

# Neue Kernreaktor Konzepte: Der CANDU Reaktor

geschrieben von Trummler, Horst | 30. Januar 2012

CANDU (Canadian Deuterium Uranium) Reaktor ist ein in Europa weitgehend unbeachtetes Reaktorkonzept. Dieses Reaktorkonzept wurde in Kanada entwickelt und gebaut. Indien hat das Know-How erworben und baut zahlreiche Reaktoren in Indien. Weltweit befinden sich 47 dieser Reaktoren in Betrieb und 4 weitere befinden sich im Bau. Wenn man dieses Konzept näher betrachtet so entdeckt man ein ganz eigenes Konzept mit erheblichem Entwicklungspotential.

Der beste Moderator (*abbremsen der Neutronen*) für einen Kernreaktor ist schweres Wasser.

## **Absorbtionsquerschnitt H<sub>2</sub>O 0,664 barn; D<sub>2</sub>O, 0,00118b**

Schweres Wasser hat die geringste Neutronenabsorbtion, das heißt es gehen am wenigsten Neutronen beim Abbremsen verloren. Dadurch kann man mit derartigen Reaktoren Brennstoff mit einem sehr geringen Anteil an spaltbarem Material verwenden. Die Brutrate kann beim CANDU Reaktors 0,8 (für jedes gespaltene <sup>235</sup>U Atom werden 0,8 spaltbare <sup>239</sup>Pu Atome erbrütet), betragen. Andererseits ist der Abbrems(Stoss)querschnitt des Schweren Wassers viel geringer als der des leichten Wassers.

## **Stoßquerschnitt H<sub>2</sub>O 105 barn, D<sub>2</sub>O 14,5 barn**

In der Konsequenz ist ein Schwerwasserreaktor kernphysikalisch optimal, erfordert jedoch ein größeres Reaktorvolumen als ein Leichtwasserreaktor.



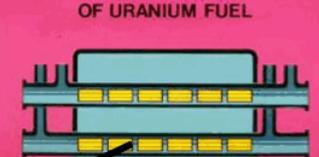
Photo AECL CANDU China

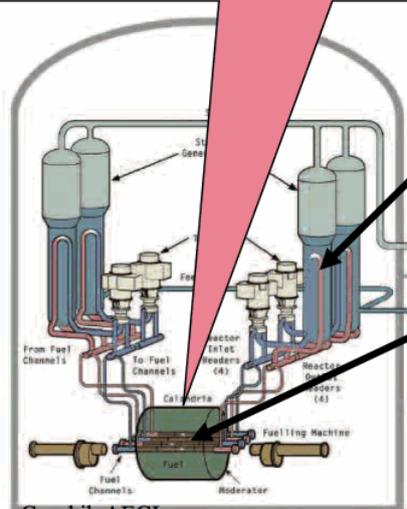
Im gesamten Primärkühlkreislauf und im davon getrennten Reaktorbehälter kommt schweres Wasser D<sub>2</sub>O zum Einsatz.

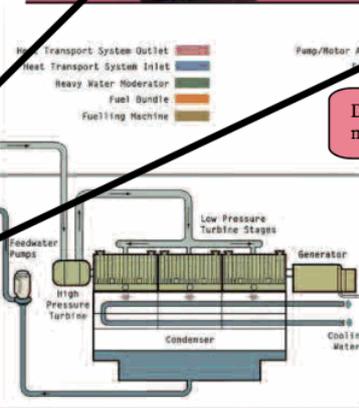
THE HOT HEAVY WATER GOES TO A BOILER WHERE IT TURNS ORDINARY WATER TO STEAM



IN THE TUBES ARE BUNDLES OF URANIUM FUEL









Die Lade-  
maschine

Das Foto zeigt den Reaktorbehälter aus der Seitenansicht. Brennstäbe können während des Betriebs gewechselt werden.

Graphik AECL

Beim Candu Reaktor befinden sich die Brennelemente in Röhren. Die Röhren werden von schwerem Druckwasser durchströmt, dass sich in diesen erhitzt und zu einem Wärmetauscher fließt. Die Druckröhren befinden sich in einem Reaktorbehälter der 60°C warmes, schweres Wasser enthält.

