

Seminar zu:
**Kugelhaufenreaktoren,
Thorium und Transmutation:
Die letzten Strohhalme
der Atomlobby**

Hamm, 19.11.2016

*Beitrag: Aufblick – Technik und
Gefährdungspotentiale*

Dr. Rainer Moormann, Aachen

Dichtung und Wahrheit

- Kugelhaufenreaktoren
- Thorium
- Flüssigsalzreaktoren
- Transmutation

Schlussfolgerungen

Kugelhaufenreaktoren

Werden vermarktet als:

- Extrem sicher (katastrophenfrei, inhärent sicher, selbstabschaltend, kann sich im Störfall selbst überlassen werden/walk-away safe....)
- Fast frei von Entsorgungsproblemen
- Geeignet zur Erzeugung von chemischer Prozesswärme (Wasserstofferzeugung, Kohlevergasung)
- Ökonomisch konkurrenzfähig
- Fast ausgereift, aber in Deutschland Opfer einer grün-linken Verhinderungslobby

Kugelhaufenreaktoren

Fakten:

- Die Realität zum unsicheren und gescheiterten Betrieb der beiden deutschen Kugelhaufenreaktoren AVR Jülich und THTR Hamm wurde mit Unterstützung aus Politik und Atomaufsicht jahrzehntelang verschleiert
- Seit 2014 (Gutachten unabhängiger Experten) ist klar, dass der Jülicher AVR faktisch havariert ist und daher die - betr. Entsorgung - schwierigste deutsche Atomruine darstellt
- Der Betrieb des THTR Hamm war durch ständige Pannen und Störfälle hochdefizitär. Stilllegung, da der Betreiber wiederholt große finanzielle Nachforderungen an die öffentliche Hand erhob, NRW sich 1989 aber widersetzte

Kugelhaufenreaktoren

Generische Eigenschaften:

- Niedrige Leistungsdichte (schwache Moderation durch Graphit erfordert sehr große Graphitmengen)
 - Außerdem: In LWR dient Moderator Wasser auch als Kühlmittel, in HTR ist zusätzlich Kühlmittel (Helium) erforderlich (weitere Volumenvergrößerung)
- Dicke Graphitreflektoren um Kern wegen Neutronenökonomie notwendig = zusätzliche Massen
- Niedrige Leistung (HTR hoher Leistung lassen sich nicht sicher abschalten, s. THTR/Kernstäbe)

Folgen:

- **Positiv:** Thermisch träge (große Volumina/Wärmekapazität)

Kugelhaufenreaktoren

- **Negativ:** Große Materialmengen erforderlich
 - sehr teurer Reaktor
 - Zur Einsparung werden Sicherheitseinrichtungen (Sicherheitsbehälter, Notkühlung...) weggelassen
- **Negativ:** Große Materialmengen führen zu großen radioaktiven Abfallvolumina
 - Graphitmoderator/reflektor ist viel schwieriger zu entsorgen als das Moderatorwasser aus LWR
 - Außerdem: In Atomkugeln sind Moderator Graphit und Brennstoff fest verbunden: Volumen an wärmeentwickelndem Abfall ist etwa 50-mal größer als bei LWR

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit

1. Sind Kugelhaufenreaktoren kernschmelzfrei ?

- Das keramische Core eines Kugelhaufenreaktors schmilzt nicht – würde aber bei großen Reaktoren (3000 MW_{th}) teilweise verdampfen/sublimieren.
- Kleine Kugelhaufenreaktoren (heutige Konzepte bis 400 MW_{th}) bleiben bei Überhitzung mechanisch intakt, aber:
 - Entscheidend ist nicht die Frage Kernschmelze ja/nein, sondern ob bei Überhitzung die Radioaktivität zurückgehalten wird
- Kernschmelzfrei allein ist sicherheitstechnisch wenig bedeutsam

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit

2. Sind Atomkugeln ausreichend dicht ?

- Bereits bei HTR-Normalbetrieb durchdringen bestimmte gefährliche Nuklide (Cäsium, Silber...) langsam die dünnen Barrieren um den Brennstoff
 - Diffusion durch temperaturbedingte Atombewegung
- Generische Schwachstelle von Kugelhaufenreaktoren:
 - Konzept erfordert viele (> 10.000) kleine Brennstoffpartikel in den Atomkugeln, die damit nur sehr dünne dichtende Sperrschichten (0,03 – 0,1 mm) haben können
 - z.Vgl. Hüllrohr-Dicke von LWR: 0,7 mm
- Intakte LWR-Hüllrohre sind im Betrieb (450°C) undurchlässig, HTR-Beschichtungen ($> 900^\circ\text{C}$) nicht

