

# AVES Pfannenstil

Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES)  
Regionalgruppe Pfannenstil  
c/o Dr. Hans R. Moning AG, Gotthardstrasse 10, 8800 Thalwil  
Postkonto 80-10120-3  
www.aves-zh.ch



---

BULLETIN Nr. 71

November 2014

---

## Es gibt ein Leben nach den energiepolitischen Wendemanövern

Liebe Leserin, lieber Leser

Zugegeben, das Prinzip eines Windrads, eines Sonnenkollektors oder auch eines Fotovoltaik-Panels ist leichter zu verstehen als die kernphysikalischen Prozesse, die der Energieversorgung der Zukunft schier unbegrenzte Potenziale erschliessen könnten. Wie schon oft erklärt unser Autor, Arthur Ruh, auch im vorliegenden Bulletin – diesmal unter dem Titel Thorium als Kernbrennstoff – Forschungsanstrengungen, die zwar nicht kurzfristig, jedoch mit durchaus realistischen Erfolgsaussichten zum Ziel einer sicheren, wirtschaftlichen Energieversorgung führen können, die weder Klima noch das Bild von Landschaft und Siedlungen beeinträchtigt.

Für die Konzentration, die bei der Lektüre des Textes erforderlich ist, wird der Leser belohnt mit interessanten und auch ermutigenden Einblicken. Ein technologischer Befreiungsschlag, der uns von den momentanen zermürbenden energiepolitischen Querelen erlösen könnte, scheint durchaus in den Bereich des Möglichen gerückt zu sein.

Ohne Zweifel werden sich die wirklich aussichtsreichen Lösungen des Energieproblems der Menschheit dereinst durchsetzen. Auch wenn heute in einzelnen Ländern willkürlich und übereilt gewählte Optionen mit sehr fragwürdigem Potenzial als „alternativlos“ mit politischer Macht „durchgedrückt“ werden. Angesichts globaler wirtschaftlicher Konkurrenz und geopolitischer Rivalitäten gewinnt eine zuverlässige und effiziente Energieversorgung zunehmend an Bedeutung. Weltweit ist in dieser Hinsicht mehr in Bewegung, als wir gemeinhin ahnen. Lassen wir uns überraschen – hoffentlich nicht als Verlierer.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

AVES Regionalgruppe Pfannenstil

Hans R. Moning

## Inhalt

Thorium als Kernbrennstoff

Seite 2

## Thorium als Kernbrennstoff

Dr. Arthur Ruh, dipl. Physiker ETH

### Kernspaltung

Ein Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen<sup>1</sup>. Während Neutronen elektrisch neutral sind, tragen Protonen eine positive elektrische Ladung (Elementarladung  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ ). Da gleichnamige elektrische Ladungen sich gegenseitig abstossen, wäre ein Atomkern nicht stabil, wenn nicht neben den elektrischen Kräften noch zusätzliche Kräfte wirken würden. Diese Kräfte werden als *Kernkräfte* bezeichnet. Sie werden durch die so genannte *starke Wechselwirkung* verursacht und wirken anziehend. Während die elektrischen Kräfte theoretisch eine unendlich grosse Reichweite haben, wirken die Kernkräfte nur in unmittelbarer Nähe. In einem Atomkern stossen sich die Protonen alle gegenseitig ab, aber nur die benachbarten Nukleonen (Protonen und Neutronen) ziehen sich gegenseitig an. Ab einer bestimmten Protonenzahl überwiegen daher die abstossenden Kräfte und der Kern ist nicht mehr stabil.

Die Kernkräfte wirken ähnlich wie die Molekularkräfte nur auf kurze Distanzen und nur zwischen wenigen Teilchen. Deshalb verhält sich ein Kern in vieler Hinsicht analog zu einem Flüssigkeitstropfen, der durch die Oberflächenspannung zusammengehalten wird. Mit Hilfe des *Tröpfchenmodells*<sup>2</sup> konnten BETHE und WEIZSÄCKER 1935 eine Formel herleiten, mit der die Atommasse eines Nuklids<sup>3</sup> aus der Protonenzahl  $Z$  und der Massenzahl  $A$  (Zahl der Protonen + Zahl der Neutronen) mit erstaunlicher Genauigkeit berechnet werden kann.

Die Massenformel zeigt, dass für Massenzahlen grösser als 100 die totale Masse von zwei etwa gleich grossen Bruchstücken eines Kerns kleiner ist als die Masse des ursprünglichen Kerns. Das bedeutet, dass bei der Spaltung eines solchen Kerns Energie freigesetzt wird. Dass Kerne mit  $A > 100$  überhaupt noch stabil sind, ist darauf zurückzuführen, dass bei der einer Spaltung vorangehenden Deformation eines Kerns die Oberflächenenergie stark zunimmt, da analog wie bei einem Flüssigkeitstropfen an der Oberfläche eines

<sup>1</sup> Dass Protonen und Neutronen (vereinfacht ausgedrückt!) ihrerseits aus je drei Quarks bestehen, muss in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt werden.

<sup>2</sup> In den meisten Fällen ist ein physikalisches System viel zu kompliziert, als dass es direkt beschrieben und erklärt werden könnte. Das zu untersuchende System kann dann vielleicht durch ein vereinfachtes Modell ersetzt werden, das aber die für das betrachtete Problem wesentlichen Eigenschaften richtig wiedergibt. Dabei darf aber nie vergessen werden, dass das verwendete Modell nicht die Wirklichkeit ist und dass jedes Modell die Wirklichkeit nur teilweise richtig wiedergeben kann.

<sup>3</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

Kerns eine Oberflächenspannung wirkt. Bei einer Kernspaltung muss also während der Deformation eine *Energiebarriere* überwunden werden.

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Energie als Funktion des Parameters  $r$ . Für grosse Werte von  $r$  stellt  $r$  den Abstand der Schwerpunkte der beiden Kernteile dar. In dem Bereich, in dem der Kern noch ungespalten ist, beschreibt  $r$  in geeigneter Weise die Deformation des Kerns.

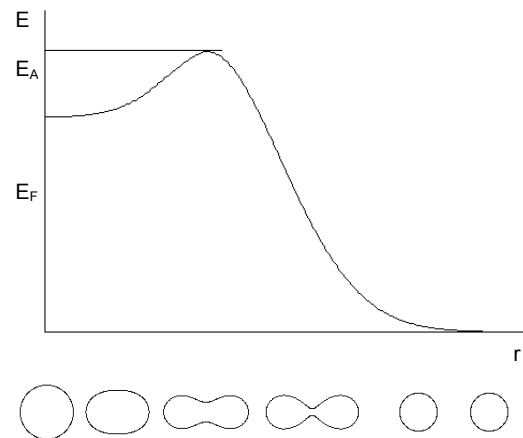


Abbildung 1:  
Schematische Darstellung der Kerndeformation und des Energieverlaufs.

Der Parameter  $r$  ist für kleine Werte ein Mass für die Deformation des Kerns und entspricht bei grossen Werten dem Abstand der beiden Spaltfragmente.

$E_F$  ist die bei der Spaltung (Fission) freiwerdende Energie, und  $E_A$  ist die *Aktivierungsenergie*, die zur Überwindung der Energiebarriere aufgewendet werden muss. Diese Energie wird auch als *Spaltbarriere* oder *Spaltschwelle* bezeichnet. Sie ist eine (komplizierte) Funktion von  $Z^2/A$ . Für  $Z = 120$  und  $A = 300$  wird  $E_A = 0$ , und der Kern wird instabil.

Nach den Gesetzen der klassischen Physik kann ein Teilchen eine Energiebarriere  $E_A$  nicht überwinden, wenn seine Energie  $E$  kleiner ist als die Höhe der Barriere. Nach der Quantentheorie gibt es jedoch eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen eine Energiebarriere „durchdringen“ kann, die nach den Gesetzen der klassischen Physik unüberwindbar wäre. Dieses Phänomen wird *Tunneleffekt* genannt<sup>4</sup>. Die Wahrscheinlichkeit für einen Tunneleffekt ist umso kleiner, je kleiner das Verhältnis  $E/E_A$  ist.

<sup>4</sup> Der Tunneleffekt wird nur bei molekularen, atomaren und subatomaren Teilchen beobachtet. Ein Minigolfspieler hofft vergeblich, dass ein Ball, der eine zu kleine Geschwindigkeit hat, um ein Hindernis überwinden zu können, dank des Tunneleffekts trotzdem ins Ziel gelangen könnte. Der Ball wird unfehlbar zurückrollen.