Letztlich hat der mit schwerem Wasser betriebene Candu Reaktor 4 große Vorzüge gegenüber dem Leichtwasserreaktor:

- Ø Aufgrund der Verwendung des optimalen Moderators, schweres Wasser, kann dieser Reaktor mit Natururan als Brennstoff

betrieben werden, oder mit den abgebrannten Brennelementen eines Leichtwasserreaktors.

Ersteres half beispielsweise Indien, welches mit kleinen eigenen Uranvorkommen gesegnet ist, den Sanktionen der USA und anderer Länder im Zuge des Kernwaffenbaus die Wirkung zu nehmen.

Die Nutzung abgebrannten Kernbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren in CANDU Reaktoren ermöglicht es den vorhandenen Brennstoff besser zu nutzen. Ein Kernbrennstoff der im Leichtwasserreaktor 55 MWd/Kg abgebrannt wurde kann z.B. im Candu Reaktor um weitere 10 – 12 MWd/Kg abgebrannt werden. Entsprechende Tests werden aktuell gefahren,

#### **Erläuterung g.**

Ø Die Verwendung von Schwerem Wasser ermöglicht einen höheren Brutfaktor, etwa 0,8 bei der Verwendung von Uran als Brennstoff, verglichen mit dem Brutfaktor des Leichtwasserreaktors von 0,5 -0,6. Bei der Nutzung von Thorium anstelle von Uran (*kleineres Verhältnis zwischen Neutroneneinfang- und Spaltquerschnitt, es werden weniger Transurane gebildet*) kann man einen Brutfaktor von etwas unter 1 erreichen (**h**). Versuche zur Nutzung von Thorium sind in Indien unter Beteiligung von AECL (*Reaktorbauer aus Kanada*) geplant.

Ø Der Reaktor benötigt keinen technisch aufwendigen Reaktordruckbehälter und kann auch von Ländern mit einer weniger entwickelten Technologie gebaut werden.

Ø Die Brennelemente können während des Betriebes gewechselt werden. Es entfällt der jährliche mehrwöchige Stillstand zum Brennelementwechsel. Dadurch ergibt sich eine höhere Betriebszuverlässigkeit. Das Wechseln von Brennelementen während des Betriebs erlaubt es solche nur kurz zu bestrahlen und damit Bombenplutonium zu erbrüten (**Erläuterung f**). Aus den oben genannten Gründen hat vor allem Indien auf diese Reaktorlinie gesetzt und zahlreiche Reaktoren dieses Typs nachgebaut. Indien ist Atommacht geworden.

Daneben gibt es einige gewichtige Nachteile gegenüber dem Leichtwasserreaktor:

Ø Die reinen Baukosten liegen bei einem Candu KKW etwa 1/5 höher als bei einem Leichtwasserreaktor.

Ø Hinzu kommen die Kosten für Schweres Wasser. Ein Candu-6 Reaktor enthält 457to (**20**) davon, es addieren sich 274 Mio. Euro zu den Investitionskosten. Insgesamt ist der Candu Reaktor **damit 1/3 teurer als ein Leichtwasserreaktor** gleicher Nennleistung. Der jährliche Verbrauch an schwerem Wasser dürfte bei etwa 5to zu 600\$/Kg (**21**) liegen, entsprechend 3 Mio. \$/a.

Sofern man eine Anlage zur Umarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren baut, kann sich je nach Anlagenkosten und Betriebskosten eine Ersparnis durch die Nutzung der abgebrannten Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren geben. Der Reaktor muss nicht zu einem mehrwöchigen Brennstoffwechsel stillgelegt werden.

Ø Nach etwa 30 – 35 jährigem Betrieb benötigen die CANDU Reaktoren eine mehrjährige Generalüberholung die einige zig% der Baukosten eines neuen Kernkraftwerks kostet.