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit

- Nur Betriebstemperaturabsenkung kann dieses HTR-Problem verringern (z.B. Heliumtemperatur im HTR-PM, China, im Bau: 750°C, AVR Jülich hatte 950°C). **Nachteile:**
 - Keine Hochtemperaturprozesswärme (keine Wasserstoff-erzeugung, keine Kohlevergasung)
 - Nur noch Mitteltemperaturreaktor
 - Ökonomisch unattraktiver
 - Nicht mehr innovativ
- Langandauernde Kernüberhitzung führt auch ohne Kernschmelze zu massiven Freisetzungen aus Brennstoff und Atomkugeln
 - Beispiel AVR Jülich (einige 10 % aus Brennstoffpartikeln, einige % aus Atomkugeln)

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit

- Schlüssellargument der HTR-Lobby: Bis 1600°C (kleine HTR: Maximaltemperatur bei Kühlmittelverlust) bleiben die Atomkugeln stabil = **Irreführende Halbwahrheit:**
 - Auslegungstemperatur nur 1250°C
 - Bei langsamem Erhitzen auf 1600°C platzen die Sperrschichten zwar noch nicht, werden aber hoch durchlässig
 - Kurzes Erhitzen auf 1600°C führt zwar noch nicht zu massiver Radioaktivitätsfreisetzung, aber die Atomkugeln werden unbrauchbar (teurer Austausch erforderlich)
 - Längeres Erhitzen auf 1600°C (z.B. Kühlmittelverlust ohne Naturzug-Kühlung des Reaktorbehälters): Hohe Radioaktivitätsfreisetzung aus den Atomkugeln

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit

3. Schalten sich HTR im Störfall immer selbsttätig ab ?

- Reaktorauslegung generell: Temperaturerhöhung im Betrieb => Selbstabschaltung (negativer Temperaturkoeffizient)
- Besonderheit von Graphitreaktoren/HTR:
 - Selbstabschaltung bei T-Erhöhung besonders ausgeprägt
 - Selbstabschaltung führt bei kleinen HTR nicht zu Schäden

Aber:

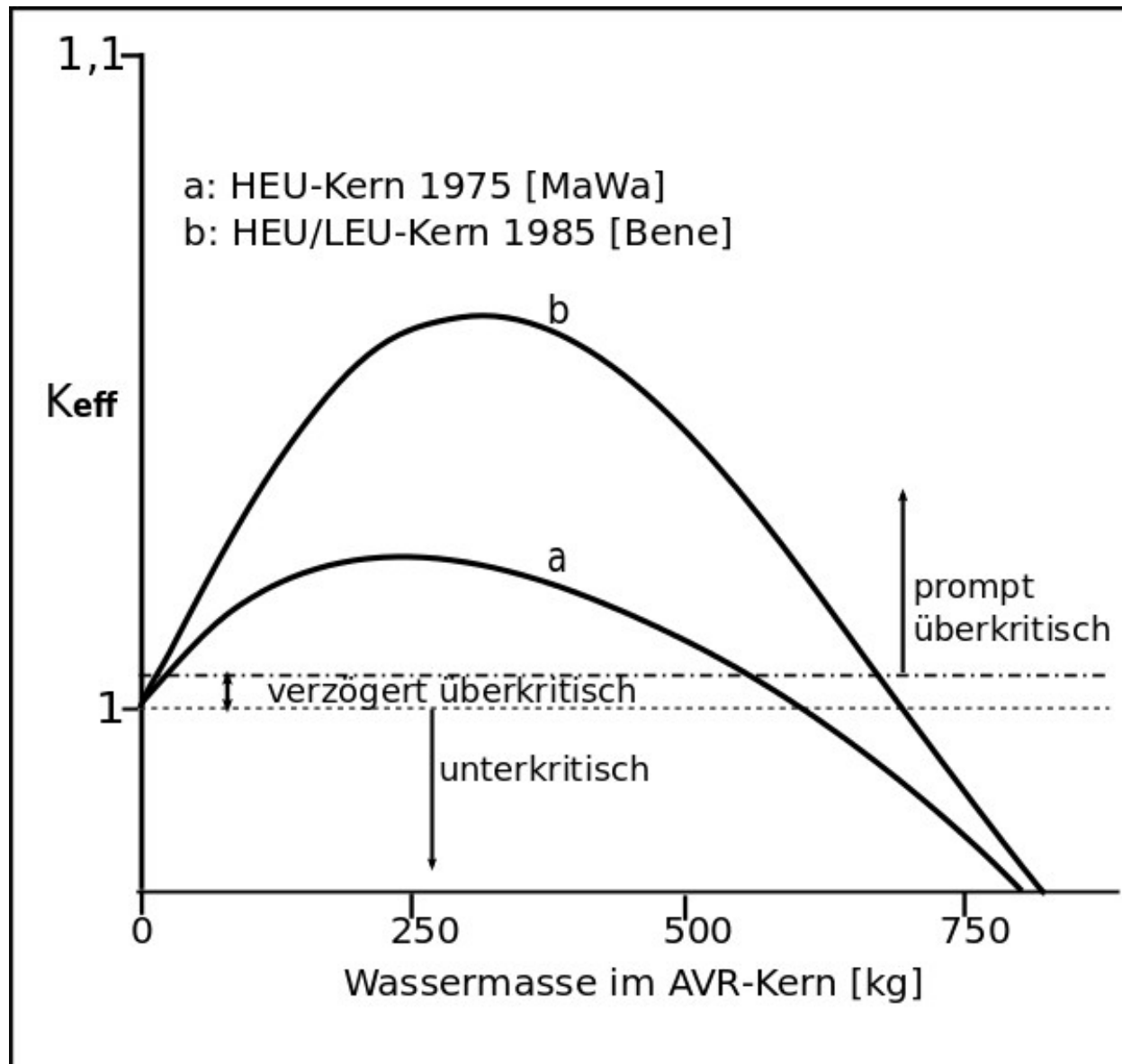
- Selbstabschaltung bei anderen HTR-Störfällen unwirksam (Wassereinbruchstörfälle, bestimmte Reaktivitätsstörfälle)
- Temperaturabsenkung führt u.U. zu selbsttätiger Reaktoreinschaltung (AVR März 1977 Einschaltung trotz eingefahrener Abschaltstäbe = zeitweise unkontrollierbar)