Offenbar gibt es somit zwei Möglichkeiten, wie ein Kern sich spalten kann. Wenn die Spaltbarriere nicht zu hoch ist, gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit für eine *spontane Spaltung* infolge des Tunneleffekts. Die Wahrscheinlichkeit hängt sehr stark in erster Linie von  $Z$  ab. Für  $Z = 92$  (d.h. Uran) ist die Halbwertszeit<sup>5</sup> für spontane Spaltung in der Grössenordnung von mehr als  $10^{16}$  Jahren, für  $Z = 98$  (d.h. Californium) ist sie nur noch im Bereich von 1000 Jahren. Die Halbwertszeit für spontane Spaltung darf nicht mit der Halbwertszeit für Alphazerfall<sup>6</sup> verwechselt werden. Uran 235 hat eine Halbwertszeit von  $7 \cdot 10^8$  Jahren. Das ist jedoch die Halbwertszeit für Alphazerfall.

Wenn der Kern von aussen eine Energie erhält, die grösser oder gleich der Spaltbarriere ist, kommt es zu einer *induzierten Spaltung*. Die notwendige Energie kann dem Kern zugeführt werden, indem er mit einem Teilchen beschossen wird. Geladene Teilchen, wie Protonen oder Alpha-Teilchen (Heliumkerne) haben den Nachteil, dass sie die elektrostatische Abstossung durch den positiv geladenen Kern überwinden müssen und deswegen mehr als die eigentlich minimal notwendige Energie brauchen. Neutronen können dagegen ungehindert in den Kern eindringen. Wenn das Neutron vom Kern eingefangen wird, kann die dabei freiwerdende Bindungsenergie ausreichen, um die Spaltbarriere zu überwinden.

Analog zu den Elektronen in der Atomhülle können die Nukleonen im Atomkern nur bestimmte Energiezustände annehmen. Jeder Energiezustand kann von maximal zwei Neutronen und zwei Protonen besetzt werden. Wenn die tieferen Energiezustände besetzt sind, muss das nächste Neutron den nächsthöheren Energiezustand einnehmen und wird daher weniger stark gebunden. Das hat zur Folge, dass die Bindungsenergie des letzten Neutrons in einem Kern mit ungerader Neutronenzahl niedriger ist als in einem Kern mit gerader Neutronenzahl.

Zum Beispiel besteht der Kern von Uran 238 aus 92 Protonen und 146 Neutronen. Wird ein Neutron eingefangen, so entsteht ein Kern mit 147 Neutronen, also mit einer ungeraden Neutronenzahl. Deshalb ist die Bindungsenergie dieses Neutrons relativ niedrig. Der Kern von Uran 235 dagegen enthält 143 Neutronen. Beim Einfang eines Neutrons entsteht ein Kern mit 144 Neutronen, d.h. mit einer geraden Neutronenzahl. Ein Neutron, das von Uran 235 eingefangen wird, hat daher eine relativ hohe Bindungsenergie.

Tabelle 1 zeigt die Spaltbarrieren  $E_A$  und die Bindungsenergien  $E_B$  in MeV<sup>7</sup> eines eingefangenen Neutrons für einige Kerne, die für Kernspaltung in Frage kommen.

	$^{232}\text{Th}$ + n =	$^{233}\text{U}$ + n =	$^{235}\text{U}$ + n =	$^{238}\text{U}$ + n =	$^{239}\text{Pu}$ + n =
	$^{233}\text{Th}$	$^{234}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{239}\text{U}$	$^{240}\text{Pu}$
$E_A$	6.5	6.2	5.7	6.5	5.8
$E_B$	4.8	6.8	6.5	4.8	6.5

Tabelle 1: Aktivierungs- und Bindungs-Energien

Die Tabelle zeigt, dass für Thorium 233 und Uran 238 die für die Spaltung notwendige Aktivierungsenergie  $E_A = 6.5$  MeV grösser ist als die Bindungsenergie  $E_B = 4.8$  MeV des letzten Neutrons. Die Neutronen müssen also eine kinetische Energie von mindestens 1.7 MeV haben, um beim Einfang durch Thorium 232 oder Uran 238 eine Spaltung auslösen zu können.

Abbildung 2 zeigt das Energiespektrum der bei einer Spaltung freigesetzten Neutronen. Zwar haben etwa 47 % der Neutronen Energien über 1.7 MeV, aber nach wenigen Zusammenstössen mit den Urankernen<sup>8</sup>, Sauerstoffkernen (im Uranoxid) oder den Atomkernen von Strukturmaterialien ist die Energie der Neutronen unter die Spaltschwelle gesunken.

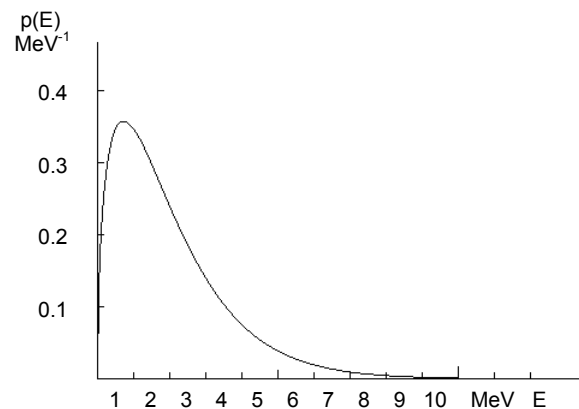


Abbildung 2: Energiespektrum der Spaltneutronen

Dagegen ist für Uran 234, Uran 236 und Plutonium 240 die Bindungsenergie  $E_B$  des letzten Neutrons grösser als die für die Spaltung notwendige Aktivierungsenergie  $E_A$ . Das bedeutet, dass Uran 233, Uran 235 und Plutonium 239 durch den Einfang von Neutronen gespalten werden können, die praktisch keine kinetische Energie haben. Diese Nuklide können also durch thermische Neutronen<sup>9</sup>

<sup>5</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

<sup>6</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

<sup>7</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

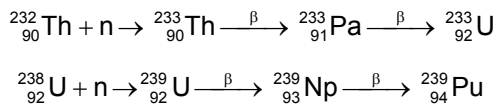
<sup>8</sup> Bei hohen Neutronen-Energien ist die Wahrscheinlichkeit für eine *elastische Streuung* des Neutrons am Uran 238 weitaus grösser als für eine Spaltung. Bei einer elastischen Streuung prallt das Neutron am Atomkern ab, ohne eine Kernreaktion zu bewirken.

<sup>9</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

gespalten werden. Solche Nuklide werden *thermisch spaltbar* genannt.

Somit kann in Uran 233, Uran 235 und Plutonium 239 eine Kettenreaktion aufrechterhalten werden, in Thorium 232 und Uran 238 jedoch nicht.

Die Nuklide Thorium 232 und Uran 238 können aber durch Einfang eines Neutrons in die thermisch spaltbaren Nuklide Uran 233 und Plutonium 239 umgewandelt werden.



( $\beta$  ist das Symbol für den (gewöhnlichen) Betazerfall<sup>10</sup>, Pa steht für Protactinium und Np für Neptunium.)

Diese Prozesse werden in den so genannten Brutreaktoren verwendet.

### Vorkommen

Von den thermisch spaltbaren Nukliden ist nur Uran 235 in der Natur in brauchbaren Mengen zu finden. Zwar kommt auch Plutonium 239 in der Natur vor, aber nur in winzigen Spuren in uranhaltigen Mineralien<sup>11</sup>.

Tabelle 2 liefert die Häufigkeit der Uranisotope in natürlichem Uran.

${}^{234}\text{U}$	${}^{235}\text{U}$	${}^{238}\text{U}$
0.0055 %	0.72 %	99.27 %

Tabelle 2: Relative Häufigkeit der Uranisotope

Weil aus Thorium 232 und Uran 238 die thermisch spaltbaren Nuklide Uran 233 und Plutonium 239 erbrütet werden können, interessieren auch die Häufigkeiten von Thorium 232 und Uran 238. Da Thorium praktisch zu 100 % aus Thorium 232 (die anderen Isotope treten nur in Spuren auf) und Uran zu 99.3 % aus Uran 238 besteht, stellt sich also die Frage nach der Häufigkeit von Thorium und Uran.

Befürworter des Thorium-Kernbrennstoff-Zyklus verwenden oft das Argument, Thorium sei in der Erdhülle 3- bis 4-mal häufiger als Uran. Das ist zwar durchaus richtig, aber eigentlich irrelevant. Der Massenanteil von Uran an der Erdhülle<sup>12</sup> beträgt 3.2 ppm, derjenige von Thorium 11 ppm<sup>13</sup>. Somit ist Thorium tatsächlich 3.4-mal häufiger als Uran. Entscheidend ist jedoch nicht die durchschnittliche Konzentration eines Elements in der

<sup>10</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

<sup>11</sup> Siehe Bulletin Nr. 30.

