

Faktenblatt

Oktober 2015

Thorium als Kernbrennstoff – Potenzial für die Zukunft

Seit einiger Zeit wird auf internationaler Ebene wieder über Thorium als Kernbrennstoff diskutiert. Obwohl in der Frühzeit der Nukleartechnik zahlreiche Versuchsreaktoren mit Thorium gebaut wurden, setzte sich das Natururan als heute dominierender Kernbrennstoff durch. Gegenwärtig verfolgen vor allem Indien und China langfristig angelegte Reaktor-Entwicklungsprogramme zur Nutzung der enormen Energieressource, die im Thorium steckt. Die Zukunft wird zeigen, ob es gelingt, diese Ressource zur Deckung des Energiehungers der Menschheit einzusetzen.

Thorium ist wie Uran ein schwach radioaktives Element, das natürlicherweise auf der Erde vorkommt. Entdeckt wurde es 1828 vom schwedischen Chemiker Jöns Jakob Berzelius und wurde unter anderem für Glühstrümpfe von Gaslampen genutzt, weil es beim Erhitzen ein helles, weisses Licht abgibt.

Thorium ist zwar direkt nicht spaltbar, doch lässt sich aus ihm durch Neutroneneinfang das leicht spaltbare Uran-233 gewinnen (Grafik Seite 3). Da beim anschliessenden Spalten des Urans-233 im Mittel mehr als zwei Neutronen frei werden, kann eines von ihnen zum Spalten eines weiteren Urans-233 dienen und das andere, um weiteres Thorium in Uran umzuwandeln.

In einem Reaktor erzeugt dieser Prozess etwas mehr spaltbares Material als er gleichzeitig verbraucht. Die Fachleute sprechen von «Brüten». Es handelt sich dabei natürlich um kein «Perpetuum mobile». Der Brutprozess läuft nur so lange, bis das Thorium durch die Umwandlung in spaltbares Uran-233 aufgebraucht ist.

Die wichtigsten Eigenschaften

Aus Sicht der Neutronenbilanz ist Uran-233 ein idealer Kernbrennstoff, besser noch als die in heutigen kommerziellen Kernkraftwerken genutzten leicht spaltbaren Isotope Uran-235 und Plutonium-239. Die günstigen kernphysikalischen Eigenschaften von Uran-233 erlauben das sogenannte «thermische Brüten» mit abgebremsten, energiearmen Neutronen. Es ist daher in Schwerwasserreaktoren möglich und im Prinzip auch in Leichtwasserreaktoren (wie sie heute in der Schweiz in Betrieb



Foto: Thomas Schüpbach / NMBE

Rohstoff für die Energiegewinnung: Thorium kommt auf der Erde in verschiedenen chemischen Verbindungen vor und ist noch häufiger als Uran. Im Bild das Mineral Thorianit (ThO_2).

stehen), wobei allerdings bei letzteren wesentliche Änderungen an den Brennelementen vorgenommen werden müssten.

Die Verwendung von Thorium als Kernbrennstoff zeigt gegenüber Natururan einige Besonderheiten:

Enorme Energieressource: In der Natur besteht das Thorium fast ausschliesslich aus dem Isotop Thorium-232, dessen Energieinhalt durch den oben beschriebenen Brutprozess im Reaktor genutzt werden kann. Durch die Wiederaufarbeitung (Rezyklierung) des ausgedienten Kernbrennstoffs kann aus Thorium ein Vielfaches mehr an Energie freigesetzt werden als es mit der gleichen Menge Natururan möglich ist, so wie wir den Uranbrennstoff heute nutzen.

Das liegt daran, dass in den heutigen Leichtwasserreaktoren weniger als ein Prozent des Energieinhalts von Natururan freigesetzt wird, da nur das Uran-235 direkt gespalten wird, während der weitaus grösste Teil des Urans-238 übrig bleibt¹. Dazu kommt, dass Thorium in der obersten Erdkruste drei- bis viermal häufiger vorkommt als Uran. Es stellt daher eine enorme Energieressource dar.