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit

HTR-spezifische Störfälle

- Wassereinbruchstörfälle (Rohrbrüche im Dampferzeuger), Risiken:
 - Graphitoxidation mit Bildung brennbarer Gase (ggf. Explosionsrisiko): Kann nur durch Betrieb bei niedrigen Temperaturen vermieden werden (s. HTR-PM)
 - Reaktivitätseintrag, da Wasser viel besser moderiert als Graphit: Sehr schnelle Abschaltung erforderlich, sonst Durchgehen des Reaktors (flüssiges Wasser im Kern)
 - „Chernobyl-Effekt“ bei großen Wassermengen im Kern (s. Abb.)

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit



Neutronen-Multiplikationsfaktor k_{eff} im AVR in Abhängigkeit von der Wassermasse im Kern

k_{eff} = Zahl der bei einem Spaltungsprozess gebildeten Neutronen, die eine nachfolgende Spaltung auslösen

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit

Weitere HTR-spezifische Störfälle

- Luftleinbruchstörfälle (nach Kühlmittelverlust):
 - Risiko von katastrophalem Graphitbrand (wie Chernobyl) mit weitgehender Radioaktivitätsfreisetzung
 - Anders als im Chernobyl-RBMK liegen die HTR-Temperaturen schon im Betrieb über der Graphit-Entzündungstemperatur (600°C), d.h. sofortiger Brandbeginn
- Staubaustrag bei Kühlmittelverlust:
 - HTR-Kühlkreisläufe sind wegen undichter Brennstoffpartikel und fehlender Reinigungsmöglichkeit extrem kontaminiert; Radioaktivität sitzt auf Abrieb/Graphitstaub
 - Leck/Druckentlastung: Staubaustrag in die Umgebung

Kugelhaufenreaktoren und Sicherheit

.....Weitere HTR-spezifische Störfälle

- HTR-Kern ist nicht brauchbar instrumentierbar (Bewegung des Kugelhaufens zerstört jede Sonde), d.h. HTR-Kern = black box; Störfallsituationen werden zu spät erkannt
- Kugelbewegung sehr ungleichmäßig, führt zu Abweichungen in der Spaltstoffverteilung: Instabilitäten, Temperaturüberhöhungen.....
 - Grundfehler: Graphitreibung wurde anfangs falsch eingeschätzt, Graphit in HTR ist kein Schmiermittel wie in Standardatmosphäre (HTR: Kugelbruch, Staub...)
 - Fehleinschätzung seit 1967 bekannt aber unterschlagen, um weiter Gelder für HTR zu bekommen (Wissenschaftsbetrug?)

Kugelhaufenreaktoren und Entsorgung

Wegen

- großer Müllvolumina
- besonders problematischem Müll (z.B. Graphit/C-14)
- hoch kontaminiertem Kühlkreislauf

ist HTR-Entsorgung sehr viel teurer als LWR-Entsorgung.

Chinesische Pläne für Atomkugel-Billigentsorgung:

- Keine Castoren, nur Edelstahlgefäße für 35.000 Atomkugeln
- Werden anfangs im Reaktorgebäude mit Gebläsen gekühlt
- Später Verbringen in Halle für niedrigaktiven Abfall
- Keine Pläne für geologische Endlagerung
- Nach westlichen Maßstäben unakzeptabel
- Basiert auf früheren FZJ-Plänen

Kugelhaufenreaktoren und Proliferation

- Wegen ständiger Brennelemententnahme gut für Herstellung von Waffenmaterial geeignet
 - US-NRC-Experte Powers: *Massgeschneidert zur offenen oder heimlichen Herstellung von Atomwaffenbrennstoff*
- Siemens plante 1989 für USA einen HTR zur Tritiumproduktion (Wasserstoffbomben)
- HTR spielten im militärischen SDI-Projekt (Präsident Reagan) große Rolle (Antrieb für Timberwind-Rakete)
- Apartheid-Südafrika übernahm 1988 das HTR know-how, um einen Antrieb für Atom-U-Boote zu entwickeln (FZJ übergab know-how trotz Embargos)
- Aktuelles HTR-Interesse von Saudi-Arabien/Indonesien könnte militärischen Hintergrund haben

