

# PRISM das moderne Entsorgungszentrum?

## Teil 1

In England wird seit einigen Jahren ernsthaft über den Bau des sogenannten *Power Reactor Innovative Small Module (PRISM)* von GE-Hitachi diskutiert. Hintergrund ist der stetig wachsende Plutoniumberg aus der Wiederaufbereitungsanlage. Inzwischen lagern zwischen 100 und 150 Tonnen auf der Insel. Es geht dabei um die sinnvollste Verwendung. Ein "verbuddeln und vergessen" nach deutschen Vorstellungen, scheidet für GB ohnehin aus. Vielmehr ist man bestrebt, das Gefahrenpotential des "Atommülls" auf einige hundert Jahre zu begrenzen. Ein Zeitraum, den man unstrittig durch technische Bauten sicher beherrschen kann. Man holt dadurch das Problem von der wenig fassbaren moralischen Ebene – irgendwelcher "Ethikkommissionen" – auf die berechenbare Ebene der Ingenieurwissenschaften zurück.

Ein Weg – und beileibe nicht der einzige – ist die Nutzung und Beseitigung abgebrannter Brennelemente durch einen mit Natrium gekühlten Reaktor mit schnellem Neutronenspektrum und metallischem Brennstoff: Dem *PRISM*. Nichts von der Erfindermesse, sondern ein Stück erprobter Technik. Sein unmittelbarer Vorläufer, der EBR II, war 30 Jahre erfolgreich in Betrieb (bis 1994). Ein PRISM-Kraftwerk mit 1866 MWel würde rund zwei Tonnen abgebrannter Brennelemente pro Jahr verbrauchen und damit die gleiche Menge Strom erzeugen, wie Kohlekraftwerke durch die Verbrennung von sechs Millionen Tonnen Steinkohle.

### Warum schnelle Neutronen?

Mit hinreichend schnellen Neutronen kann man alle schweren Kerne spalten. Ausdrücklich auch <sup>238</sup>U, alle Plutoniumisotope und die minoren Aktinoiden (Americium, Curium, Neptunium usw.). Letztere sind für die Langlebigkeit des Atommülls verantwortlich. Gelingt es sie zu spalten, bleiben nur noch Spaltprodukte mit einer Halbwertszeit von unter 30 Jahren übrig. Allerdings hat die Sache einen entscheidenden Haken: Die Reaktionsquerschnitte sind nicht nur stoffabhängig, sondern auch sehr stark energieabhängig. Mit anderen Worten, nimmt die Wahrscheinlichkeit für eine Spaltung mit schnellen Neutronen stark ab.

Eine selbsterhaltende Kettenreaktion läßt sich nur mit <sup>235</sup>U (in der Natur vorkommend) und <sup>233</sup>U (aus Thorium erbrütet), sowie <sup>239</sup>Pu (aus Uran erbrütet) aufrecht erhalten. Auch deren Spaltquerschnitte sind für langsame thermische Neutronen um Größenordnungen geeigneter. Will man also einen schnellen Reaktor bauen, braucht man wesentlich höhere Anteile an Spaltmaterial. Allerdings steigt auch die Anzahl der freigesetzten Neutronen mit der Energie der spaltenden Neutronen an.

An dieser Stelle ergeben sich die drei Varianten des PRISM-Reaktors, die sich nur durch die Zusammensetzung des Kerns unterscheiden:

1. **Der Brenner.** Er verbraucht – wie ein Leichtwasserreaktor – mehr

Spaltstoff als beständig neu entsteht. Man muß diese Verluste stetig aus abgebrannten Brennelementen ersetzen. Dies wäre eine reine "Abfallverbrennungsanlage".

2. **Der Selbsterhalter.** Er stellt ziemlich genau so viel  $^{239}\text{Pu}$  beim Betrieb gleichzeitig her, wie er auch verbraucht. Die Spaltungen müssen nur durch  $^{238}\text{U}$  – z. B. aus dem Abfall der Anreicherungsanlagen – ergänzt werden.