<sup>12</sup> Die Erdhülle umfasst die Erdkruste bis in eine Tiefe von 16 km, die Hydrosphäre und die Atmosphäre.

<sup>13</sup> ppm = parts per million =  $1 : 10^6$ .

Erdhülle, sondern die Ergiebigkeit der Lagerstätten, in denen das betreffende Element in abbaubarer Konzentration vorkommt.

Dabei muss zwischen Reserven und Ressourcen unterschieden werden. Reserven sind Lagerstätten, die bereits entdeckt und wirtschaftlich abbaubar sind. Ressourcen sind Vorkommen, die zwar nachgewiesen (manchmal aber auch nur vermutet) sind, aber zur Zeit noch nicht wirtschaftlich gefördert werden können.

	Uran	Thorium
Australien	709'000	489'000
Kanada	270'100	44'000
Kasachstan	235'500	
Brasilien	139'600	302'000
Südafrika	114'900	
Namibia	56'000	
Usbekistan	55'200	
Russland	47'500	75'000
Jordanien	44'000	
China	31'800	
USA		400'000
Türkei		344'000
Indien		319'000
Venezuela		300'000
Norwegen		132'000
Ägypten		100'000
Grönland		54'000
Südafrika		18'000
Andere Länder	62'800	33'000
Welt	1'766'400	2'610'000

Tabelle 3: Uran- und Thorium-Reserven in Tonnen<sup>14</sup>

In Tabelle 3 sind die Uran- und Thorium-Reserven in Tonnen aufgeführt. Gemäss dieser Tabelle sind die Thorium-Reserven nur rund 1.6-mal grösser als die Uran-Reserven. Möglicherweise ist das Verhältnis bei den Ressourcen etwas grösser, aber ein Faktor 3 bis 4 ist vermutlich ein wenig optimistisch. Die Zahlen für die Reserven und erst recht für die Ressourcen sind mit ziemlich grossen Unsicherheiten behaftet, und je nach Quelle sind unterschiedliche Werte zu finden.

Die Tabelle zeigt auch, dass einige Länder, vor allem die USA, die Türkei und Indien, die keine nennenswerten eigene Uran-Vorkommen haben, über grosse Thorium-Reserven verfügen.

<sup>14</sup> Uran: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Energiestudie 2009.

Thorium: International Atomic Energy Agency, 2005.

Oft wird behauptet, die Uranvorräte seien begrenzt und würden nur noch für wenige Jahre reichen. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass die Grösse der Reserven noch abhängig ist vom Uranpreis, der als Basis verwendet wird, und dass dieser nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten der Kernenergie hat. Bei einer Erhöhung des Uranpreises könnten Uranreserven erschlossen werden, die heute nicht abbauwürdig wären, wobei zum Beispiel eine Verdopplung des Uranpreises den Strompreis nur um etwa 6 % erhöhen würde.

## Energie aus Uran und Thorium

Wie bereits erwähnt, kann nicht nur Uran 238, sondern auch Thorium 232 mit Hilfe von Brutreaktoren in thermisch spaltbare Nuklide umgewandelt werden.

Wenn Plutonium 239 aus Uran 238 in einem Reaktor erbrütet werden soll, der mit Uran 235 oder Plutonium 239 betrieben wird, muss der Reaktor ein „schneller Brüter“ sein (s. Bulletin Nr. 69). Die bei den bisherigen schnellen Brütern aufgetretenen Probleme (s. Bulletin Nr. 69) haben dazu geführt, dass nur noch wenige Brutreaktoren im Betrieb oder im Bau sind. Die heutigen Uran-Reaktoren nutzen daher praktisch ausschliesslich nur das Uran 235, das im natürlichen Uran eine Häufigkeit von 0.72 % hat.

Dagegen könnte in Thorium-Brutreaktoren Thorium 232 fast zu 100 % in Uran 233 umgewandelt und damit vollständig genutzt werden. Die Spaltung von 1kg Uran 233 liefert praktisch gleich viel Energie wie die Spaltung von 1 kg Uran 235. Somit ist 1 kg Thorium 232 energetisch äquivalent zu 1 kg Uran 235.

In den heutigen Leichtwasserreaktoren wird Uran mit einer (Uran-235-) Anreicherung von 3 bis 5 % eingesetzt. Bei der Anreicherung entsteht zwangsläufig auch abgereichertes Uran, das einen Uran-235-Gehalt von typischerweise 0.3 % hat. Eine einfache Bilanzrechnung zeigt, dass zur Herstellung von auf 3 % angereichertem Uran, das 1 kg Uran 235 enthält, 214 kg Natururan erforderlich sind. Bei einer Anreicherung auf 5 % werden dagegen 224 kg Natururan benötigt.

Offenbar hängt die für 1 kg Uran 235 benötigte Menge Natururan nur schwach vom Anreicherungsgrad ab. Etwas stärker wirkt sich der Grad der Abreicherung aus. Wird der Uran-235-Gehalt des abgereicherten Urans auf 0.2 % heruntergedrückt, so werden 184, bzw. 179 kg Natururan gebraucht.

Anders ausgedrückt, werden rund 180 bis 220 kg Natururan gebraucht, um das angereicherte Uran herzustellen, das für einen herkömmlichen Leichtwasserreaktor benötigt wird, der gleich viel Energie produziert wie 1 kg Thorium in einem geeigneten Brutreaktor.

Wird noch das oben genannte Verhältnis 1.6 der Reserven berücksichtigt, so folgt, dass die Thorium-Reserven rund 290 bis 360 mal so viel Energie liefern können wie die Uran-Reserven (ohne den Einsatz schneller Brüter). Falls tatsächlich mehr als 3-mal so viel Thorium wie Uran zur Verfügung stehen sollte, könnte über 500- bis 600-mal so viel Energie aus Thorium wie aus Uran gewonnen werden.

Nicht alles Uran 235, das in den Brennelementen eines Leichtwasserreaktors enthalten ist, wird tatsächlich gespalten. Ein kleiner Teil wird in Uran 236 umgewandelt, und ein weiterer Teil ist noch in den abgebrannten Brennelementen enthalten und geht verloren, wenn diese nicht wieder aufgearbeitet werden. Andererseits entsteht während des Betriebes durch den beschriebenen Brutprozess aus Uran 238 Plutonium 239, und dieses wird zum Teil gespalten. Die dadurch produzierte Energie kompensiert gerade ungefähr die Energie, die fehlt, weil nicht alles Uran 235 gespalten wird. Für den Vergleich von Uran mit Thorium kann daher näherungsweise so gerechnet werden, als ob alles in den Brennelementen enthaltene Uran 235 gespalten würde.

In einem geeigneten Reaktor, der aus Thorium 232 Uran 233 erbrütet und dieses „verbrennt“, liefert 1 Tonne Thorium eine (thermische) Energie von  $8.2 \cdot 10^{16}$  J. Wenn das Kraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 33 % arbeitet, produziert es eine elektrische Energie von 7'500 GWh.

Im Jahr 2012 waren weltweit 438 Kraftwerksreaktoren in Betrieb, die zusammen 2436 TWh Strom erzeugten, was 11 % der Gesamtstromerzeugung entspricht. Die geschätzten Thorium-Ressourcen, die zu Kosten von \$ 80/kg abgebaut werden können, betragen 5.4 Millionen Tonnen. Damit könnte die aktuelle Kernkraftwerkkapazität während 17'000 Jahren betrieben werden. Wenn die akzeptablen Abbaukosten auf 160 \$/kg oder mehr erhöht würden, wären die Ressourcen noch bedeutend höher und die mögliche Betriebsdauer noch weit aus länger. Auch wenn die totale Kernkraftwerksleistung um einen Faktor 20 erhöht werden müsste, würden die Thoriumvorräte länger als 1000 Jahre reichen.

Längst bevor die Thorium- und Uran-Vorräte erschöpft sind, wird voraussichtlich die Fusion als nahezu unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung stehen<sup>15</sup>.

## Reaktortypen

Es gibt eine ganze Reihe von Reaktortypen, die grundsätzlich geeignet sind, Thorium als Kernbrennstoff zu verwenden.

<sup>15</sup> Siehe Bulletin Nr. 70.

In den **Hochtemperaturreaktoren** THTR-300<sup>16</sup> und Fort St. Vrain wurde Thorium dem Brennstoff zugefügt. Leider führten verschiedene technische Schwierigkeiten dazu, dass diese Reaktoren, die an sich gut geeignet sind für die Verwendung von Thorium, vorzeitig stillgelegt wurden.