Sicherheitstechnisch dürfte sich ein mit Thorium betriebener Reaktor nicht wesentlich von einem jeweils analogen Reaktorsystem auf der Basis von Uran unterscheiden. Eine generelle Aussage ist hier nicht möglich, da es eine grosse Vielfalt von Reaktoren gibt und jedes System erst geprüft werden muss, bevor seine Sicherheit ausgewiesen werden kann. Wird Thorium beispielsweise als Feststoff im Reaktor eingesetzt (wie heute das Uran), müssen hier wie da Vorkehrungen getroffen werden, um im Fall einer Störung die Nachzerfallswärme der im Brennstoff verbleibenden Spaltprodukte abführen zu können.

Kurzlebige radioaktive Abfälle: Zwar ist die Liste der im Reaktor durch das Spalten von Uran-233 entstehenden relativ kurzlebigen radioaktiven Spaltprodukte ähnlich wie beim Uran-235. Beim Betrieb eines reinen Thoriumreaktors entstehen jedoch nur sehr kleine Mengen an langlebigen radioaktiven Elementen wie Plutonium, Americium oder Curium.

Eine geologische Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle ist jedoch auch bei der Nutzung des Thoriums nötig. Vorteilhaft ist aber, dass die Einschlusszeiten bis zum Abklingen der Radioaktivität kürzer sind. Untersuchungen zeigen, dass beim Einsatz eines reinen Thorium-Uran-233-Zyklus nach 500 Jahren der ausgediente Kernbrennstoff radiologisch dem Natururan vergleichbar sein dürfte, wobei hier weitere Forschungsarbeiten die Bedeutung einiger langlebiger Isotope klären müssen.

Starke Gammastrahler: Ein gewichtiger Nachteil von Thorium liegt darin, dass beim Brutprozess immer auch Uran-232 gebildet wird. Dieses Uranisotop ist nicht spaltbar und zerfällt mit einer Halbwertszeit von knapp 70 Jahren. In der dadurch ausgelösten Zerfallsreihe gibt es einige harte Gammastrahler. Da Uran-232 und Uran-233 nicht getrennt werden können, erfordert die Wiederaufarbeitung und die Produktion von Kernbrennstoff auf der Basis von Uran-233 eine starke Abschirmung der Gammastrahlung, was den Prozess verkompliziert und verteuert.

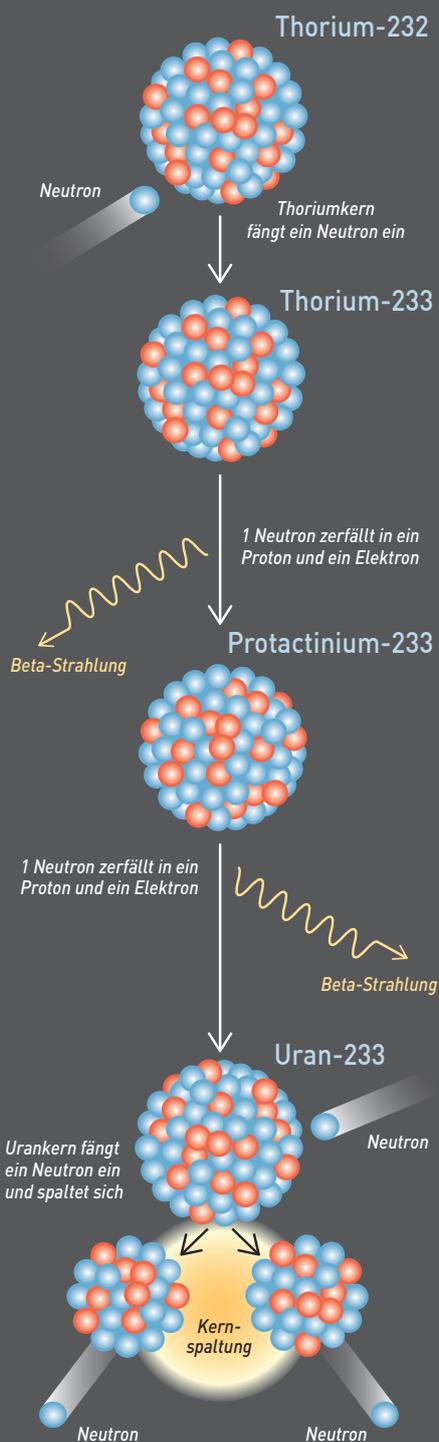
Starthilfe nötig: Ein Reaktor, der ausschliesslich mit Thorium beladen ist, kann nicht selbständig aufstarten. Er benötigt ein «nukleares Zündholz», das die nötigen Neutronen für die ersten Brut- und Spaltprozesse liefert. In Frage kommen heute das Uran-235 (das einzige «nukleare Zündholz», das in der Natur vorkommt) oder das künstlich erzeugte Plutonium. Später käme natürlich das aus Thorium erbrütete Uran-233 dazu, so dass auf das Uran-235 und insbesondere auf das aus dem Uran-238 entstehende Plutonium verzichtet und ein reiner Thoriumreaktor betrieben werden könnte. Wie oben erwähnt, hat das den fundamentalen Vorteil, dass die langlebigen Umwandlungsprodukte weitgehend wegfallen.