3. **Der Brüter.** Dies ist die wohl bekannteste Variante. Ein solcher Kern erzeugt mehr  $^{239}\text{Pu}$ , als er selbst verbraucht. Entscheidendes Maß ist bei diesem Typ die sogenannte Verdoppelungszeit. Damit ist die Zeitdauer gemeint, in der ein Reaktor so viel Überschussplutonium produziert hat, wie man braucht, um damit einen zweiten Reaktor in Betrieb nehmen zu können. Diese Variante wird erst attraktiv, wenn die Preise für Natururan explodiert sind. Also erst in sehr ferner Zukunft.

Es ist bei allen drei Varianten sinnvoll, die Spaltprodukte von Zeit zu Zeit abzutrennen. Allerdings haben sie nicht die Bedeutung, die sie bei Leichtwasserreaktoren haben, da ihre Einfangquerschnitte (und dadurch verursachte Neutronenverluste) für hohe Energien recht klein sind. Der Abbrand kann bei schnellen Reaktoren rund fünfmal so hoch sein, wodurch sich eine Wiederaufbereitung wesentlich vereinfacht und nicht so oft geschehen muß (Kosten).

### **Warum Natrium als Kühlmittel?**

Wenn man einen schnellen Reaktor bauen will, muß man ein Kühlmittel verwenden, das Neutronen praktisch nicht abbremst. In diesem Sinne, kommen praktisch nur drei Stoffe in Frage: Natrium, Blei und Helium. Natrium besitzt in allen relevanten Eigenschaften klare Vorteile, sodaß es nicht verwunderlich ist, daß praktisch alle schnellen Reaktoren (über 20 in 8 Ländern) mit Natrium gekühlt wurden. Einzige Ausnahme bilden die sieben Blei-Wismut-Reaktoren der U-Boote der Alpha-Klasse in der Sowjetunion. Sie sind gerade an den Eigenschaften des Blei gescheitert (hohe Schmelztemperatur, die eine ständige Beheizung erfordert; große Korrosionsprobleme; hohe Pumpleistung; starke Aktivierung durch die Bildung von  $^{210}\text{Po}$ ). Je eingehender man sich mit Kühlmitteln beschäftigt, gibt es für ein Kernkraftwerk (zur reinen Stromerzeugung) lediglich zwei optimale Kühlmittel: Wasser für thermische und Natrium für schnelle Reaktoren.

Natrium ist wegen seines elektrischen Widerstandes hervorragend für den Bau von elektromagnetischen Pumpen ohne bewegliche Teile und damit ohne Dichtungsprobleme geeignet.

Bei Natrium braucht man immer einen zusätzlichen Zwischenkreislauf. Der Neutronenfluß bildet  $^{24}\text{Na}$ , welches ein harter  $\gamma$ -Strahler ist. Das primäre Natrium muß deshalb gut abgeschirmt werden. Außerdem besteht bei Leckagen im Dampferzeuger die Gefahr der Wasserstoffherzeugung und der Bildung von  $\text{NaOH}$ . Wasserstoff ist ein guter Moderator, der zu einer Beschädigung des Kerns durch einen Reaktivitätssprung führen könnte.

Die Gefahr von Natriumbränden wird meist überschätzt. Natrium hat eine hohe

Verdampfungswärme bei hoher Verdampfungstemperatur. Dies führt zu einer geringen Verdampfungsrate während der Verbrennung – dem Feuer mangelt es an Nahrung. Die Verbrennung von Natrium in Luft, setzt nur etwa ein Viertel der Energie, wie Benzin frei. Bei dem klassischen Brandversuch in einer offenen Wanne, bilden sich nur wenige Zentimeter hohe Flammen und in einem Meter über den Flammen herrscht nur eine Temperatur von rund 100 °C. Die bei der Verbrennung entstehenden Na<sub>2</sub>O und NaO-Aerosole reagieren in Luft unter Anwesenheit von Wasserdampf und Kohlendioxid weiter zu NaOH und Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Diese Aerosole erfordern anschließend gründliche Reinigungsarbeiten, da sie elektrische Anlagen zerstören können und giftig sind.