Die **Schwerwasserreaktoren** CANDU (Canada Deuterium Uranium) können wegen der guten Neutronenbilanz als Thorium-Brutreaktoren eingesetzt werden. Solche Reaktoren werden in Indien entwickelt.

Sowohl für **Siedewasserreaktoren** als auch für **Druckwasserreaktoren** könnten Brennelemente entwickelt werden, die Thorium enthalten. Mischoxid-Brennelemente (MOX), die Uran und Plutonium enthalten, wurden bereits in rund 30 Reaktoren eingesetzt. Seit April 2013 werden in Norwegen thoriumhaltige Brennelemente getestet.

Auch in **Schnellen Brütern** könnte Thorium verwendet werden, jedoch bietet Thorium in solchen Reaktoren keine wesentlichen Vorteile gegenüber Uran 238.

Die am besten für die Verwendung von Thorium geeigneten Reaktortypen sind die **Flüssigsalzreaktoren**. Im Folgenden werden diese Reaktoren betrachtet, die in Bulletin Nr. 69 beschrieben sind.

## Brutprozesse

Bei einer Kernspaltung entstehen zwei (sehr selten drei) Spaltbruchstücke und zwei bis drei Neutronen. Damit eine Kettenreaktion aufrechterhalten wird, muss im stationären Zustand genau eines dieser Neutronen von einem spaltbaren Kern eingefangen werden und eine weitere Kernspaltung auslösen. Die Neutronen können auch von Atomkernen des Moderators oder der Strukturmaterialien eingefangen werden und sie können von Kernen des Brennstoffs absorbiert werden, ohne jedoch eine Spaltung zu verursachen. Ein kleiner Teil der Neutronen kann auch aus dem Reaktor entweichen. Zur Regelung der Kettenreaktion dienen die Regelstäbe (und bei Druckwasserreaktoren die Borsäure im Kühlwasser), die überzählige Neutronen absorbieren.

Überschüssige Neutronen können aber auch für Brutprozesse dienen. In einem Brutreaktor ist es daher erwünscht, dass eine möglichst grosse Zahl von Spaltneutronen entsteht und dass so wenig wie möglich Neutronen verloren gehen oder absorbiert werden, ohne eine Spaltung oder eine Brutreaktion zu bewirken.

Die mittlere Zahl der Neutronen, die bei einer Spaltung freiwerden, wird üblicherweise mit  $\nu$  bezeichnet.  $\nu$  ist also die Zahl der Neutronen, die *pro Spaltung* freigesetzt werden. Sie darf nicht mit  $\eta$  verwechselt werden.  $\eta$  ist die Zahl der Neutronen, die

*pro im Spaltstoff absorbiertes Neutron* freigesetzt werden.

Da ein Neutron von einem Kern des Spaltstoffs absorbiert werden kann, ohne eine Spaltung zu bewirken, gilt die Beziehung  $\eta = p_f \cdot \nu$ . Dabei ist  $p_f$  die Wahrscheinlichkeit, dass vom eingefangenen Neutron eine Spaltung ausgelöst wird. Die folgende Tabelle gibt die Werte von  $\nu$ ,  $p_f$  und  $\eta$  für die Spaltung von Uran 233, Uran 235 und Plutonium 239 mit thermischen Neutronen.

	$\nu$	$p_f$	$\eta$
Uran 233	2.50	0.92	2.30
Uran 235	2.44	0.85	2.07
Plutonium 239	2.88	0.74	2.13

Tabelle 4: Anzahl Spaltneutronen bei Spaltung mit thermischen Neutronen

Als *Konversionsrate* wird das Verhältnis der Zahl der neu entstehenden spaltbaren Kerne zu der Zahl der durch Spaltung verbrauchten Kerne bezeichnet. In den Leichtwasserreaktoren werden Konversionsraten von bis zu 0.7 erreicht. Ein Brutreaktor ist ein Reaktor, dessen Konversionsrate grösser als 1 ist, d.h. er ist ein Reaktor, der mehr Brennstoff produziert, als er verbraucht.

In einem Brutreaktor wird von den Spaltneutronen ein Neutron für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion gebraucht, und mehr als ein Neutron muss für den Brutprozess zur Verfügung stehen, damit eine Konversionsrate von mehr als 1 erreicht wird. Da unvermeidlicher Weise ein Bruchteil der Spaltneutronen nicht durch den Brennstoff, sondern durch andere Materialien absorbiert wird und ein Teil der Neutronen aus dem Reaktor entweicht, muss  $\eta$  deutlich grösser sein als 2.

Tabelle 4 zeigt, dass die Werte von  $\eta$  für Uran 235 und Plutonium 239 so knapp über 2 liegen, dass es kaum möglich ist, mit diesen Nukliden in einem thermischen Reaktor eine Konversionsrate von mehr als 1 zu erreichen. Weil hingegen  $\eta$  für schnelle Neutronen beträchtlich grösser ist als für thermische Neutronen, werden die meisten Brutreaktoren, die Uran 235 oder Plutonium 239 als Brennstoff verwenden, mit schnellen Neutronen betrieben.

Tabelle 4 zeigt auch, dass das aus Thorium gewonnene Uran 233 eine deutlich günstigere Neutronenbilanz hat.

<sup>16</sup> Siehe Bulletin Nr. 69.

Ein weiterer Vorteil von Thorium als Brutstoff ist sein grosser Wirkungsquerschnitt<sup>17</sup> für den Einfang eines Neutrons. Tabelle 5 gibt die Wirkungsquerschnitte für thermische Neutronen von Thorium 232 und Uran 238.

	$\sigma$ (barn)
Thorium 232	7.35
Uran 238	2.68

Tabelle 5: Wirkungsquerschnitte für die Absorption thermischer Neutronen

Dank diesen Eigenschaften von Thorium 232 und Uran 233 können Thorium-Brutreaktoren mit thermischen Neutronen betrieben werden.

### Thorium-Uran-Zyklus

Im Gleichgewichtszustand wird in einem Thoriumreaktor dauernd mindestens genau so viel Uran 233 erbrütet, wie „verbrannt“ wird. Um den Zyklus zu starten, muss entweder die erste Ladung Uran 233 in einem konventionellen Reaktor erbrütet werden, oder als erste Brennstoffladung muss Uran 235 oder Plutonium 239 verwendet werden.

### Radioaktive Abfälle

Abgebrannter Kernbrennstoff enthält zwei Arten von radioaktiven Abfällen.

### Spaltprodukte

Bei der Spaltung eines schweren Atomkerns entstehen (in der Regel) zwei Bruchstücke. Diese haben bei einer durch thermische Neutronen ausgelösten Spaltung etwas unterschiedliche Massen.

Abbildung 3 zeigt den Häufigkeitsverlauf der Massen der Spaltfragmente. Da pro Spaltung zwei Fragmente entstehen, ergibt die Summe aller Häufigkeiten 200 %.

Da der Neutronenanteil bei den schweren Kernen bedeutend höher ist als bei den leichten Kernen, nämlich z.B. 61 % bei Uran 238 gegenüber 50 % bei Kohlenstoff 12, haben die bei einer Spaltung entstehenden Spaltfragmente einen hohen Neutronenüberschuss und sind deshalb instabil. Sie zerfallen durch Betazerfall, d.h. sie emittieren ein Elektron (und ein Antineutrino). Dabei entsteht bei manchen Zerfällen auch Gammastrahlung.

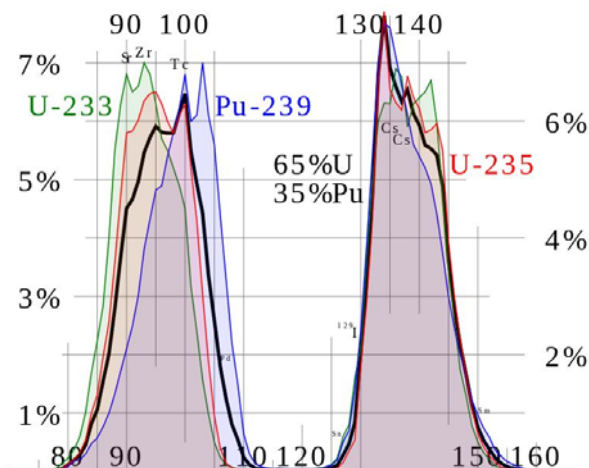


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der Spaltfragmente als Funktion der Massenzahl bei der thermischen Spaltung von Uran 233, Uran 235 und Plutonium 239. (Bild: Thermal Fission Yield, JWB, Wikipedia)

Nahezu alle Spaltprodukte haben Halbwertszeiten von weniger als 100 Jahren, nur 7 Spaltprodukte haben Halbwertszeiten zwischen 211'000 und 15.7 Millionen Jahren. Diese langlebigen Spaltprodukte sind: Technetium 99 (211'000 a<sup>18</sup>, 6.1 %), Zinn 126 (230'000 a, 0.11 %), Selen 79 (327'000 a, 0.045 %), Zirkon 93 (1.52 Ma, 5.5 %), Cäsium 135 (2.3 Ma, 6.9 %), Palladium 107 (6.5 Ma, 1.2 %), Iod 129 (15.7 Ma, 0.84 %).