Insgesamt ergibt sich ein wirtschaftlicher Nachteil gegenüber dem Leichtwasserreaktor. Der Vorteil liegt in der Verwendung von Natururan als Brennstoff und der Möglichkeit waffenfähiges Plutonium zu erbrüten. **Der Candu Reaktor wird wohl auch künftig nur in Nischen erfolgreich sein.**

## ACR 1000 und andere Weiterentwicklungen des Candu Reaktors

Der ACR baut aufgrund der stärkeren Neutronenabbremung des leichten Wassers in den Druckröhren wesentlich kompakter als der Candu Reaktor

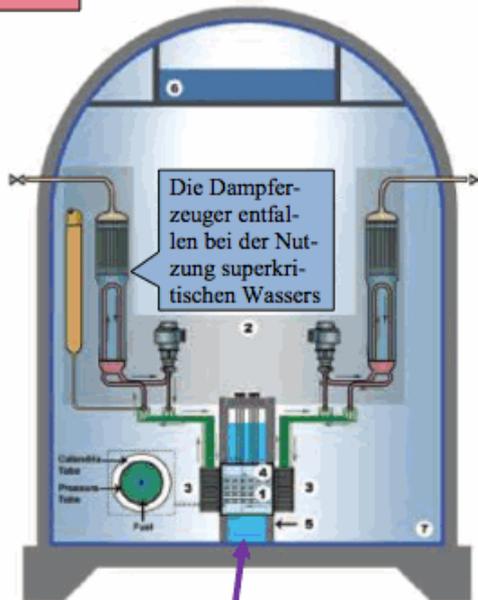
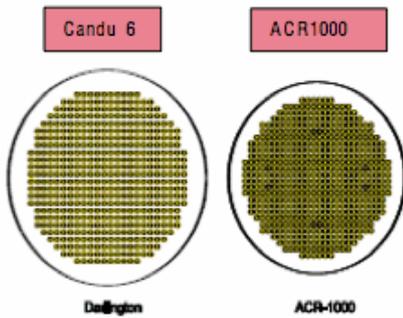


Illustration from AECL



Darstellung einer Druckröhre



Foto Wikipedia

Eine Modifikation des Candu Reaktor Konzepts ist der ACR1000. Im Gegensatz zum Candu Reaktor, bei dem man schweres Wasser für den Moderator und den Primärkühlkreislauf verwendet, wird bei diesem Schweres Wasser lediglich für den Moderator Tank verwendet und normales Wasser für den Primärkühlkreislauf. Der Reaktor baut durch die stärkere Neutronenabbremung des leichten Wassers wesentlich kompakter und ist etwas günstiger als ein Leichtwasserreaktor. Der Nachteil gegenüber dem Candu ist die höhere Neutronenabsorbtion des leichten Wassers, so dass dieser Reaktor mit leicht angereichertem Uran betrieben werden muss, bzw. der Brutfaktor sinkt.

Es wird auch erwogen den ACR1000 mit superkritischem Wasser im Primärkühlkreislauf zu betreiben (s.u. SCWFR). Durch die höheren Betriebstemperaturen ließe sich der Wirkungsgrad auf über 40% steigern, die Dampferzeuger könnten entfallen. Dadurch würde das Kraftwerk noch kompakter bauen und es könnten weitere Kostenvorteile erzielt werden.

Der Reaktorbehälter ist mit etwa 60°C (die Moderator-eigenschaft von  $D_2O$  verschlechtert sich mit steigenden Temperaturen) warmen, schwerem Wasser gefüllt.

Der Zwischenraum zwischen den Druckröhren und den Reaktorkesselrohren ist zugunsten einer besseren Isolierung mit Gas gefüllt.

Leichtes, bzw. superkritisches Wasser strömt durch die Druckröhren und führt die Energie ab.

Brennelement, als Bündel von Brennstäben.. Bei der Nutzung von superkritischem Wasser müssen die Brennstabhüllen der höheren Temperaturen wegen aus Edelstahl gefertigt werden.