Natrium besitzt sehr gute Korrosionsschutzeigenschaften, da es leicht mit Sauerstoff reagiert. Erst oberhalb von 50 ppm besteht für gewisse Stähle eine Korrosionsgefahr im flüssigen Natrium. Dieser Wert ist problemlos über eine Kältefalle (Im Prinzip ein Topf, durch den ein Teilstrom von weniger als 5% des Kreislaufes sehr langsam hindurch strömt) auf 10 bis 25 ppm zu halten. In der Kältefalle kristallisiert das Na<sub>2</sub>O a bei unter 200 °C aus.

### **Warum metallischer Brennstoff?**

Metallische Brennstoffe ermöglichen die höchsten Bruttosraten, da sie vollständig aus spaltbarem und brutfähigen Material bestehen könnten. Sie liefern das härteste Neutronenspektrum, da sie nur aus den schwersten Kernen bestehen. Die Folge ist, daß rund 25% der erzeugten Energie aus der direkten Spaltung von <sup>238</sup>U stammen können.

Metalle sind ausgezeichnete Wärmeleiter und vertragen sehr schnelle Temperaturänderungen. Im Gegensatz dazu sind Uranoxide – wie sie in allen Leichtwasserreaktoren verwendet werden – Keramiken, mit bekannt schlechter Wärmeleitung und Sprödigkeit. Sie können im Inneren bereits aufschmelzen, wenn sich ihre Randtemperatur noch kaum geändert hat und können bei schockartiger Abkühlung wie eine Teetasse zerspringen.

Metallische Brennstoffe vertragen sich ausgezeichnet mit dem flüssigen Natrium. Chemische Reaktionen, wie zwischen den Brennstabhüllen aus Zr bei Leichtwasserreaktoren und Wasserdampf, gibt es nicht (Wasserstoffexplosionen in Fukushima).

Metallischer Brennstoff schwillt durch die Strahlenbelastung um bis zu 30% an. Die Brennstäbe müssen deshalb sehr viel Raum für Spaltgase besitzen. Der notwendige Anfangsspalt zwischen Hüllrohr und Brennstoff wird mit Natrium als Wärmebrücke ausgefüllt.

Man kann bei Metallen die Eigenschaften durch Legierung gezielt verändern. Plutonium hat eine zu geringe Schmelztemperatur. Der Brennstoff kann mit den Legierungsbestandteilen der Stahlhülle schädliche Eutektika bilden usw. Dies alles, hat in den USA Jahrzehnte Forschung und Entwicklung und den Test von hunderttausenden von Brennstäben erfordert. Als Optimal hat sich eine Brennstofflegierung aus Uran und Plutonium mit etwa 10% Zr in einer Hülle aus austenitischem Stahl herausgestellt.

**S wie small**

Von Anfang an, stand bei der Entwicklung die geometrische Größe des Reaktors im Vordergrund: Man wollte den kompletten nuklearen Teil in einer Fabrik fertigen und testen und anschließend (möglichst) mit der Eisenbahn zum Standort transportieren. Alle Einbauten, der Kern, die Pumpen, die Zwischen-Wärmeübertrager, die Lademaschine mit dem Zwischenlager und die Regelstäbe werden in einen Topf aus Edelstahl eingebaut und mit dem Deckel gasdicht verschweißt. Diesen Reaktorbehälter umschließt noch ein zweiter Sicherheitsbehälter und die Luftkühlung. All das, wird in einer Fabrik zusammengebaut und getestet und anschließend zur Baustelle transportiert und dort in das örtlich gefertigte Betonsilo eingesetzt. Damit ist die geplante Leistung auf etwa 840 MWth begrenzt. Durch die Serienfertigung in einer spezialisierten Fabrik, verspricht man sich einen bedeutenden Kostenvorteil.

