



stoffe – eine vergleichsweise hohe Spontanspaltungsrate, was ihre Verwendung in einfach zu bauenden Bomben ausschließt.

Ein Nachteil von U-233 in der Waffentechnik liegt darin, dass es – wenn es ausschließlich unter dem Gesichtspunkt der Energieerzeugung produziert wird – mit maximal 250 ppm an U-232 (Halbwertszeit 70 Jahre) kontaminiert ist. Das beeinträchtigt die Explosionsfähigkeit zwar nicht, aber die Uran-232-Zerfallsreihe geht in die eingangs erwähnte Thorium-Zerfallsreihe mit dem hart strahlenden Tl-208 über. Eine stark strahlende Bombe ist natürlich – aus Handhabungsgründen und weil die Strahlung die Bombenelektronik stört – im militärischen Umfeld unerwünscht. In den USA gilt eine Grenze von 50 ppm U-232, ab der U-233 als nicht mehr waffentauglich gilt. Trotzdem resultiert aus U-232 keine wirkliche Entlastung der Proliferationsproblematik beim U-233. Zum einen benötigen simple Gun-Anordnungen keinerlei Elektronik; weiterhin dürften Strahlenschutzgesichtspunkte beim Bombenbau durch Terrororganisationen, welche Selbstmordattentäter einsetzen, kaum eine Rolle spielen. Außerdem entsteht der harte Strahler Tl-208 erst am Ende der Zerfallsreihe von U-232. Frisch hergestelltes oder gereinigtes U-233/U-232 strahlt daher für einige Wochen nur wenig und ist leichter handhabbar. Zum anderen lässt sich die Bildung von Uran-232 weitgehend unterdrücken, wenn man beim Erbrüten von U-233 Neutronen mit Energien größer 0,5 MeV ausblendet und Thorium aus Erzen verwendet, die möglichst wenig Uran enthalten. Eine besonders elegante Möglichkeit zur Gewinnung von hochreinem U-233 stellen angedachte Flüssigsalzreaktoren mit integrierter Wiederaufarbeitung dar. Beim Erbrüten von U-233 aus Thorium entsteht nämlich als Zwischenprodukt Protactinium (*Pa-233*) mit einer Halbwertszeit von circa 1 Monat.

Isoliert man – wie in Flüssigsalzreaktoren beabsichtigt – dieses Zwischenprodukt und lässt es außerhalb des Reaktors zerfallen, erhält man ein optimal für Atomwaffen geeignetes U-233.

Ein Vorteil von U-233 gegenüber Pu-239 hinsichtlich militärischer Anwendung liegt darin, dass es viel weniger dazu neigt, bei Neutronenbestrahlung während der Herstellung im Reaktor in unerwünschte, die Explosionsfähigkeit beeinträchtigende, Nuklide überzugehen. U-233 lässt sich (wie U-235) durch Zumischen von U-238 relativ leicht waffentauglich machen: Mischt man dem Thorium bereits bei der Zugabe in den Reaktor abgereichertes Uran zu, erhält man bei der Entnahme ein kaum noch waffenfähiges Nuklidgemisch. In Flüssigsalzreaktoren mit integrierter Wiederaufarbeitung ist das allein allerdings nicht ausreichend wirksam, hier muss zusätzlich auf die Abtrennung von Protactinium-233 (*Pa-233*) verzichtet werden.

Als Fazit ist festzuhalten, dass die Nutzung von Thorium gravierende Proliferationsgefahren mit sich bringt. Diese liegen allerdings weniger darin, dass es für hochentwickelte Staaten damit leichter würde, in den Besitz von High-Tech-Atomwaffen zu gelangen, als vielmehr darin, dass die Hürde zum Bau einfacher, aber hochwirksamer nuklearer Sprengsätze für Terrororganisationen oder instabile Staaten enorm gesenkt wird.

#### Behauptung 4: Thoriumreaktoren sind sicherer als konventionelle Uranreaktoren

Die Spaltung von U-233 ergibt etwa die gleiche Menge der sicherheitsdominierenden Nuklide (*Jod-131, Cäsium-137, Strontium-90*) wie die U-235-Spaltung. Auch die Nachzerfallswärme unterscheidet sich praktisch nicht. Die Unterschiede bei den

gebildeten Aktinoiden (s. nächste Behauptung) sind für das Risiko im AKW-Betrieb/Störfall von untergeordneter Bedeutung. Von daher sind keine sicherheitstechnischen Vorteile für eine Thoriumnutzung zu erkennen. Von größerer sicherheitstechnischer Bedeutung ist, dass die U-233-Spaltung um 60 Prozent weniger sogenannte verzögerte Neutronen liefert als die U-235-Spaltung. Nur aufgrund der Existenz von verzögerten Neutronen ist ein AKW überhaupt regelbar und je größer ihr Anteil ist, umso größer ist auch der Kritikalitätsbereich, in dem eine Regelbarkeit gegeben ist (*man spricht von verzögert überkritisch*). Oberhalb dieses Regelbereichs (*prompt überkritisch*) kommt es zum nuklearen Durchgehen des Reaktors, wie in Tschernobyl geschehen. Das Faktum, dass der verzögert überkritische Bereich bei U-233 deutlich kleiner ist als bei U-235, muss als wichtiger sicherheitstechnischer Nachteil der Thoriumnutzung gewertet werden.

Bei der Auslegung von thermischen Flüssigsalzreaktoren (*Brütern*) stellte man fest, dass sich bei Thoriumverwendung Probleme mit der Kritikalitätssicherheit ergeben, welche die klassische Urannutzung in diesen Reaktoren nicht mit sich bringt. Für Thoriumnutzung in Flüssigsalzreaktoren musste man deshalb auf schnelle Reaktoren ausweichen. Das lässt sich zwar nicht verallgemeinern, zeigt aber, dass Thoriumnutzung zusätzliche größere Sicherheitsprobleme haben kann.

Als gravierendes Sicherheitsmanko der Thoriumnutzung ist auch die eingangs schon erwähnte Notwendigkeit zum Einstieg in Brüter- und Wiederaufarbeitungstechnologie anzusehen. Thorium wird häufig in Verbindung mit sogenannten fortgeschrittenen Reaktoren (*Generation IV*) beworben. Die dabei dem Thorium zugeschriebenen vorteilhaften Sicherheitseigenschaften sind in der Regel nicht