Die Nachteile der Verwendung superkritischen Wassers und dem Verzicht auf einen Sekundärkreislauf liegen darin, dass dann die Turbinen mit dem radioaktiven Wasser des Primärkreislaufs gespeist werden und analog der Siedewasserreaktoren Teil des nuklearen Teils des Kraftwerks sind. Die Dichte des superkritischen Wassers sinkt mit steigenden Temperaturen stark was wiederum ggf. zu einem komplexeren Reaktoraufbau führt. Weiterhin müssten die Brennstabhüllen aus Edelstahl anstelle von Zirkonium gefertigt werden, wodurch sich die Neutronenabsorbtion erhöht. **Der ACR1000 und insbesondere die Variante mit superkritischem Wasser ist eine wenig beachtete, wettbewerbsfähige Reaktoralternative mit erheblichem Zukunftspotential.**

## Erläuterungen:

f. Die Frage, ob es als Vorteil empfunden wird wenn Länder zu Atommächten werden können, ist eine Frage der Sicht. Analog eines Jugendlichen der sich einen Gettoblaster kauft und damit sein Umfeld beschallt, wird dies vom Jugendlichen und dem Hersteller des Geräts als Vorteil empfunden, vom Umfeld eher als Nachteil gesehen. Aus der Sicht des Staates in dem ein solcher Reaktor steht ist dies zumindest ein potentieller Vorteil, aus der Sicht anderer Staaten sicherlich nicht.

g. Für den DUPIC Prozess, der Nutzung abgebrannten Kernbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren in CANDU Reaktoren, ergeben sich 3 Optionen:

- Die genutzten hochradioaktiven Brennelemente werden zerlegt, die Brennstäbe in 50cm lange Stücke geschnitten und wiederum verschlossen. (25) Üblicherweise enthalten die Brennstäbe eine Feder um die Brennstofftabletten im Brennstab zu positionieren und ein Spaltgasplenum um einen Überdruck zu vermeiden. Somit erscheint mir fraglich ob dieser Prozess so funktioniert. Dieser Prozess, obwohl einfach, erfordert aber auch Investition in eine geeignete Anlage.

- Die genutzten Brennelemente werden zerlegt, der hochradioaktive Brennstoff von den Brennstabhüllen befreit, zu Pulver gemahlen, mit Sauerstoff erhitzt um einen Teil der Spaltprodukte zu entfernen und wiederum zu Tabletten gepresst, in Brennstäbe gefüllt und daraus Brennelemente gefertigt. Dieser Prozess wird in einer Zusammenarbeit von AECL Kanada und der Ukraine entwickelt. (12) Der Prozess erfordert Investitionen in eine geeignete Anlage.

- Die genutzten Brennelemente werden in einer Wiederaufbereitungsanlage in kochender Salpetersäure zersägt, der Brennstoff löst sich in Salpetersäure auf. Uran und Plutonium werden in TBT gebunden und der von Spaltprodukten befreite Brennstoff zur Fertigung von neuen Brennelementen genutzt. Auf die Trennung von Pu und Uran, wie im Purex Verfahren üblich, kann verzichtet werden. Dieser Wiederaufbereitungsprozess ist erprobt, jedoch sehr teuer! (s. **Artikel Wiederaufbereitung!**)

### h. Verwendung von Thorium im Candu Reaktor

Um einen Brutfaktor von etwas unter 1 real zu erreichen müssen die Thorium Brennstäbe wiederaufbereitet werden. Die Wiederaufbereitung von Thorium ist schwierig da Thoriumoxid chemisch sehr stabil ist. Es existiert weltweit auch keine Wiederaufbereitungsanlage für Thorium. Deshalb ist dieses Konzept auf absehbare Zeit nicht wirtschaftlich.

Horst Trummler; Vandale

### Quellen:

1. Homepage AECL <http://www.aecl.ca/Default.aspx>

20. ACR-1000 Technical Summary [www.aecl.ca](http://www.aecl.ca) , AECL 2007, S13, Zugriff am

30.06.09 Candu -6 D20 Inventar 457to

**21.** Iran and the nuclear nightmare, Martin Baker Schaffer, Armed Forces Journal <http://www.afji.com/2008/02/3608391>, Zugriff 30.06.09 1 Kg D20 600\$ 2008