

# SMR-2021, Xe-100

## Xe-100 Reactor Cannot Melt Down



Das TRi Energy Partnership – ein Wortspiel aus dem TRISO-Brennstoff bzw. der Tri-Cities area – übernimmt die Projektentwicklung für die Genehmigung, den Bau und Betrieb des Kraftwerks. Der angedachte Standort ist neben dem Kernkraftwerk Columbia, einem 1,174-MWe Siedewasserreaktor nahe Richland im Bundesstaat Washington. An diesem Standort sind alle Voraussetzungen für den Transport (Schiene, Straße, Wasserweg) sowie fachkundiges Personal vorhanden. Damit sind erst einmal alle Bedingungen für eine hälftige Finanzierung (50% Staat, 50% privates Risikokapital) nach dem Advanced Reactor Demonstration Program des „US Energieministeriums“ erfüllt.

## Der Entwurf

Der Xe-100 besteht aus zwei Zylindern: Dem Reaktor mit einem Durchmesser von etwa 4,9m und einer Höhe von 19,5m und dem Dampferzeuger mit einem Durchmesser von etwa 6,5m und einer Höhe von 25m. Der Reaktor dürfte etwa 200 to wiegen und der Dampferzeuger etwa 700 to. Beides Maße und Gewichte, wie sie z. B. bei Raffinerien und Chemieanlagen heute üblich sind. Insofern sind Montage und Transport für einschlägige Unternehmen kein Problem. Beide Zylinder sind nur durch ein Doppelrohr für das Helium miteinander verschraubt. Eine solche Einheit soll eine Wärmeleistung von 200 MW<sub>th</sub> und eine elektrische Leistung von etwa 75 MW<sub>el</sub> haben. Die Eintrittstemperatur in den Reaktor beträgt 260°C und die Austrittstemperatur 750°C. Um überhaupt mit dem Gas Helium ausreichend Wärme bei akzeptabler Strömungsgeschwindigkeit transportieren zu können (kein Phasenübergang), beträgt der Betriebsdruck 70bar. Damit muß man wieder die Festigkeitsprobleme beherrschen, die sich aus der Kombination von hohem Druck bei hoher Temperatur ergeben. Mit anderen Worten: Die beiden „Zylinder“ werden entsprechend dickwandig und damit teuer. Ähnliches gilt für die spiralförmigen Rohre des Dampferzeugers, da sie auf Werte (165bar, 565°C) konventioneller Kraftwerke ausgelegt sind. Alles technisch beherrschbar, aber schon vom Ansatz her teuer.

Die Leistung eines solchen Moduls ist auch durch das „Kugelhaufen-Prinzip“ begrenzt. Das Ganze funktioniert wie ein Silo: Es werden ständig oben frische Brennstoffkugeln dem Reaktor zugeführt (ca. 175 Kugeln täglich) und unten wieder die entsprechende Menge abgebrannter Brennelemente abgezogen. Da die spezifische Leistung bei diesem Prinzip etwa 30 mal geringer als in einem konventionellen Druckwasserreaktor ist, ergibt sich ein „Haufen“ aus rund 220

000 Kugeln. Je größer jedoch ein Reaktorkern ist, um so mehr neigt er zu einem „Eigenleben“. Die sich ergebenden ungleichen Zustände müssen durch Regelstäbe im Griff behalten werden. Ab einer gewissen Größe ist es aber praktisch unmöglich, Regelstäbe in solch einen Haufen einzufahren ohne die Kugeln und die Regelstäbe zu beschädigen.

## Sicherheit

Zentrales Sicherheitselement sind auch hier die TRISO-Brennelemente. In jeder einzelnen „Brennstoffkugel“ (6 cm Durchmesser) befinden sich rund 18 000 einzelne „Brennelemente“. Jedes einzelne Körnchen hat seine eigene Schutzhülle aus mehreren Schichten aus denen Spaltprodukte erst einmal entkommen müssen. Hätten sie es geschafft, müßten sie noch die Speicher- und Schutzschichten der Kugel durchdringen. Erst dann könnten sie ins „Kühlmittel“ Helium – das ständig (mit einfachen Mitteln) überwacht wird – gelangen. Bis an die Umwelt müßten sie dann noch den Druckbehälter, das Gebäude etc. überwinden. Die Sicherheitsfrage konzentriert sich damit auf die Beständigkeit der Kugeln. Die Tests über Bestrahlung und Temperatur sind bereits erfolgreich abgeschlossen. Für die Freisetzung von radioaktiven Stoffen ist die Stabilität von Brennelementen (Harrisburg, Fukushima) maßgeblich. Graphitkugeln können nicht schmelzen, sondern sublimieren (unmittelbare Verdampfung ohne Verflüssigung) bei über 3900°C. Diese Temperatur kann aber unter keinen Umständen (nicht im Betrieb und auch nicht durch Nachzerfallswärme) im Reaktor erreicht werden. Jede einzelne Kugel übernimmt quasi die Funktion des Containments von konventionellen Reaktoren (Verhinderung der Freisetzung radioaktiver Stoffe an die Umgebung).

