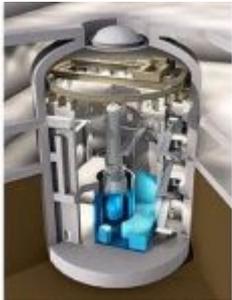


# Neue Kern-Reaktorkonzepte in Entwicklung – Small Modular Reactor (SMR) aus energiewirtschaftlicher Sicht



Sieger der ersten Runde war Babcock & Wilcox (B&W) mit seinem mPower Konzept, zusammen mit Bechtel und Tennessee Valley Authority. Eine sehr konservative Entscheidung: Babcock & Wilcox hat bereits alle Reaktoren der US Kriegsschiffe gebaut und besitzt deshalb jahrzehntelange Erfahrung im Bau kleiner (militärischer) Reaktoren. Bechtel ist einer der größten internationalen Ingenieurfirmen mit dem Schwerpunkt großer Bau- und Infrastrukturprojekte. Tennessee Valley Authority ist ein öffentliches Energieversorgungsunternehmen. Wie groß die Fördersumme letztendlich sein wird, steht noch nicht fest. Die in der Öffentlichkeit verbreiteten 452 Millionen US-Dollar beziehen sich auf das gesamte Programm und nicht jeden Hersteller. Insofern war die Entscheidung für den Kandidaten, mit dem am weitesten gediehenen Konzept, folgerichtig.

## Die Wirtschaftlichkeit

An dieser Stelle soll nicht auf den Preis für eine kWh elektrischer Energie eingegangen werden, da in diesem frühen Stadium noch keine ausreichend genauen Daten öffentlich zugänglich sind und es rein spekulativ wäre. Es sollen viel mehr ein paar qualitative Überlegungen angestellt werden.

Man geht von deutlich unter einer Milliarde US-Dollar pro SMR aus. Auch, wenn man nur eine Stückzahl von 100 Stück annimmt, ergibt das den stolzen Umsatz von 100 Milliarden. Dies entspricht in etwa dem "Modellwert" in der Flugzeugindustrie. Damit wird sofort klar, daß das keine Hinterhof-Industrie werden kann. Der Weltmarkt wird unter einigen wenigen Konsortien von der Größenordnung Boeing oder Airbus unter sich aufgeteilt werden! Wer zu lange wartet, hat praktisch keine Chance mehr, in diesen Markt einzusteigen. Ob Europa jemals noch ein Konsortium wie Airbus schmieden kann, ist mehr als fraglich. Die Energieindustrie wird wohl nur noch von den USA und China bestimmt werden.

Es ergeben sich auch ganz neue Herausforderungen für die Finanzindustrie durch die Verlagerung des Risikos vom Besteller zum Hersteller. Bisher mußte ein Energieversorger das volle Risiko allein übernehmen. Es sei hier nur das

Risiko einer nicht termingerechten Fertigstellung und das Zinsänderungsrisiko während einer Bauzeit von zehn Jahren erwähnt. Zukünftig wird es einen Festpreis und kurze Bauzeiten geben. Die Investition kann schnell wieder zurückfließen. Daraus erklärt sich der Gedanke, ein Kernkraftwerk heutiger Größenordnung zukünftig aus bis zu einem Dutzend einzelner Anlagen zusammen zu setzen. Sobald der erste Reaktor in Betrieb geht, beginnt der Kapitalrückfluss. Man spielt plötzlich in der Liga der Gaskraftwerke!

Damit stellt sich aber die alles entscheidende Frage: Wer ist bereit, das finanzielle Risiko zu tragen? China hat sich durch den Bau von 28 Kernkraftwerken eine bedeutende Zulieferindustrie aufgebaut. Auch die USA verfügen über eine solche. Das Risiko auf verschiedene Schultern zu verteilen, ist ein probates Mittel. Europa müßte sich unter – wahrscheinlich französisch-britischer Führung – mächtig sputen, um den Anschluß nicht zu verlieren. Im Moment sieht es eher so aus, als wenn Frankreich, Großbritannien und die USA gleichermaßen um die Gunst von China buhlen.