Thorium

- Thorium (Th-232) ist 3 bis 4-mal häufiger als Uran
- Thorium ist **kein** Spaltstoff wie Uran-235 (0,7 % im Natururan) und daher nicht direkt nutzbar
- Thorium kann wie Uran-238 (99,3 % im Natururan) zum **Erbrüten** von Spaltstoff (Th => Uran-233; U-238 => Pu-239) benutzt werden
- Thorium als Energielieferant in großem Umfang heißt also: Brütertechnologie (mehr Spaltstoff erbrüten als verbrauchen) und Wiederaufarbeitung sind zwingend
- HTR waren keine Brüter: Das Thorium im THTR (90 % Th-232 und 10 % U-235 im Kernbrennstoff) hätte nur maximal 30 % zur Energieerzeugung beitragen können, Rest Uran

Thorium und AKW-Sicherheit:

- Insgesamt keine Vorteile gegenüber Uran/Plutonium: Spaltproduktinventar, Nachzerfallswärme usw. sind ähnlich
- **Nachteil** von Uran-233 aus Thorium: Anteil verzögerter Neutronen ist geringer (verzögerte Neutronen = Sicherheitsmarge zum Reaktor-Durchgehen)
- **Vorteil** von Thorium: Negativer Temperaturkoeffizient (Thorium-Dopplereffekt) ist größer als im Uran-238
- Angebliche weitere Thorium-Sicherheitsvorteile haben nichts mit Thorium, sondern bestenfalls mit Sicherheitseigenschaften von Reaktorkonzepten zu tun (HTR, Flüssigsalzreaktor)

Thorium und Endlagerung

- Langlebige hochtoxische „Minore Aktinide“ (Am, Np, Cm) und Plutonium entstehen nicht, aber in geringerer Menge (20 %) vergleichbar giftige Nuklide (Pa-230....).
- Kein entscheidender Vorteil zu Uran, da die im Endlager risikobestimmenden Nuklide (Tc-99, I-129, Cl-36....) in ähnlicher Menge vorhanden sind (s. Transmutation).
- Minore Aktinide sind in geologischen Formationen fast unbeweglich und daher nicht risikodominant
 - wird von Thoriumbefürwortern gern verschwiegen und nur die geringere Toxizität des Thoriummülls wird als Maßstab genommen

Thorium und Proliferation

- Uran-233 aus Thorium hat eine ähnlich kleine kritische Masse wie Plutonium-239 (heute dominierender Atomsprengstoff)
- U-233 wurde vereinzelt (wird in Indien ?) in nuklearen Sprengsätzen eingesetzt
- Uran-233 lässt sich wie Uran-235, aber im Unterschied zu Plutonium-239, mit sehr simplen Vorrichtungen zur nuklearen Explosion bringen (Gun-Anordnung wie Hiroshima-Bombe)
- Aus Uran-233 könnten Terroristen also wirksame nukleare Sprengsätze bauen
- Die Produktion von Uran-233 aus Thorium stellt daher ein hochsignifikantes Proliferationsrisiko dar

....Thorium und Proliferation

- Neben Uran-233 entsteht aus Thorium stark durchdringend strahlendes Uran-232, welches die Anwendung in heutigen High-Tech Atomwaffen ausschließt
 - z.B. Störung von Elektronik, Hauptargument der Thoriumlobby zur Proliferationssicherheit von Thorium
 - Uran-232 kann aber den Bau simpler Nuklearsprengsätze a la Hiroshima durch terroristische Organisationen oder Staaten ohne High-Tech nicht verhindern
- Durch geeigneten Reaktorbetrieb (thermalisierte Bereiche mit Thorium) oder durch *Flüssigsalzreaktoren* mit online-Wiederaufarbeitung (Abtrennung von Pa-233) kann die Bildung von Uran-232 zudem unterdrückt werden