Die Radiotoxizität<sup>19</sup> eines radioaktiven Nuklids hängt ab von der Art (Alpha, Beta, Gamma) und Energie der Strahlung und von der Halbwertszeit des Zerfalls. Eine lange Halbwertszeit ist zwar einerseits unerwünscht, aber bedeutet andererseits auch eine geringere Strahlungsintensität. Ein Nuklid, dessen Halbwertszeit 10 Millionen Jahren beträgt, hat bei gleicher Menge, gleicher Zerfallsart und gleicher Zerfallsenergie eine Million mal schwächere Strahlung als ein Nuklid mit einer Halbwertszeit von 10 Jahren.

Während der ersten 100 Jahre wird die Radiotoxizität der radioaktiven Abfälle hauptsächlich durch die Spaltprodukte verursacht. Nach etwa 500 Jahren ist deren Radiotoxizität jedoch soweit abgeklungen, dass sie mit derjenigen von Natururan vergleichbar ist.

<sup>17</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

<sup>18</sup> a = Jahre, Ma = 1'000'000 a

<sup>19</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

## Actinoide

Die Actinoide<sup>20</sup> sind das Actinium und die 14 im Periodensystem folgenden Elemente: Thorium, Protactinium, Uran, Neptunium, Plutonium, Americium, Curium, Berkelium, Californium, Einsteinium, Fermium, Mendeleevium, Nobelium und Lawrencium.

Während sich die Zusammensetzungen der Spaltprodukte von Uran 235 und Uran 233 nur geringfügig unterscheiden, gibt es bei den Actinoiden wesentliche Unterschiede zwischen dem Uran-Plutonium-System und dem Thorium-Uran-System.

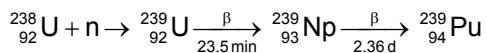
### Uran-Plutonium

Der abgebrannte Brennstoff besteht zu etwa 96 % aus Uran. Der überwiegende Teil davon ist Uran 238, und der Rest ist Uran 235 (etwa 0.9 %) und Uran 236 (etwa 0.4 %). Uran 236 entsteht, wenn Uran 235 ein Neutron einfängt, aber dabei nicht gespalten wird. Da diese Uran-Isotope sehr lange Halbwertszeiten haben, ist ihre Radiotoxizität gering.

	HWZ	Zerfall	Produkt
U 232	68.9 a	Alpha	Th 228
U 233	159'000 a	Alpha	Th 229
U 234	245'000 a	Alpha	Th 230
U 235	704 Ma	Alpha	Th 231
U 236	23.4 Ma	Alpha	Th 232
U 237	6.75 d	Beta	Np 237
U 238	4'470 Ma	Alpha	Th 234

Tabelle 6: Halbwertszeiten, Zerfallsarten und Zerfallsprodukte einiger Uran-Isotope

Rund 3 % des abgebrannten Brennstoffs besteht aus Spaltprodukten und rund 1 % aus Plutonium, das durch den Brutprozess



entstand, aber nicht bereits im Reaktor gespalten wurde.

Wenn Plutonium 239 ein Neutron einfängt, ohne gespalten zu werden, entsteht Plutonium 240, das thermisch nicht spaltbar ist und seinerseits ein Neutron einfangen und sich in Plutonium 241 umwandeln kann. Dieses ist zwar spaltbar, aber kann sich beim Einfang eines Neutrons mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 25 % in Plutonium 242 umwandeln, das wiederum durch Neutroneneinfang zu Plutonium 243 werden kann. In Tabelle 7 sind die Zerfälle der genannten Plutonium-Isotope aufgelistet.

	HWZ	Zerfall	Produkt
Pu 239	24'100 a	Alpha	U 235
Pu 240	6'560 a	Alpha	U 236
Pu 241	14.4 a	Beta	Am 241
Pu 242	375'000 a	Alpha	U 238
Pu 243	4.96 h	Beta	Am 243

Tabelle 7: Halbwertszeiten, Zerfallsarten und Zerfallsprodukte einiger Plutonium-Isotope

Die Americium-Isotope 241 und 243 zerfallen durch Alphazerfall in Neptunium 237 und 239 mit Halbwertszeiten von 432 bzw. 7370 Jahren.

Uran 236, das durch Neutroneneinfang von Uran 235 entstanden ist, kann seinerseits ein Neutron einfangen und sich in Uran 237 umwandeln. Dieses zerfällt durch Betazerfall mit einer Halbwertszeit von 6.75 Tagen in Neptunium 237, dessen Alphazerfall eine Halbwertszeit von 2.14 Millionen Jahre hat.

In analoger Weise entstehen durch Neutroneneinfang und Betazerfall die Curium-Isotope 245 und 246, deren Halbwertszeiten 8500 bzw. 4760 Jahre betragen.

Der Hauptanteil der langlebigen Radioaktivität im abgebrannten Brennstoff von Reaktoren, die mit Uran 235 betrieben werden, stammt von Plutonium 239 und 240, Neptunium 237, Americium 241 und 243, und Curium 245 und 246.

Wenn auf die Wiederaufarbeitung verzichtet wird, werden die abgebrannten Brennelemente nach dem Abkühlen in einem Endlager entsorgt. Statt dass das Plutonium 239 als Kernbrennstoff verwendet wird, wird es als langlebiger und hochaktiver Abfall beseitigt. Zwar können die Kosten für die aufwändige und teure Wiederaufarbeitung eingespart werden, aber dafür wird das Tiefenlager infolge des höheren Abfallvolumens grösser und teurer.

Nach etwa 100 Jahren wird die Radiotoxizität der radioaktiven Abfälle vor allem durch Plutonium, Americium und Curium bestimmt und nach etwas mehr als 100'000 Jahren sind es die Zerfallsprodukte dieser Transurane, die den Hauptanteil der Radiotoxizität ausmachen.

### Thorium-Uran

Wenn der aus Thorium 232 erbrütete Brennstoff Uran 233 verwendet wird, entstehen bedeutend weniger langlebige Transurane als beim System Uran 235 und 238.

Abbildung 4 zeigt die Transmutationen im Thorium-Uran-Zyklus.

<sup>20</sup> Frühere Bezeichnung: Actinide. Die Endung -id sollte für Chloride reserviert bleiben.



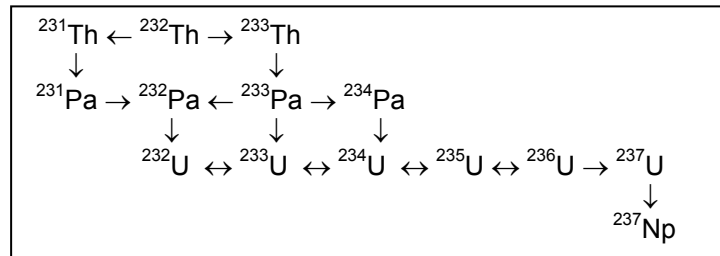


Abbildung 4: Transmutationen des Thorium-Uran-Zyklus

Wenn ein Nuklid ein Neutron einfängt, nimmt seine Massenzahl um eins zu, während seine Ordnungszahl gleich bleibt. Diese Reaktion wird durch einen Pfeil nach rechts  $\rightarrow$  dargestellt. Ein Pfeil nach links  $\leftarrow$  bedeutet eine  $(n,2n)$ -Reaktion. Dabei werden ein Neutron eingefangen, aber zwei Neutronen emittiert. Die Ordnungszahl bleibt gleich, aber die Massenzahl nimmt um eins ab. Ein Doppelpfeil  $\leftrightarrow$  zeigt, dass das Nuklid links ein Neutron einfangen kann und dass das Nuklid rechts eine  $(n,2n)$ -Reaktion machen kann.

Ein Pfeil nach unten  $\downarrow$  schliesslich steht für einen Betazerfall. Dabei bleibt die Massenzahl gleich, aber die Ordnungszahl nimmt um eins zu.