## **M wie modular**

Die Modularität bezieht sich sowohl auf einen Block selbst, wie auch auf ein Kraftwerk:

- Jeder Block besteht aus dem nuklearen Teil in einem unterirdischen Betonsilo, der oberirdischen Dampferzeuger-Anlage und den konventionellen Stromerzeugungsanlagen.
- Ein komplettes Kernkraftwerk könnte z. B. eine elektrische Leistung von 1866 MWe<sub>el</sub> haben und müßte dann aus sechs Reaktoren (je 840 MWth) bestehen, die jeweils paarweise auf eine Turbine (je 622 MWe<sub>el</sub>) wirken und insgesamt drei Turbinen haben. Alle sonstigen Einrichtungen (Werkstatt, Sozialgebäude usw.) würden gemeinsam genutzt. Ein solches Kraftwerk könnte auch eine integrierte Wiederaufbereitungsanlage beinhalten.

Die interne Unterteilung zielt auf eine potentielle Kosteneinsparung ab: Lediglich der Reaktor in seinem Betonsilo müßte dem Sicherheitsstandard "nuclear grade" entsprechen. Bereits die Dampferzeugungsanlage in ihrem separaten Gebäude sollte – nach Meinung von GE – nur einen "gehobenen Industriestandard" haben. In wie weit, die Genehmigungsbehörden dieser Argumentation folgen werden, ist noch nicht ganz eindeutig zu beantworten.

Die Zusammenfassung von zwei Reaktoren mit Dampferzeuger und einer Turbine zu jeweils einer Einheit, zielt auf eine hohe Verfügbarkeit und einen kostengünstigen Ausbau eines Standortes ab. Sobald eine Einheit fertig ist, kann diese bereits Geld verdienen, während der Ausbau des Kraftwerkes weiter läuft. Die heute übliche Vorfinanzierung der gesamten Summe entfällt. Später, hat das Kraftwerk eine sehr hohe Verfügbarkeit bei guten Wirkungsgraden. Letztendlich muß die Praxis zeigen, welcher Weg der günstigere ist. Rußland beispielsweise, versucht es über möglichst große Blöcke.

## **Das Sicherheitskonzept**

**PRISM** setzt konsequent auf eine passive oder inhärente Sicherheitstechnik. Der völlige Stromausfall (Station-Blackout) ist kein Problem mehr. Es wird lediglich eine elektrische Leistung von weniger als 200 kW für Instrumentierung, Notbeleuchtung, Rechner und Bildschirme usw. benötigt. Diese kann problemlos über Batterien bereitgestellt werden. Notstromdiesel

(als Sicherheitstechnik) sind nicht mehr nötig. Die Nachzerfallswärme wird ausschließlich über eine Luftkühlung mit Naturzug abgeführt. Dazu wird die Wärme über das Reaktorgefäß und den Sicherheitsbehälter an einen umgebenden Luftspalt abgegeben. Die erwärmte Luft steigt über vier Kamine auf. Das System ist so bemessen, daß auch bei erheblichen Verstopfungen (z. B. durch Erdbeben oder Anschläge) oder dem kompletten Ausfall von zwei Kaminen oder einem völligen Verschluß der Zuluftöffnungen die Kühlung stets gewährleistet ist. Selbst bei einem völligen Ausfall von 36 Stunden, tritt noch keine Kernschmelze auf. Ein Unfall wie in Fukushima, wäre damit ausgeschlossen.

Der gesamte Reaktor ist elastisch auf Federn und Dämpfern gelagert. Da sich alle Rohrleitungen und Pumpen etc. in dem Reaktorgefäß befinden, ergibt sich ein optimaler Erdbebenschutz. Dies gilt auch für Flugzeugabstürze und sonstige Einwirkungen von außen, da sich der Reaktor in einem unterirdischen Betonsilo befindet. Die Verbindung zum Dampferzeuger besteht aus Vor- und Rücklauf des Natrium-Zwischen-Kreislaufes, die ebenfalls in einem Betongraben verlegt sind. Diese Leitungen sind als Rohr in Rohr Konstruktion ausgeführt, um Natrium-Leckagen zu verhindern.