....Thorium und Proliferation



Quelle: BUND-RVSO

Fazit: Thorium = Scheinalternative

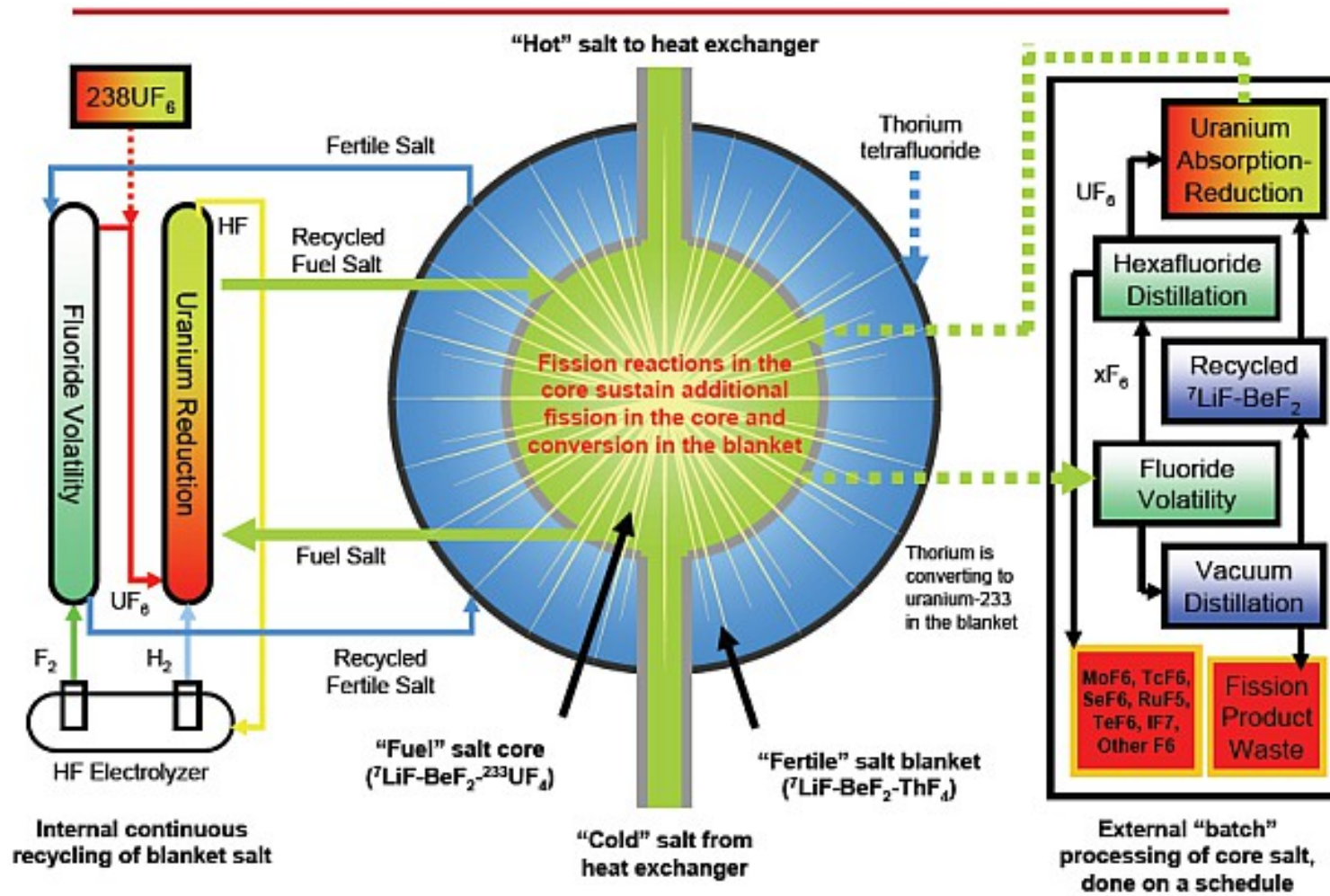
- Thorium erfordert zum energietechnischen Großeinsatz den Einstieg in die problematische Brüter- und Wiederaufarbeitungstechnologie
- Thorium bietet bzgl. AKW-Sicherheit und Entsorgung keine echten Vorteile gegenüber herkömmlicher (U/Pu)-Technologie
- Die Thoriumtechnologie wird von westlichen Nuklearkonzernen daher kaum unterstützt, sondern ist eine wissenschaftliche Nischenaktivität, mit allerdings großem Rückhalt in fanatischen pronuklearen Laienkreisen
- Wegen des enormen Proliferationsrisikos von Th/U-233 werden auch USA/Russland/IAEA die Thoriumtechnologie wohl weiterhin nicht stark fördern (Thoriumtechnologie würde deren HEU-Rücknahmeprojekte obsolet machen).

Flüssigsalzreaktoren

- Brennstoff von Flüssigsalzreaktoren (Alvin Weinberg USA, 1950er Jahre): alternativ U/Th/Pu gelöst in flüssigem Salz, das umgepumpt wird und im Kern/Graphitmoderator kritisch wird
- Zwei kleine Flüssigsalzreaktoren wurden vor 1970 für kurze Zeit betrieben (mäßiger Erfolg: Uran verflüchtigte sich, Korrosion durch Salz...) und danach aufgegeben. Derzeit Entwicklung in China, begrenzte EU-Förderung, Universitäten, Start-up-Firmen, d.h. eher Nischenaktivität
- Haben sicherheitstechnisch verglichen mit LWR Vorteile (Schmelzsicherung) und Nachteile (Neigung zu positivem T-Koeffizienten, Auskristallisieren/kritische Masse...)
- Erlauben theoretisch Wiederaufarbeitung im Betrieb (Abzweigen eines Teils des Salzes in kleine WAA)

.....Flüssigsalzreaktoren

How does a fluoride reactor use thorium?