Protactinium 231 hat eine Halbwertszeit von 32'700 Jahren und liefert einen Hauptbeitrag zur Radiotoxizität des abgebrannten Thorium-Uran-Brennstoffs.

Da zur Bildung von Transuranen wie Neptunium mindestens 5 Neutroneneinfänge erfolgen müssen, sind ihre Mengen sehr gering. Aus diesem Grund ist die Radiotoxizität der radioaktiven Abfälle von Thorium-Flüssigsalzreaktoren bis zu 10'000 mal kleiner als diejenige von Druckwasserreaktoren. Nach weniger als 500 Jahren ist die Radiotoxizität dieser Abfälle kleiner als diejenige von natürlichem Uran. Somit müssen diese Abfälle keineswegs „während Millionen von Jahren sicher eingeschlossen werden“.

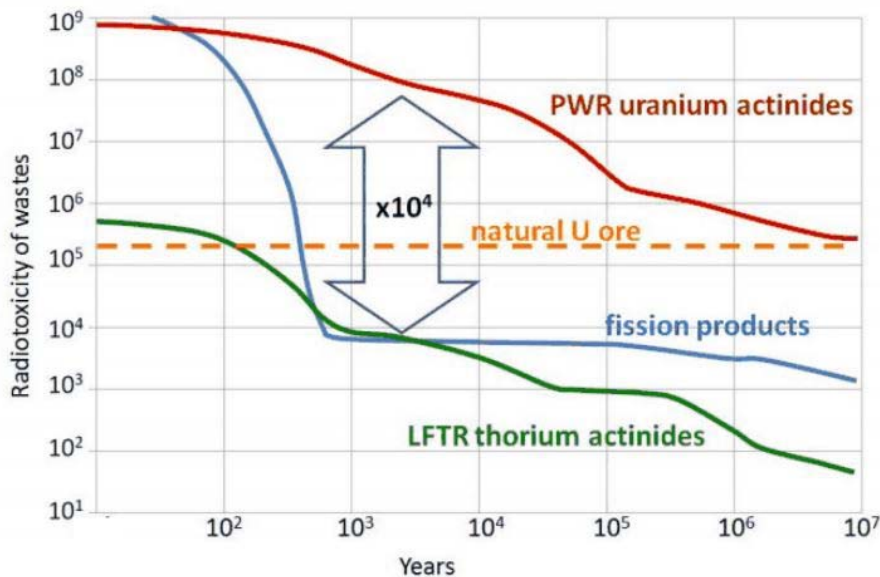


Abbildung 5: Radiotoxizität der radioaktiven Abfälle von 1 Gigawattjahr (thermisch)

**PWR:** Druckwasserreaktor  
**LFTR:** Lithiumfluorid-Thoriumreaktor

**natural U ore:** Uranerz  
**fission products:** Spaltprodukte

(Bild: Robert Hargraves „Thorium: energy cheaper than coal“ und [http://home.comcast.net/~robert.hargraves/public\\_html/AimHighKendal.ppt](http://home.comcast.net/~robert.hargraves/public_html/AimHighKendal.ppt))

### Kontinuierliche Aufbereitung

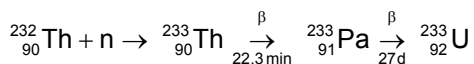
Die Vorteile des Thorium-Uran-Brennstoffzyklus kommen am besten zum Tragen, wenn in einem Flüssigsalzreaktor das Flüssigsalzgemisch kontinuierlich wiederaufbereitet wird. Besonders ein-

fach ist das stetige Entfernen der leichtflüchtigen Spaltprodukte aus dem Flüssigsalz. Wird in die Reaktorflüssigkeit Helium eingeblasen, so lagern sich zum Beispiel Krypton und Xenon an die Helium-Gasblasen an und können so aus dem Salz-

kreislauf entfernt werden. Die nichtflüchtigen Spaltprodukte können in einer an den Reaktor angeschlossenen Wiederaufbereitungsanlage abgetrennt werden, indem dieser 1 bis 10 % des Reaktorinventars pro Tag zugeführt werden.

Durch die laufende Extraktion der Spaltprodukte können sich keine störenden Neutronengifte anhäufen und die Neutronenbilanz wird verbessert. Zudem wird die Menge der Spaltprodukte im Reaktor und damit die abzuführende Nachwärme niedrig gehalten.

Das beim Brutprozess entstehende Protaktinium 233 hat eine Halbwertszeit von 27 Tagen.



Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wird es daher im Reaktor durch Einfang eines Neutrons in Protaktinium 234 umgewandelt, das dann statt in Uran 233 in das nichtspaltbare Uran 234 zerfällt. Dadurch wird die Konversionsrate reduziert. Es ist daher sinnvoll, das Protaktinium ebenfalls aus dem Kreislauf zu entfernen und nur das bei seinem Zerfall entstehende Uran 233 dem Reaktor wieder zuzuführen.

### Vorteile der Lithiumfluorid-Thorium-Reaktoren

Der Thorium-Uran-Brennstoffzyklus ist beim Einsatz in Flüssigsalzreaktoren besonders vorteilhaft. Im Folgenden werden daher Lithiumfluorid-Thoriumreaktoren betrachtet. Die Vorteile von Flüssigsalzreaktoren wurden bereits in Bulletin Nr. 69 beschrieben.

Wird das aus Thorium 232 erbrütete Uran 233 als Brennstoff verwendet, so sind – im Gegensatz zum natürlich vorkommenden Uran – keinerlei Anreicherungsverfahren erforderlich, was niedrigere Brennstoffkosten bewirkt. Zudem ist Thorium wesentlich billiger als Uran.

Wenn der Brennstoff in flüssiger Form verwendet wird, fällt die aufwändige Brennelement-Herstellung weg, wodurch sich eine weitere Kosteneinsparung ergibt.

In den festen Brennelementen der konventionellen Leichtwasserreaktoren häufen sich während des Betriebs Spaltprodukte und Transurane an, die Neutronen absorbieren. Dadurch sinkt die verfügbare Überschussreaktivität, bis schliesslich keine selbsterhaltende Kettenreaktion mehr möglich ist. Das begrenzt den maximal möglichen Abbrand. Die Brennelemente müssen daher periodisch ausgewechselt werden, was einen Betriebsunterbruch von mehreren Wochen pro Jahr erzwingt. In einem Flüssigsalzreaktor können dagegen laufend die Spaltprodukte und Aktinoiden aus dem Flüssigsalz entfernt und neuer Brutstoff hinzugefügt werden, ohne dass der Betrieb unterbrochen werden muss.

Das bewirkt eine weitere Reduktion der Betriebskosten.

Eine zusätzliche Begrenzung des maximal möglichen Abbrandes bei festen Brennelementen rührt davon her, dass die Hüllrohre im Lauf der Zeit infolge von Strahlenschäden undicht werden können. Bei flüssigem Brennstoff gibt es keine derartige Begrenzung.

Durch die laufende Extraktion der Spaltprodukte können sich keine Neutronengifte<sup>21</sup> wie Xenon 135 akkumulieren, welche die Reaktordynamik ungünstig beeinflussen würden.

Bei festen Brennelementen gibt es unerwünschte Absorptionen von Neutronen an den Strukturmaterialien der Brennelemente. Reaktoren mit flüssigem Brennstoff haben keine solchen Neutronenverluste und erreichen deshalb bessere Konversionsraten.

Da 1 kg Thorium im Gleichgewichtszyklus Thorium 232 / Uran 233 gleich viel Energie liefert wie 25 kg angereichertes Uran (mit einer Anreicherung von 4 %), ist ein Thoriumreaktor wesentlich kompakter als ein Leichtwasserreaktor konventioneller Bauart mit gleicher Leistung.

Ein besonders grosser Vorteil eines Flüssigsalzreaktors besteht darin, dass keine Gefahr einer Kernschmelze existiert, da ja der Brennstoff zum vornherein flüssig ist.

Das Kühlsystem eines Leichtwasserreaktors steht unter einem hohen Druck (etwa 70 bar bei einem Siedewasserreaktor und etwa 150 bar bei einem Druckwasserreaktor). Einerseits bedingt das grosse Wandstärken bei den Rohrleitungen und beim Reaktordruckgefäss und andererseits wird bei einem Leck im Kühlsystem eine grosse Menge Dampf freigesetzt. Das Sicherheitsgebäude muss dementsprechend ausgelegt sein, dass es in einem solchen Fall nicht einem unzulässig hohen Druck ausgesetzt wird. In Salzkreislauf eines Flüssigsalzreaktors herrscht dagegen ein Druck von nur wenigen bar, weshalb die erforderlichen Wandstärken der Leitungen und des Reaktorgefässes viel geringer sind als bei einem Leichtwasserreaktor. Im Fall eines Lecks kommt es nicht zu einem explosionsartigen Ausdampfen. Falls überhaupt ein Containment als notwendig erachtet wird, kann dieses wesentlich kleiner sein. Aus diesen Gründen wird die ganze Anlage bedeutend kostengünstiger.