Die Menge an spaltbarem Material (auf 15,5% angereichertes Uran) bzw. der Spaltprodukte (maximaler Abbrand 160 MWd/kg) ist schon durch das Volumen des Reaktors begrenzt. Es ist nur soviel „Überschussreaktivität“ vorhanden, daß die Veränderungen im Betrieb (z. B. Xenonvergiftung im Lastfolgebetrieb) über die Regelstäbe (2 mal 9 Stück) kompensiert werden können. Selbst wenn alle Regelstäbe vollständig gezogen sind, bricht die Kettenreaktion (stark negativer Temperaturkoeffizient) lange vor Erreichen der zulässigen Temperaturen in sich zusammen – der Reaktor ist „walk away sicher“. Fehlbedienungen sind ausgeschlossen bzw. der Reaktor könnte (zeitweise) ohne Personal betrieben werden. Selbst bei einem Ausfall der Kühlung (entweichen des Heliums) reicht die passive Wärmeabfuhr über Strahlung und Wärmeleitung aus um ein Unglück zu verhindern (Fukushima).

Revolutionärer Bestandteil des Genehmigungsverfahrens wird der Nachweis sein, daß keine unzulässige Strahlenbelastung außerhalb des Betriebsgeländes (400m um den Reaktor im Gegensatz zu 10 Meilen) auftreten kann. Alle erforderlichen Nachweise und Auflagen (Besiedlungsdichte, Evakuierungspläne etc.) für eine Genehmigung würden entfallen. Mit anderen Worten: Ein solcher Reaktor könnte unmittelbar neben einem Wohngebiet (z. B. Fernwärme) oder in einem Industriegebiet (Raffinerie, Chemiapark) gebaut werden.

# Geschichte

X-energy wurde 2009 von Dr. Kam Ghaffarian gegründet. Es gelang ihm einige Fachleute mit Erfahrung auf dem Gebiet der Kugelhaufenreaktoren anzuwerben. Leitender Ingenieur z. B. ist Dr. Eben Mulder, der schon in Südafrika in der Entwicklung von Hochtemperaturreaktoren tätig war und einst auf diesem Gebiet in Deutschland promovierte. X-energy wuchs schnell und hatte bis 2017 bereits über \$34 Millionen Kapital eingeworben. In diesem Jahr startete das Projekt eines 320 MWe1 Kraftwerks, bestehend aus vier Reaktormodulen. Federführend beteiligt ist Southern Nuclear (betreibt mehrere Kernkraftwerke und baut Vogtle) als Energieversorger und Burns & McDonnell als Ingenieurunternehmen. Richtungsweisend für andere Industriezweige ist die Entwicklung eines „Digitalen Zwillings“ des Reaktors (separat gefördert durch das Energieministerium). Stark vereinfacht gesagt, ist die gesamte Konstruktion als 3D-Modell digital vorhanden und verknüpft mit einschlägigen Programmen zur probabilistischen Sicherheitsanalyse, virtual reality usw. Ziel ist die systematische Ermittlung von Schwachstellen bereits in der Konstruktionsphase und z. B. der Test von Fertigungsrobotern etc. vorab am digitalen Modell. Dieser Ansatz hat sich bereits als revolutionär bei der Entwicklung von Kampfflugzeugen gezeigt. Wie schon immer, ist die Kerntechnik das Labor des technischen Fortschritts für die gesamte Industrie. Nur hier (außerhalb der Rüstungsindustrie) arbeiten die notwendigen Spitzenkräfte aus unterschiedlichen Disziplinen eng zusammen.

Bei den gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren handelt es sich nicht um eine neue Erfindung, sondern eine evolutionäre Entwicklung in verschiedenen Ländern: USA (1944 ORNL, 1966–1974 Peach Bottom, 1967–1988 Fort St. Vrain, ab 2005 NNGP), UK (1966–1975 Dragon), Deutschland (1967–1988 AVR, 1986–1989 THTR), Japan (ab 1998 HTTR) und China (ab 2000 HTR-10). Es kommen über 70 Jahre Forschung und Entwicklung allein in Demonstrationsanlagen zusammen. Dieser Schatz an Daten ist für ein schnelles Genehmigungsverfahren von ausschlaggebender Bedeutung.