.....Flüssigsalzreaktoren

- Online-Wiederaufarbeitung würde den Reaktorbetrieb als Brüter sehr erleichtern (Entfernung von Neutronengiften)
- Online-Wiederaufarbeitung würde die Gewinnung von waffenfähigen Spaltstoffen (U-233, Pu-239) extrem erleichtern
- Online-Wiederaufarbeitung bisher nur im Labor getestet
- Fazit: Innovatives Konzept, Hürden aber immens, Sicherheits- und Proliferationsbedenken. Daher keine Alternative.
- Deutsche Variante *Dual Fluid Reaktor (DFR)*: Eher unseriöses Konzept ohne Realitätsbezug, wohl lautstark propagiert um Fördermittel abzugreifen, Nähe der Entwickler (privates IFK Berlin) zur obskuren Kalten Fusion. Einschätzung eines pronuklearen Experten: *Die Beschreibung des DFR erinnert an die Einleitung eines Perry Rhodan-Heftchens.....*

Transmutation

- Alchemie: Transmutation = Umwandlung Quecksilber/Gold
- Heute: Kernumwandlung zur Entschärfung von Nuklearabfall
 - Erste Pläne: 1950er Jahre, erste detaillierte Veröffentlichung: 1964, erste internationale Konferenz: 1977
 - Umfangreiche Arbeiten bis 2000 (USA) und 2005 (EU)
 - 1999: US-Kongress verweigert Finanzierung für Großprojekt (Gründe: Kosten 300 Mrd \$, Dauer 100 Jahre, Müllreduktion nur um maximal Faktor 10, d.h. Endlager bleibt notwendig)
 - Seit 2006: Transmutations-Versuchsreaktor **Myrrha** ohne WAA (Belgien) kämpft - bisher vergeblich - um Finanzierung
 - Aktuell: Niedergang der Transmutation, außer in Ländern mit niedrigem Sicherheitsstandard (Russland, China...)

.....Transmutation

- Physikalische Prozesse der Transmutation:
 - 1) Spaltung (vor allem Schnelle Spaltung)
 - 2) Spallation
 - 3) Neutroneneinfang (vor allem thermische Neutronen)
- 1) und 2) führen zu vielen neuen (teilweise radioaktiven) Produkten, 1) und 3) kommen im Reaktor immer vor
- Effiziente Transmutation erfordert höchste Neutronenflüsse
- Wiederholte komplexe, problematische Wiederaufarbeitung (Partitioning) zwingend (5 - 10-mal); völlig unausgereift
- Klassische Reaktoren ungeeignet, Schnelle Reaktoren bedingt geeignet (evtl. für Pu/Minore Aktinide), beste Ausbeuten mit extrem teuren Spallationsquellen (ADS, Rubbia-Reaktor...)

.....Transmutation

Kernbrennstoff-Zusammensetzung vor und nach dem Einsatz im LWR
(Abbrand: 40 GWd/tSM)