Ein Flüssigsalzreaktor kann so konzipiert werden, dass er einen stark negativen Temperaturkoeffizienten<sup>22</sup> hat. Damit ist er inhärent sicher und weitgehend selbstregulierend. Wenn aus irgendeinem Grund die Reaktorleistung zunimmt oder die entnommene Wärmeleistung (d.h. die Kühlung)

<sup>21</sup> Siehe „Vergiftung“ im Glossar in Bulletin Nr. 69.

<sup>22</sup> Siehe Glossar in Bulletin Nr. 69.

abnimmt, steigt die Temperatur der Salzschnmelze und die Zahl der Kernspaltungen pro Zeiteinheit wird reduziert, die Reaktorleistung nimmt ab und die Temperatur sinkt wieder. Wenn andererseits die Reaktorleistung sinkt oder dem Reaktor mehr Wärmeleistung entzogen wird, sinkt die Temperatur der Salzschnmelze, dadurch steigt die Reaktorleistung, und die Temperatur regelt sich wieder hoch.

Wenn der vom Flüssigsalzreaktor betriebene Generator aus irgendeinem Grund keinen Strom produziert und zugleich die externe Stromversorgung ausfällt, sorgt eine Schmelzsicherung für eine sichere Abschaltung des Reaktors. Am Boden des Reaktors befindet sich eine Öffnung, die normalerweise durch Salz, das durch Kühlung im festen Zustand gehalten wird, verschlossen ist. Versagt das Kühlsystem, so schmilzt der Salzpfropfen und die Reaktorflüssigkeit fließt in Auffangbehälter ab, die so gestaltet sind, dass keine Kettenreaktion mehr möglich ist und dass sie nicht aktiv gekühlt werden müssen. Es braucht daher keine Energieversorgung, um den Reaktor im abgeschalteten Zustand sicher zu kühlen, sondern es braucht Energie, um den Reaktor in Betrieb zu halten.

### **Probleme und Nachteile der Lithiumfluorid-Thorium-Reaktoren**

Genauere Untersuchungen haben gezeigt, dass ein negativer Temperaturkoeffizient bei einem graphitmoderierten Lithiumfluorid-Thorium-Reaktor nur durch richtige Wahl der Abmessungen der Graphitelemente und der Flüssigsalz-Kanäle erzielt wird. Die höchsten negativen Temperaturkoeffizienten und die höchsten Konversionsraten werden erreicht, wenn auf den Graphitmoderator ganz verzichtet wird und der Reaktor mit schnellen Neutronen betrieben wird. Ein schneller Reaktor braucht jedoch ein grösseres Spaltstoffinventar als ein thermischer Reaktor.

Falls nicht genügend Uran 233 (aus anderen Reaktoren) zur Verfügung steht, muss der Reaktor mit Uran 235 oder Plutonium 239 in Gang gesetzt werden. Dabei entstehen die unerwünschten Transurane. Diese Anfangsphase dauert umso länger, je kleiner die Konversionsrate ist.

Die laufende Wiederaufarbeitung der Flüssigsalzmischung ist ein komplexer chemischer Prozess, für den noch wenig Erfahrungen vorliegen.

Für Flüssigsalzreaktoren gibt es im Gegensatz zu den meisten anderen Reaktorkonzepten noch keine detaillierten Sicherheitsanalysen. Insbesondere sind die bei der laufenden Wiederaufarbeitung der Flüssigsalzmischung möglicherweise auftretenden Sicherheitsprobleme noch abzuklären.

Beim Rückbau des MSRE<sup>23</sup> wurde entdeckt, dass Uran 233 in das Aktivkohlefilter des Abgassystems gelangt war. Es wird vermutet, dass durch Radiolyse Fluor aus dem Fluorid entstand, das dann mit dem UF<sub>4</sub> das leichtflüchtige UF<sub>6</sub> bildete. Es könnte sein, dass dieser Prozess erst nach dem Abschalten des Reaktors im verfestigten Salz in den Speichertanks stattfand. Dies würde die Stabilität des Systems im abgeschalteten Zustand in Frage stellen.

### **Proliferations-Risiko**

An sich wäre Uran 233 gut geeignet als Spaltstoff für Kernwaffen. Bevor angereichertes Uran zur Verfügung stand, wurde in Reaktoren, die mit Natururan betrieben wurden, aus Uran 238 Plutonium 239 erbrütet. Diese Reaktoren erreichten nur gerade knapp Kritikalität. Durch Hinzufügen von grösseren Mengen von Thorium 232 zum Erbrüten von Uran 233, wäre keine Kettenreaktion mehr möglich mehr gewesen. Später wurde in Reaktoren, die mit angereicherterem Uran betrieben wurden, während des kalten Krieges etwa 2 Tonnen Uran 233 produziert. Dieses Uran enthält aber immer einen gewissen Anteil von Uran 232, der durch (n,2n)-Reaktionen an Protactinium 233 und Uran 233 entsteht.

Das Uran 232 wirkt sich auf zwei Weisen stark störend aus. Erstens hat Uran 232 eine hohe Alpha-Aktivität (s. Tabelle 6). Infolge von ( $\alpha$ ,n)-Reaktionen an leichten Elementen kann ein in einer Kernwaffe unerwünscht hoher Neutronen-Untergrund entstehen. Zweitens entsteht in der Zerfallsreihe von Uran 232 nach 7 Zerfällen das Nuklid Thallium 208, das in einen angeregten Zustand von Blei 208 zerfällt. Dieser geht durch Emission eines Gammaquants mit einer Energie von 2.6 MeV in den Grundzustand über. Da die ersten beiden Zerfälle der Zerfallsreihe Halbwertszeiten von 69 Jahren und 1.9 Jahren haben, baut sich die Gamma-Aktivität des Thalliums 208 nur langsam auf und erreicht nach 10.1 Jahren ihr Maximum. Das in Leichtwasserreaktoren erbrütete Uran 233 hätte einen Uran-232-Gehalt von typischerweise mehr als 2000 ppm. Ein Jahr nach der Herstellung liefern 5 kg Uran 233 mit 2000 ppm Uran 232 in 0.5 Meter Abstand eine Strahlenbelastung von 0.25 Sievert/h. Damit wäre in 12 Minuten die erlaubte Jahresdosis für strahlenexponierte Personen erreicht.

Die starke Gammastrahlung erschwert den Bau und die Handhabung einer U-233-Kernwaffe, und zudem bewirkt sie schwere Strahlenschäden an der Elektronik, den Zündern und den Explosivstoffen, wodurch die Waffe unter Umständen funktionsunfähig wird. Zwar wurde 1955 von den USA mindestens einmal in der Testreihe „Teapot“ eine

<sup>23</sup> Molten-Salt Reactor Experiment, siehe Bulletin Nr. 69.

Testexplosion mit Plutonium 239 und Uran 233 als Spaltstoffen durchgeführt, aber so viel bekannt ist, wurde von den USA Uran 233 nicht standardmässig für Kernwaffen eingesetzt. Die Sowjetunion und Indien machten ebenfalls Testexplosionen mit Uran 233, und von Indien wird vermutet, dass es wegen seiner grossen Thorium-Vorkommen ein Kernwaffenprogramm entwickelt, das auf Uran 233 basiert.

In einem Thorium-Uran-Zyklus, in dem das Protactinium abgetrennt und ausserhalb des Reaktors zerfallen gelassen wird, könnte jedoch weitgehend reines Uran 233 gewonnen werden. Staaten, die geeignet konzipierte Thorium-Flüssigsalz-Reaktoren betreiben, könnten also ohne allzu grosse Schwierigkeiten U-233-Kernwaffen herstellen.

## Fazit

Obwohl noch einige Probleme ungelöst sind und noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten ist, sind die Vorteile der Thorium-Flüssigsalz-Reaktoren so gross, dass dieses Reaktorkonzept unbedingt weiterverfolgt werden sollte.