## Marktpotential

Die Demonstrationsanlage soll aus vier Reaktoren bestehen und eine Leistung von 320 MWe1 haben. Damit wäre der Beweis für ein funktionstüchtiges Kraftwerk zum Ersatz alter fossiler Kraftwerke an einem gegebenen Standort erbracht. Ob es allerdings eine schlaue Idee ist, ein „Großkraftwerk“ aus zig Modulen zusammensetzen, muß sich noch erweisen. Allerdings muß man ganz klar feststellen, daß das Prinzip Kugelhaufenreaktor aus physikalischen Gründen nicht beliebig skalierbar ist. Dieses Reaktorprinzip bleibt nur kleineren Leistungen vorbehalten. Man braucht zur Produktion elektrischer Energie auch keine hohen Temperaturen. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades ist bei heutigen Uranpreisen eher eine akademische Fragestellung. Das (bisherige) Alleinstellungsmerkmal liegt vielmehr in der „Walk Away Sicherheit“: Gelingt es, eine Zulassung als Reaktor zu bekommen, der auch bei einem schweren Störfall nur Auswirkungen auf das Betriebsgelände, aber nicht auf die Nachbarschaft hat, eröffnen sich völlig neue Anwendungen:

- Man kann unmittelbar neben chemischen Anlagen bauen,

- man kann nukleare Fernwärme nahe Wohngebieten betreiben,
- man kann einen zeitweiligen Betrieb ohne Personal anstreben,
- man kann solche SMR dezentral einsetzen, bzw. an abgelegenen Verbrauchsschwerpunkten.

Die Produktion von Heißdampf mit 565°C erlaubt nicht nur den Kauf von Dampfturbinen von der Stange, sondern zielt auch auf typische verfahrenstechnische Anwendungen ab (Raffinerien, Grundchemikalien etc.). So hat X-energy allein in den petrochemischen Anlagen an der Golfküste 41 Dampferzeuger ermittelt. Letztendlich stellt sich die Frage, was eine  $MWh_{th}$  bzw.  $MWh_{el}$  aus einem Xe-100 Reaktor kostet. Liegt der Preis unterhalb einer Kesselanlage mit Erdgas, läuft das Geschäft in großem Maßstab an. Wenn nicht, ist das Reaktorkonzept eher eine Totgeburt. Die Branche steht nicht zum ersten Mal wieder vor einem Henne-Ei Problem...

## Internationale Kontakte

Jordanien ist ein typischer Vertreter von Ländern, deren Mangel an Kühlwasser das Hauptproblem bei der Elektrifizierung ist. Hochtemperaturreaktoren lassen sich auch mit Trockenkühltürmen betreiben. Auch das keine ganz neue Idee: Der THTR in Hamm-Uentrop hatte bereits einen solchen. Schon 2017 hat die Jordan Atomic Energy Commission (JAEC) mit X-energy eine Kooperation abgeschlossen. Zusätzlich haben Saudi Arabien und Jordanien auch Verhandlungen mit China über Hochtemperaturreaktoren geführt.

Letztes Jahr hat X-energy auch ein Genehmigungsverfahren in Kanada gestartet. Es gibt dort die sog. Vendor Design Review (VDR). Ein Verfahren das risikoorientiert ist und drei Schritte umfaßt: Im ersten Schritt wird lediglich geprüft, ob der Reaktor grundsätzlich alle kanadischen Vorschriften erfüllt. Im folgenden zweiten Schritt werden die als kritisch empfundenen Punkte näher betrachtet und diskutiert. In der dritten Phase kann der Antragsteller alle Auflagen aus den vorhergehenden Schritten noch nachbessern. Diese Vorgehensweise erlaubt dem Antragsteller besonders bei innovativen Konzepten jederzeit die Notbremse ziehen zu können, wenn die Kosten explodieren sollten und eine Genehmigung zumindest in weiter Ferne erscheint. Da die Entwicklung des Xe-100 schon weit fortgeschritten ist, werden die ersten beiden Phasen zusammen abgehandelt. Eine Zulassung in Kanada ist für X-energy äußerst wertvoll, da Kanada über eine starke kerntechnische Industrie mit vollständigen Lieferketten verfügt. Die Zulieferer sind aber verständlicherweise erst bereit zu investieren, wenn sie genau wissen, was sie produzieren müssen. So konnte bereits Hatch als Partner für die Detailkonstruktion und den weltweiten Vertrieb gewonnen werden. Ontario Power Generation (OPG) hat in Zusammenarbeit mit anderen Provinzen federführend den (geplanten) Bau eines SMR und den Aufbau der Lieferketten in Angriff genommen. In die engere Betrachtung ist neben dem Xe-100 von X-energy, der Integral Molten Salt Reactor (IMSR) von Terrestrial Energy und der BWRX-300 von General Electric gekommen. Im Moment setzt kein Land außerhalb der USA so konsequent auf die Entwicklung von SMR, wie Kanada. Das macht Sinn, da Kanada mit dem Ausbau seiner Schwerwasserreaktoren mittlerer Größe langsam an die Grenzen stößt. Ein so weites Land mit seinen umfangreichen Bergbauaktivitäten, Ölsänden usw. braucht dringend dezentrale

Einheiten. Hinzu kommt der erhebliche Heizwärmebedarf eines nördlichen Landes: Sonne geht gar nicht und mit Windparks hat man nur schlechte Erfahrungen gemacht.

Der Beitrag erschien zuerst auf dem Blog des Autors [hier](#)