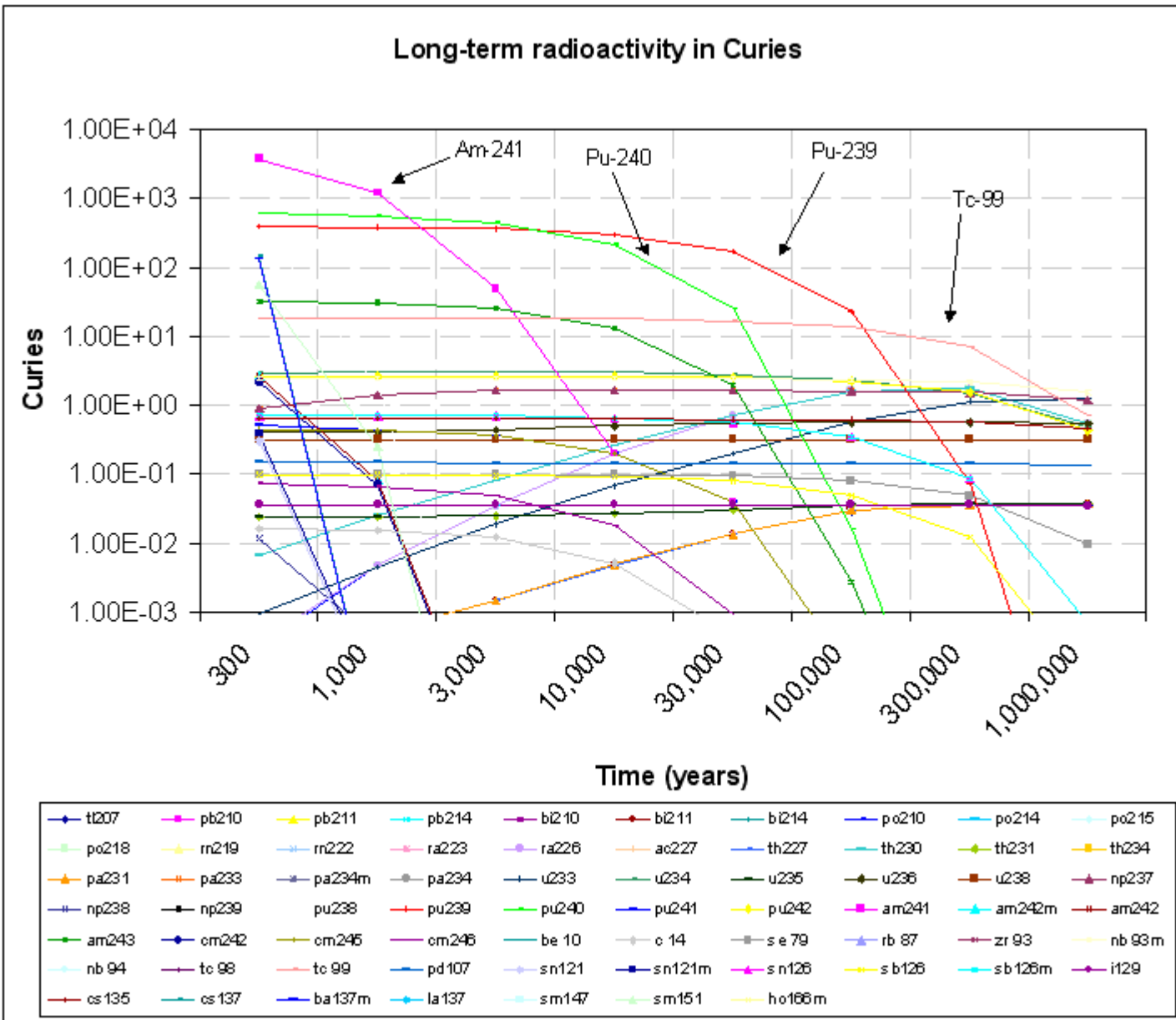
Zusammensetzung, Gewichtsprozent	
Vor dem Einsatz	Nach dem Einsatz
3,6 % U-235	0,8 % U-235
96,4 % U-238	0,4 % U-236
	93,6 % U-238
	1,0 % Pu
	0,1 % Np, Am, Cm
	4,1 % Spaltprodukte

Tabelle aus Bericht GRS-67 (1987).

Extrem langlebige Spaltprodukte: 0,4 % (Tc-99 0,1 %, I-129 0,025 %, Zr-93 0,09 %, Cs-135 0,04 %).