Der Dampferzeuger ist ebenfalls mit einem Mantel zur Luftführung umgeben. Wenn die eigentliche Kühlung des Kraftwerks ausfällt, kann die Wärme auch darüber abgeführt werden. Dies ist jedoch kein nukleares Sicherheitssystem im engeren Sinne, sondern dient dem Anlagenschutz.

### **Die Lagerung der Brennelemente**

Die Handhabung der Brennelemente verläuft bei diesem Reaktor gänzlich anders, als bei Leichtwasserreaktoren. Der Reaktor kann wegen des flüssigen Natriums mit seiner hohen Temperatur und Brandgefahr nicht einfach geöffnet werden. Zuerst wird das Helium als Schutzgas und Ausgleichsraum abgesaugt und durch frisches Gas ersetzt. Damit soll die Gefahr der Freisetzung radioaktiver Gase in den Sicherheitsbehälter vermieden werden. Die fest im Reaktor installierte Lademaschine entnimmt abgebrannte Brennelemente und lagert sie oberhalb des Kerns in ein Lagergestell ein. Anders als bei Leichtwasserreaktoren, verbleiben sie für mindestens 20 weitere Monate zur Abkühlung im Reaktor. Ihre Wärmeentwicklung durch den radioaktiven Zerfall ist dann soweit abgeklungen, daß sie auch ohne spezielle Kühlung keine Temperatur von 400 °C mehr überschreiten können. Dies ist für ihren metallischen Kern und die Hüllrohre aus Stahl kein Problem. Ein Brennelemente-Lagerbecken ist nicht nötig.

Ein vollautomatisches Transportfahrzeug dockt an den Reaktordeckel an, entnimmt die zu entladenden Brennelemente und fährt sie anschließend zum zentralen Lagergebäude.

All das, geschieht vollautomatisch und unter Schutzgas. Trotzdem ist ein Auslegungsstörfall der Brand des Natriums im Reaktor. Der Sicherheitsbehälter oberhalb des Reaktors ist so bemessen, daß er die freigesetzte Energie und die Temperaturen aushält. Automatische Löschanlagen mit Schutzgasen sind vorhanden.

### **Die Auslegungsstörfälle**

Schnelle Reaktoren (SR) und Leichtwasserreaktoren (LWR) unterscheiden sich stark in ihrem Unfallverhalten. LWR stehen unter hohem Druck und werden nahe dem Verdampfungspunkt betrieben. Schon bei einem relativ kleinem Leck, baut sich der Druck stark ab und das "Kühlwasser" verdampft. Die Temperatur im Kern steigt damit steil an und nähert sich schnell den Grenzwerten. Gelingt es nicht, das Kühlwasser schnell zu ersetzen, wird der Kern zerstört (Unfall in Harrisburg). Auch nach erfolgreicher Abschaltung, kann die Nachzerfallswärme noch zur Kernschmelze führen (Unfall in Fukushima). Es kommt im weiteren Verlauf dann zur Reaktion zwischen Wasserdampf und den Brennstabhüllen mit starker Wasserstoffproduktion (zerstörende Explosionen in Fukushima).

Bei einem SR sieht der Ablauf gänzlich anders aus. Die Kombination aus metallischem Brennstoff, Brennstabhüllen aus Edelstahl und Natrium als Kühlmittel ergibt eine sehr gute Wärmeübertragung mit hoher Temperaturbeständigkeit. Chemische Reaktionen zwischen den Unfallbeteiligten sind praktisch nicht vorhanden. Mit anderen Worten: Es wird recht schnell und gleichmäßig heißer im Reaktor. Wegen der hohen Verdampfungstemperatur kann es deutlich heißer werden, ohne daß sich wesentliches ändert. Bei einem LWR reicht selbst die Nachzerfallswärme aus, den Kern zum Schmelzen zu bringen, wenn er nicht mehr mit flüssigem Wasser bedeckt ist. Bei einem SR führt die starke Temperaturerhöhung lediglich zu einem neuen Gleichgewicht zwischen "Notkühlluft" und Reaktorgefäß. Die neue Gleichgewichtstemperatur ist so bemessen, daß sie sich noch weit von Materialgrenzwerten entfernt einstellt. Der Reaktor ist "inhärent sicher".