Hohe Energieausbeute: Thorium, Uran und Plutonium können gemischt als Kernbrennstoff eingesetzt werden, da sie sehr ähnliche Oxide bilden. Dies ermöglicht zum einen hohe Abbrände, d.h. der Energieinhalt des Kernbrennstoffs kann sehr gut ausgenutzt werden. Das kompensiert den Nachteil, dass

¹ Natururan, so wie es in den Lagerstätten abgebaut wird, besteht zu über 99 Prozent aus dem Isotop Uran-238 und nur zu etwa 0,7 Prozent aus dem leicht spaltbaren Uran-235. Das Uran-238 ist wie Thorium nicht direkt spaltbar, kann aber ebenfalls durch Neutroneneinfang in ein leicht spaltbares Isotop, das Plutonium-239, umgewandelt werden. Für diesen Brutprozess sind jedoch spezielle Reaktoren mit schnellen, energiereichen Neutronen nötig (sogenannte «Schnelle Brüter»). Herkömmliche Leichtwasserreaktoren eignen sich dafür nicht.

Um den Energieinhalt von Natururan im gleichen Masse wie beim Thorium zu nutzen, müsste der heutige Kernkraftwerkspark mit «Schnellen Brütern» und der zugehörigen Wiederaufarbeitung ergänzt werden.

Aus Thorium wird Uran



die Wiederaufarbeitung solcher Mischoxide umständlich ist. Zum anderen eröffnet sich ein Weg, um das heute vorhandene Plutonium unter Energiegewinn zu spalten, ohne dass gleichzeitig neues Plutonium entsteht.

Proliferation: Nachteilig beim Thorium-Kreislauf ist, dass das (waffenfähige) Uran-233 chemisch abgetrennt werden kann. Andererseits erschwert die starke Strahlung der Zerfallsprodukte des neben dem Uran-233 immer auch vorhandenen Urans-232 einen solchen Missbrauch.

Weitere Informationen zu Thorium finden sich auf:

International Thorium Energy Organisation:
<http://itheo.org>

Entwicklung von Kernbrennstoff auf Thoriumbasis:
www.thorenergy.no

Zahlreiche Experimente

Die Verwendung von Thorium als Kernbrennstoff ist nichts Neues. In den 1950er- bis 1970er-Jahren wurde in den USA, in Grossbritannien, Frankreich, Deutschland und Russland eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Reaktor-Prototypen auf Thoriumbasis gebaut. Dabei zeigte sich, dass Thorium in praktisch allen Reaktorsystemen eingesetzt werden kann. Besonderes Augenmerk wur-

Was sind Isotope?

Die Materie in unserem Universum besteht aus Atomen, die aus einem elektrisch positiv geladenen Kern bestehen, der von einer negativ geladenen Elektronenwolke umgeben ist. Der Kern wiederum setzt sich aus noch kleineren Elementarteilchen zusammen, den positiv geladenen Protonen und den elektrisch neutralen Neutronen.

Die Anzahl Elektronen ist gleich gross wie die Anzahl Protonen. Sie bestimmt die chemischen Eigenschaften eines Atoms. Wir sprechen von den chemischen Elementen: Der kleinste Atomkern mit nur einem Proton (und nur einem Elektron) ist der Wasserstoff mit den entsprechenden chemischen Eigenschaften, zwei Protonen ergeben das Edelgas Helium, sechs Protonen den Kohlenstoff usw. Der

schwerste natürlicherweise auf der Erde vorkommende Atomkern ist das Uran mit 92 Protonen.

Während die Atomkerne eines bestimmten chemischen Elements immer gleich viele Protonen enthalten, unterscheiden sie sich in der Zahl der Neutronen. Der Atomkern von Uran-233 beispielsweise enthält neben 92 Protonen auch noch 141 Neutronen ($92+141=233$), während der Kern von Uran-235 neben 92 Protonen zwei Neutronen mehr, nämlich 143 Neutronen aufweist ($92+143=235$).