.....Transmutation

Transmutations-Technologie längst Stand der Technik

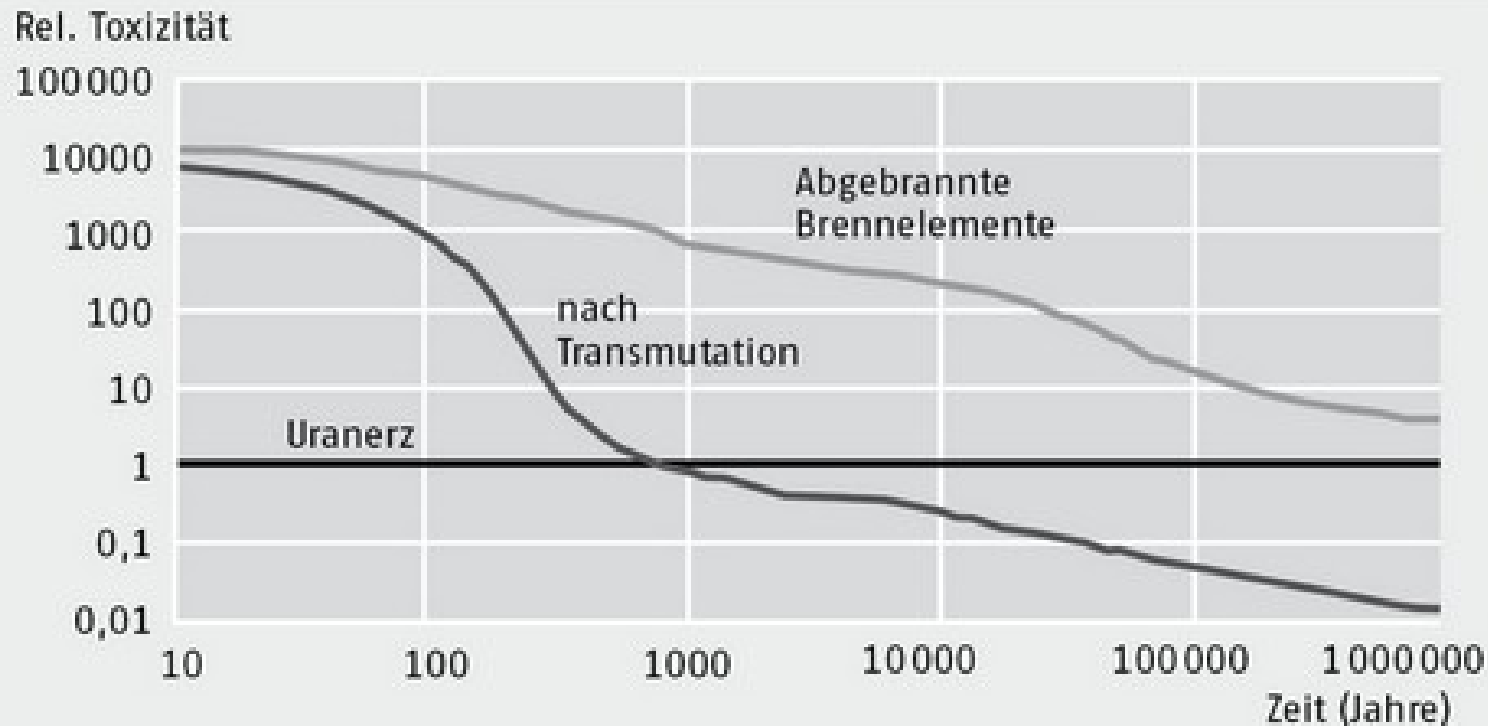


Radioaktivität
LWR Atommüll
(1 t Brennstoff)
Zeitabhängig
1 Ci = 37 GBq

.....Transmutation

- Transmutation plus Partitionierung kann evtl. erreichen:
 - Pu/Minore Aktinide (spaltbar) sind durch Schnelle Spaltung/Spallation großenteils in weniger giftige/kurzlebige Produkte umwandelbar; Uran abtrennbar, teilw. spaltbar (Reduktion Langzeit-Toxizität und waffenfähige Nuklide)
 - Volumenreduktion des langlebigen radioaktiven Abfalls (Faktor 8 bis 10), d.h. Endlager kann kleiner werden
- Aber:
 - Kokillen aus WA (D: Müll bis 2005) nicht transmutierbar
 - Transmutation faktisch beschränkt auf spaltbare Nuklide. Risikodominante, leicht bewegliche Spaltprodukte (I-129, HWZ 15,7 Mio y.....) nicht transmutierbar, da effiziente Neutronenerzeugung nicht existiert

.....Transmutation



Durch Transmutation könnte man die notwendige Lagerdauer von Atommüll auf überschaubare Zeiträume reduzieren. (Bild: D. Eidemüller, Das nukleare Zeitalter, © 2012 S.Hirzel Verlag Stuttgart)

Nur Radiotoxizität durch Ingestion, nicht Risiko im Endlager werden verglichen. Daher einseitig positiv für Transmutation.

.....Transmutation

- d.h. Sicherheit des Endlagers wird kaum verbessert
- Hohe zusätzliche Gefährdung während Transmutation/WA und für einige Jahrhunderte durch kurzlebige Produkte
- **Fazit:**
 - Die auf Transmutation gesetzten Hoffnungen haben sich nur zum geringen Teil erfüllt
 - Ansätze zur Verbesserung sind nicht erkennbar
 - Enorme Kosten
 - Die Umweltbilanz einer Entsorgung mit Transmutation ist vermutlich noch schlechter als die herkömmlicher Entsorgungsstrategien

.....Russische „Transmutationsreaktoren“

- Von fanatisch pronuklearen Kreisen (Nuklearia-Verein....) werden russische schnelle Reaktoren (BN-600, BN-800) als Einstieg in die Transmutation gefeiert („*Transmutations-Technologie längst Stand der Technik*“). Die Realität:
 - Der BN-600-Reaktor wird zum Verbrennen von russischem überschüssigen Waffenplutonium benutzt. Waffenplutonium ist ein guter Kernbrennstoff, vor allem in schnellen Reaktoren. Mit Entsorgung von normalem Atommüll hat der BN-600 bisher nichts zu tun
 - Der BN-800 ist ein klassischer, energieerzeugender schneller Brüter, der mit MOX betrieben wird, und dabei keine zusätzlichen Minoren Aktinide produzieren soll
 - Vage Pläne „später“ Minore Aktinide zu verbrennen

Schlussfolgerungen

- Die besprochenen angeblich innovativen Optionen der Nukleartechnik sind nicht zukunftsfähig (Sicherheit, Entsorgung, Proliferation....)
- Es handelt sich um um Jahrzehnte alte, schon früher gescheiterte Ansätze
- Diese Einschätzung wird dadurch bestätigt, dass die westliche Nuklearindustrie keine eigenen Geldmittel dafür einsetzt (nur begrenzte öffentliche Mittel)
- Aber: Schwellenländer mit noch niedrigem Sicherheitsstandard (China, Indien, Russland, Saudi-Arabien...) verfolgen diese Optionen. Hier muss Aufklärung usw. ansetzen, um global wirksamen Fehlentwicklungen zu begegnen
→ FZJ offeriert HTR-know how an Schwellenländer