## Literatur

Robert Hargraves  
„THORIUM: cheaper than coal“  
CreateSpace Independent Publishing Platform 2012.  
ISBN-13: 978-1478161295

Deutsche Übersetzung von Dr. Simon Aegerter  
„THORIUM – billiger als Kohle-Strom“  
ISBN-13: 978-1497301856

## Zusammenfassung:

[http://www.kaltduschenmitdoris.ch/images/pdf/Buch\\_kurz1.pdf](http://www.kaltduschenmitdoris.ch/images/pdf/Buch_kurz1.pdf)

## Internet-Quellen

<http://ansnuclearcafe.org/2012/10/02/uranium-233-is-a-valuable-resource/>  
<http://arxiv.org/pdf/nucl-ex/0506004>  
[http://csis.org/images/stories/poni/110922\\_3\\_Duchene.pdf](http://csis.org/images/stories/poni/110922_3_Duchene.pdf)  
<http://democrite.ccsd.cnrs.fr/docs/00/02/55/24/PDF/democrite-00021911.pdf>  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Thorium>  
<http://energyfromthorium.com/msrp/wash1222/>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Minor\\_actinide](http://en.wikipedia.org/wiki/Minor_actinide)  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium-based\\_nuclear\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium-based_nuclear_power)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium\\_fuel\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium_fuel_cycle)  
<http://graphics8.nytimes.com/news/business/alvarez.pdf>  
[http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/13/51/41/PDF/ICAPP06\\_TMSR.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/13/51/41/PDF/ICAPP06_TMSR.pdf)  
[http://hal.in2p3.fr/docs/00/04/14/97/PDF/document\\_IAEA.pdf](http://hal.in2p3.fr/docs/00/04/14/97/PDF/document_IAEA.pdf)  
<http://indico.cern.ch/event/222140/session/4/contribution/14/material/slides/1.pdf>  
<http://indico.cern.ch/event/222140/session/7/material/slides/1?contribId=27>  
<http://itheo.org/information>  
<http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/micks2/>  
<http://liquidfluoridethoriumreactor.glerner.com/2012-worthless-for-nuclear-weapons/>  
<http://nucleargreen.blogspot.ch/2008/03/molten-salt-reactors-safety-options.html>

<http://nucleargreen.blogspot.com/2011/07/d-ryan-msriftr-critique-not-ready-for.html>  
<http://nucleargreen.blogspot.com/2011/08/d-ryan-msriftr-critique-not-ready-for.html>  
<http://nucleargreen.blogspot.com/2011/08/da-ryan-spiraling-down.html>  
<http://nucleargreen.blogspot.ch/2011/08/what-are-problems-with-lfr-technology.html>  
<http://pche-sts.blogspot.com/2012/05/disinformation-and-anti-propaganda.html>  
<http://theenergycollective.com/charlesbarton/64177/what-are-problems-lfr-technology>  
<http://theenergycollective.com/charlesbarton/83705/uranium-or-thorium>  
<http://transatomicpower.com/>  
[http://transatomicpower.com/white\\_papers/TAP\\_White\\_Paper.pdf](http://transatomicpower.com/white_papers/TAP_White_Paper.pdf)  
<http://twugbcn.files.wordpress.com/2010/10/lfr-and-anti-proliferation.pdf>  
<http://web.ornl.gov/info/ridgelines/nov12/msre.htm>  
[http://wmdjunction.com/121031\\_thorium\\_reactors.htm](http://wmdjunction.com/121031_thorium_reactors.htm)  
[http://www.achgut.com/dadgdx/index.php/dadgd/article/auch\\_das\\_noch\\_die\\_mini\\_kernreaktoren\\_kommen/](http://www.achgut.com/dadgdx/index.php/dadgd/article/auch_das_noch_die_mini_kernreaktoren_kommen/)  
[http://www.achgut.com/dadgdx/index.php/dadgd/article/auch\\_das\\_noch\\_die\\_mini\\_kernreaktoren\\_kommen\\_teil\\_2](http://www.achgut.com/dadgdx/index.php/dadgd/article/auch_das_noch_die_mini_kernreaktoren_kommen_teil_2)  
<http://www.americanscientist.org/issues/pub/2010/5/a-thorium-future>  
<http://www.aps.org/units/fps/newsletters/201101/hargraves.cfm>  
<http://www.dailykos.com/story/2008/03/16/477737/-More-on-why-we-need-the-Liquid-Fluoride-Thorium-Reactor>  
[http://www.dpg-phy-sik.de/dpg/gliederung/aga/vortraege/2013/2013\\_aga\\_3.2\\_rosenstock\\_schumann.pdf](http://www.dpg-phy-sik.de/dpg/gliederung/aga/vortraege/2013/2013_aga_3.2_rosenstock_schumann.pdf)  
[http://www.energyfromthorium.com/pdf/NAT\\_MSREexperience.pdf](http://www.energyfromthorium.com/pdf/NAT_MSREexperience.pdf)  
<http://www.energyfromthorium.com/pdf/WASH-1097.pdf>  
<http://www.europhysicsnews.org/articles/epn/pdf/2007/02/epn07204.pdf>  
<http://www.final-frontier.ch/thoriumenergie>  
[http://www.focus.de/wissen/technik/atomkraft/tid-22180/physik-gibt-es-das-sichere-atomkraftwerk\\_aid\\_623998.html](http://www.focus.de/wissen/technik/atomkraft/tid-22180/physik-gibt-es-das-sichere-atomkraftwerk_aid_623998.html)  
<http://www.forbes.com/sites/energysource/2012/02/16/the-thing-about-thorium-why-the-better-nuclear-fuel-may-not-get-a-chance/>  
<http://www.freegrab.net/thorium>  
[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/65504/6300-comparison-fuel-cycles.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/65504/6300-comparison-fuel-cycles.pdf)  
<http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/120507.pdf>  
<http://www.heise.de/tp/artikel/40/40515/7.html>  
[http://www.kaltduschenmitdoris.ch/themen/kernenergie/item/118-greentec\\_-\\_aber\\_ richtig](http://www.kaltduschenmitdoris.ch/themen/kernenergie/item/118-greentec_-_aber_ richtig)  
<https://www.nds.iaea.org/>  
<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endl00.jsp>  
[http://www.novo-argumente.com/magazin.php/archiv/novo112\\_77](http://www.novo-argumente.com/magazin.php/archiv/novo112_77)  
<http://www.nuklearforum.ch/de/fakten-und-wissen/faktenblaetter/thorium-als-kernbrennstoff>  
[http://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/130306\\_Faktenblatt\\_Thorium\\_d\\_Web.pdf](http://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/folder-pdf/130306_Faktenblatt_Thorium_d_Web.pdf)  
<https://www.oecd-neo.org/science/pubs/2013/6997-minor-actinide.pdf>  
[https://www.princeton.edu/sqs/publications/sqs/pdf/9\\_1kang.pdf](https://www.princeton.edu/sqs/publications/sqs/pdf/9_1kang.pdf)  
[http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1450\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1450_web.pdf)  
[http://www.springer-vdi-verlag.de/library/common/bwk/eBWK\\_05\\_2002\\_Brune.pdf](http://www.springer-vdi-verlag.de/library/common/bwk/eBWK_05_2002_Brune.pdf)  
<http://www.the-weinberg-foundation.org/2013/04/05/how-thorium-can-solve-the-nuclear-waste-problem-in-conventional-reactors/>  
<http://www.the-weinberg-foundation.org/wp-content/uploads/2013/06/Thorium-Fuelled-Molten-Salt-Reactors-Weinberg-Foundation.pdf>  
[http://www.thoriumenergyalliance.com/downloads/American\\_Scientist\\_Hargraves.pdf](http://www.thoriumenergyalliance.com/downloads/American_Scientist_Hargraves.pdf)  
[http://www.thorium.tv/en/thorium\\_reactor/thorium\\_reactor\\_1.php](http://www.thorium.tv/en/thorium_reactor/thorium_reactor_1.php)  
<http://thoriumforum.com/reserve-estimates-thorium-around-world>  
<http://www.thorium.tv/en/index.php>  
<http://www.torium.se/res/Documents/dleblancnewvisiongenivpdf.pdf>  
<http://www.uxc.com/smr/Library%5CDesign%20Specific/LFTR/Presentations/2009%20-%20Lessons%20for%20the%20LFTR.pdf>  
<http://www.whatisnuclear.com/articles/thorium.html>  
[http://www.whatisnuclear.com/articles/thorium\\_myths.html](http://www.whatisnuclear.com/articles/thorium_myths.html)  
<http://www.whatisnuclear.com/reactors/msr.html>  
[http://www.world-nuclear-news.org/ENF\\_Thorium\\_test\\_begins\\_2106131.html](http://www.world-nuclear-news.org/ENF_Thorium_test_begins_2106131.html)  
<http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Thorium/>