Wir sprechen hier von zwei verschiedenen Isotopen desselben chemischen Elements. Isotope unterscheiden sich chemisch in der Regel nicht, haben jedoch sehr unterschiedliche kernphysikalische Eigenschaften.



Experimente der Frühzeit: Der Nuklearpionier Alvin Weinberg notiert den Erfolg des Flüssigsalz-Reaktors in Oak Ridge im Jahr 1967.

Foto: Oak Ridge National Laboratory

de auf Hochtemperatur-Reaktoren gelegt, da sich Thorium gut dafür eignet. Bekannte Vertreter dieser Art sind:

- der in Grossbritannien unter Beteiligung der Schweiz gebaute Experimentalreaktor «Dragon» (20 MW, in Betrieb von 1966–1975),
- die deutschen Kugelhaufen-Reaktoren in Jülich (AVR, Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor, 13 MW, 1967–1988) und in Hamm-Uentrop (THTR, Thorium-Hochtemperatur-Reaktor, 300 MW, 1983–1989)
- sowie ein ebenfalls industrieller Prototyp in Fort St Vain, USA (330 MW, 1976–1989).

Der Betrieb der beiden letztgenannten leistungsstarken Reaktoren zeigte, dass das Thorium-Konzept funktioniert, aber noch einige technische Probleme zu lösen sind – beim Betrieb wie auch bei der Herstellung und der Wiederaufarbeitung des Brennstoffs.

Bei einem anderen Experiment im amerikanischen Leichtwasserreaktor Shippingport konnte Ende der 1960er-Jahre nachgewiesen werden, dass der versuchsweise auf Thorium umgestellte Reaktor etwas mehr spaltbares Material erzeugte als er verbrauchte. Hier wurden das Thorium und die Neutronenlieferanten getrennt in verschiedenen Zonen im Reaktor eingesetzt. Die sogenannte «Seed»-Zone enthielt dabei im Wesentlichen das spaltbare Uran-233 und die «Feed»-Zone das brutfähige Thorium-232.

Erfolgreich waren auch Versuche in den 1960er-Jahren in Oak Ridge (USA) mit einem Flüssigsalz-Reaktor auf Uranbasis (MSRE, Molten Salt Reactor Experiment). Die Experimente wiesen die Machbarkeit dieses Reaktorprinzips nach und lassen erwarten, dass ein solcher Reaktor auch auf Thorium-Basis betrieben werden kann und sehr gute Sicherheitseigenschaften haben könnte.

Entwicklungen in Indien und China

Trotz aller Versuche mit Thorium setzte sich in den vergangenen Jahrzehnten das Natururan als primärer Brennstoff durch, unter anderem deshalb, weil es leichter zu handhaben und nach wie vor preisgünstig ist und die Industrie bei der Entwicklung der kommerziellen Reaktorsysteme auf die Uranbrennstoff-Technologie setzte, die sich bereits in Schiffsantrieben bewährt hatte.

Thorium-Konzepte werden heute vor allem in Indien und China verfolgt, die beide über grosse natürliche Thorium-Vorkommen verfügen. Indien möchte anfangs des kommenden Jahrzehnts den ersten fortgeschrittenen Schwerwasserreaktor der 300-Megawatt-Klasse in Betrieb nehmen, der mit Thorium betrieben wird. China seinerseits hat 2011 beschlossen, einen Flüssigsalz-Reaktor auf Thoriumbasis zu entwickeln.

Internationale Programme

Neben Indien und China wird Thorium auch im Rahmen des «Generation IV International Forum» (GIF) untersucht, bei dem die Schweiz einer von 13 Partnern ist. Ziel des GIF ist, für die Zeit nach 2040 grundlegend neuartige Reaktoren und Brennstoffkreisläufe zu entwickeln. Auch im «International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles» (Inpro) der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) ist Thorium ein Thema.

Zurzeit ist Thorium keine industriell erprobte und über Nacht implementierbare Option für kommerzielle Kernkraftwerke. Die Entwicklung der Nukleartechnik ist jedoch in vollem Gang. Welche Systeme sich in den kommenden Jahrzehnten durchsetzen werden, wird die Zukunft zeigen.