-Castoren bis Mitte 2013 nach Ahaus zu bringen, da die Genehmigung des Jülicher Zwischenlagers 2013 ausläuft und Kernbrennstoff in Jülich zunehmend als störend empfunden wird. Das führt zu massiven Protesten in NRW.
- Im April 2011 kommt es zur sog. Atomkugellaffaire: Die NRW-Landesregierung schließt die Einlagerung von 2285 in den Bilanzen vermissten Atomkugeln in der Asse nicht aus. Ein Untersuchungsausschuss befasst sich mit dem Thema. Klare Hinweise für einen Transport

dieser Atomkugeln in die Asse finden sich zwar nicht, wohl aber für eine unzureichende „nonchalante“ Buchführung des FZJ bzgl. der Atomkugeln.

- August 2011 läuft Regenwasser während eines Gewitters in das Jülicher AVR-Behälterlager und die Feuchtesensoren der Castoren geben Alarm.
- Im März 2012 wird deutlich, dass eine Lagergenehmigung der AVR-Castoren in Ahaus kaum noch rechtzeitig erteilt werden kann, da nach Auffassung der Genehmigungsbehörde BfS die Jülicher/GNS Antragsunterlagen den Qualitätsansprüchen nicht genügen. Der FZJ-Aufsichtsrat beschließt daraufhin, eine Verlängerung des Jülicher Zwischenlagers bis 2016 zu beantragen.
- Im Mai 2012 läuft nochmals Regenwasser in das Jülicher Zwischenlager und die Feuchtesensoren der Castoren geben wiederum Alarm.
- Im Juli 2012 gibt FZJ bekannt, dass es mit den USA verhandelt, um die AVR-Castoren in die USA zur Zwischen/Endlagerung zu exportieren, und zwar im Zuge eines Projekts zur Rücknahme von aus den USA geliefertem waffenfähigem Uran für Forschungsreaktoren (Verminderung von Proliferationsrisiken), das auf AKW erweitert werden könnte.
- Im November 2012 beschließt der FZJ-Aufsichtsrat auch formal, auf die bis Mitte 2013 geplante Verlagerung der Castoren nach Ahaus zu verzichten und mit den Planungen für ein neues Zwischenlager in Jülich zu beginnen. An den Transportplänen in die USA als Alternative wird aber festgehalten
- Der allgemeine Stresstest 2012/13 für Zwischenlager verläuft für das Jülicher Castorenlager sehr negativ: Zu Erdbeben und Flugzeugabstürzen gibt es keine belastbaren Sicherheitsnachweise.
- Die Genehmigung des Castorenlagers läuft am 30.06.2013 aus, da FZ Jülich weiterhin keine Sicherheitsnachweise vorlegen kann. Nach zweimaliger befristeter atomrechtlicher Duldungsanordnung wird am 02.07.2014 eine Räumungsanordnung für das Lager erlassen. FZJ wird verpflichtet, bis zum 30.09.2014 einen Plan zum weiteren Umgang mit den Atomkugeln vorzulegen.
- Ein „Statement of Intent“ zwischen US- und deutschen Regierungsstellen enthält Details für die geplante Verschiebung der Jülicher, aber auch der Kugelcastoren aus Ahaus in die USA (April 2014)
- Eine Studie zur Umweltverträglichkeit eines neuen Zwischenlagers in Jülich bestätigt, dass dieses möglich ist (Mai 2014)
- Die Bundesregierung behauptet, dass die Verschiebung der Ahaus-Castoren derzeit nicht (mehr) verfolgt wird (September 2014). In den USA laufen die Vorbereitungen zur Annahme der Ahaus-Castoren jedoch weiter.