Bei jedem Reaktor führen gewisse Grenzwerte zur sofortigen und automatischen Abschaltung. Beim PRISM fallen zu diesem Zweck sechs Regelstäbe in den Kern ein. Die Kettenreaktion wird dadurch in Sekundenbruchteilen unterbrochen. Zur dauerhaften Abschaltung gibt es noch ein zweites System, das Kugeln aus Borkarbid in den Kern einführt. Insofern unterscheiden sich LWR und SR kaum.

Man geht aber beim PRISM-Reaktor noch einen Schritt weiter, in dem man sich den starken Temperaturanstieg nutzbar macht. Dieser führt zu einer Reihe von Auswirkungen, die neutronenphysikalisch wirken (Dopplereffekt, Dichteänderung des Natrium, Axiale und radiale Ausdehnungen des Brennstoffs, usw.). Wichtig ist die konstruktive Gestaltung, damit der Temperaturkoeffizient der Reaktivität immer negativ bleibt (In Tschernobyl war er positiv!). In Alltagssprache: Je heißer der Reaktor wird, um so schneller bricht die Kettenreaktion von selbst zusammen. Wird die Kühlung – aus welchen Gründen auch immer – unterbrochen, schaltet sich der Reaktor von selbst ab. Er ist also auch im Betrieb "inhärent sicher".

Der Ausfall der Umwälzpumpen im Reaktor (vier Stück) kann zu einer lokalen Überhitzung führen, die örtlich sogar zu einem Verdampfen des Natriums führen könnte. Dadurch könnte der Neutronenfluß lokal weiter ansteigen und Teile des Kerns beschädigen. Ursache sind die elektromagnetischen Pumpen, die keine rotierenden Massen haben und somit sofort ausfallen, wenn der Strom weg ist (Station-Blackout). Sie werden deshalb mit Synchronmotoren, mit extra großen Schwungmassen, parallel betrieben. Die Synchronmaschinen erzeugen im Normalbetrieb Blindleistung und schalten bei Stromausfall automatisch in den Generatorbetrieb um. So entsteht ein mehrere Minuten dauernder Auslauf der

Pumpen, der lokale Überhitzungen verhindert und sanft in einen Naturumlauf überführt.

Versagt auch dieses System, werden die Gasraum-Ausdehner wirksam. Sie funktionieren nach dem Prinzip eines umgedrehten Glas im Spülbecken: Je weiter man es eintaucht, um so kleiner wird das Luftpolster infolge des steigenden Wasserdrucks. Im PRISM spielt nun der Pumpendruck auf das Natrium mit einem Gaspolster aus Argon zusammen. So wie der durch die Pumpen erzeugte Druckanstieg kleiner wird, dehnt sich das Argonpolster aus. Da das Gas eine wesentlich geringere Dichte als das flüssige Natrium hat, kann es auch weniger Neutronen in den Kern zurück streuen. Der Ausfluß erhöht sich und die Kettenreaktion bricht zusammen. Ein weiteres, völlig passives, Sicherheitssystem.

### **Natriumbrand im Dampferzeuger**

Ein spezielles Sicherheitsproblem, ist die Reaktion zwischen Wasser und Natrium. Bei ihr wird neben Energie auch Wasserstoff frei bzw. es entstehen Reaktionsprodukte, die Wasserstoff enthalten. Daraus ergeben sich folgende Ansprüche:

- Der Dampferzeuger sollte in einem separaten Gebäude – streng getrennt vom Reaktor – stehen. Da es nur hier eine Schnittstelle zwischen Wasser und Natrium gibt, können alle Auswirkungen besser beherrscht und lokal begrenzt werden.
- Es sollte eine Isolierung zwischen Dampferzeuger und Reaktorteil geben, um Rückwirkungen auf die Wärmetauscher im Reaktor zu verhindern.
- Es müssen ausreichend große Abblasetanks vorhanden sein, um Natrium und Wasser möglichst schnell voneinander zu trennen, damit die Brandlasten klein bleiben. Entstandener Wasserstoff muß rekombiniert bzw. sicher abgeleitet werden, um Explosionen zu verhindern (nicht wie in Fukushima, auch noch benachbarte Gebäude zerstören.)

Der Dampferzeuger des PRISM ist ein schlanker, aufrecht stehender Behälter. Er ist nicht vollständig mit Natrium gefüllt, sondern besitzt oben einen mit Argon gefüllten Raum. Dieses Gaspolster, kann bei Störfällen, etwaige Druckwellen, bereits erheblich mindern. In dieses Natriumbad tauchen, zu einer Spirale gewickelte Rohre, ein. In diesen strömt das Wasser und verdampft. Würde ein Rohr undicht werden, strömt Wasser bzw. Dampf unter hohem Druck in das Natrium ein und reagiert dort sofort. Die zusätzliche Energieproduktion kann zu einem Temperaturanstieg im Dampferzeuger führen. Wichtigste Gegenmaßnahme ist nun die Absperrung sowohl der Wasser- und Dampfleitungen wie auch der Natriumleitungen. Dabei sind kleine Leckagen kein Problem, da sie ein langsames Abfahren der Anlage ermöglichen.

Kommt es hingegen zu massiven Wassereinbrüchen, kann es zu einer stärkeren Temperaturerhöhung und einem steilen Druckanstieg führen. Wichtigstes Ziel ist nun, die Druckspitze zu begrenzen und die Druckwelle möglichst von den Zwischenwärmetauschern im Reaktor fern zu halten. Zur Dämpfung dient bereits das Gaspolster im Dampferzeuger. Wird der vorgesehene Druck überschritten,

bersten zwei Scheiben in der Verbindungsleitung zum Abblasetank. Der Abblasetank trennt die Gase (insbesondere den entstandenen Wasserdampf) vom flüssigen Natrium. Das Natrium strömt dann weiter in Reservetanks. Bereits gebildeter Wasserstoff wird rekombiniert, um etwaige Explosionen zu vermeiden. Die Restwärme wird über die Außenluft abgeführt.

Unmittelbar hinter dem Sicherheitsbehälter des Reaktorgebäudes befinden sich Isolierventile, die sofort und automatisch schließen. Dadurch wird verhindert, daß überhaupt Reaktionsprodukte zum Reaktor gelangen können.

### **Schlußbetrachtung**

Es gibt international viel Erfahrung aus einigen hundert Betriebsjahren mit natriumgekühlten schnellen Reaktoren. Allein in den USA ist der BER II über 30 Jahre erfolgreich gelaufen. Man hat in ihm über 100000 Brennelemente getestet und umfangreiche Experimente der Sicherheitssysteme durchgeführt. Mehrfach wurde bei voller Leistung die Wärmesenke einfach abgestellt, um beispielsweise die Richtigkeit der Rechenprogramme zu überprüfen. Die Entwicklung ist seit dem – wenn auch stark reduziert – kontinuierlich weitergeführt worden. Bereits 1994 wurde das eingereichte Konzept von der NRC in einem 400seitigen Abschlussbericht positiv beurteilt. Seit dem, könnte eigentlich ein Kraftwerk als Demonstrationsanlage gebaut werden – wenn der politische Wille vorhanden wäre. Ob auch hier wieder China voranschreiten wird oder kann Europa (GB) noch den Anschluß halten?

### **Ausblick**

Der zweite Teil, wird sich mit der Wiederaufbereitung und der Herstellung der metallischen Brennelemente beschäftigen.

<http://www.nukeklaus.de/home/prism-das-moderne-entsorgungszentrum-teil-1/>