Um es noch einmal in aller Deutlichkeit zu sagen: Europa fehlt es nicht an technischen Möglichkeiten und an Finanzkraft, sondern am politischen Willen. Es ist das klassische Henne-Ei-Problem: Ohne ausreichende Bestellungen, ist keiner bereit, in Fertigungsanlagen zu investieren. Wer aber, sollte diesen Mut aufbringen, ausgerechnet in Deutschland, wo es keinen Schutz des Eigentums mehr gibt, wo eine Hand voll Politiker nach einem Tsunami im fernen Japan, mit einem Federstrich, Milliarden vernichten können und die breite Masse dazu auch noch Beifall klatscht?

### **Fertigung in einer Fabrik**

Bisher wurden Kernreaktoren mit immer mehr Leistung gebaut. Inzwischen wurde beim EPR von Areva fast die 1700 MWe erreicht. Man macht damit Kernkraftwerke und ihre Komponenten selbst zu einem Nischenprodukt. Nur wenige Stromnetze können so große Blockgrößen überhaupt verkraften. Andererseits wird der Kreis der Zulieferer immer kleiner. Es gibt weltweit nur eine Handvoll Stahlwerke, die überhaupt das Rohmaterial in der erforderlichen Qualität liefern können. Hinzu kommen immer weniger Schmieden, die solch große Reaktordruckgefäße, Turbinenwellen, Schaufeln etc. bearbeiten können. Je kleiner die Stückzahlen und der Kreis der Anbieter wird, um so teurer das Produkt.

Es macht aber wenig Sinn, kleine Reaktoren als verkleinertes Abbild bisheriger Typen bauen zu wollen. Dies dürfte im Gegenteil zu einem Kostenanstieg führen. Will man kostengünstige SMR bauen, muß die gesamte Konstruktion neu durchdacht werden. Man muß praktisch mit dem weißen Blatt von vorne beginnen. Typisches Beispiel ist die Integration bei einem Druckwasserreaktor: Bei der konventionellen Bauweise ist jede Baugruppe (Druckgefäß, Dampferzeuger, Umwälzpumpen, Druckhalter) für sich so groß, daß sie isoliert gefertigt und transportiert werden muß und erst am Aufstellungsort durch Rohrleitungen miteinander verbunden werden kann. Damit wird ein erheblicher Arbeits- und Prüfaufwand auf die Baustelle verlegt. Stundensätze auf Baustellen sind aber wegen ihrer Nebenkosten stets um ein vielfaches höher, als in Fabriken. Gelingt es, alle Baugruppen in das Druckgefäß zu integrieren, entfallen alle notwendigen Montagearbeiten auf der Baustelle, weil ein bereits fertiger und geprüfter "Reaktor" dort angeliefert

wird. Bauteile, die es gar nicht gibt (z. B. Rohrleitungen zwischen Reaktordruckgefäß und Dampferzeugern) müssen auch nicht ständig gewartet und wiederholt geprüft werden, was auch noch die Betriebskosten erheblich senkt.

Wenn alle Bauteile wieder "kleiner" werden, erweitert sich auch automatisch der potentielle Herstellerkreis. Die Lieferanten können ihre Fertigungsanlagen wieder besser auslasten, da sie nicht so speziell sein müssen. Es ist wieder möglich, eine nationale Fertigung mit akzeptablen Lieferzeiten zu unterhalten.

Durch die Fertigung von Bauteilen in geschlossenen Hallen ist man vor Witterungseinflüssen (oder schlicht Dreck) geschützt, was die Kosten und das Ausschussrisiko senkt. Eine Serienfertigung führt durch den Einsatz von Vorrichtungen und die Umlage von Konstruktions- und Entwicklungskosten etc. zu geringeren Kosten. Die Standardisierung senkt Schulungskosten und erhöht die Qualität.

In der Automobilindustrie ist die Teilung in Markenhersteller und Zulieferindustrie üblich. Gelingt es Bauteile für Kernkraftwerke zu standardisieren, kann sich auch eine kerntechnische Zulieferindustrie etablieren. Ein wesentlicher Teil der Kostenexplosion bei Kernkraftwerken ist dem erforderlichen "nuclear grade" geschuldet. Es ist kein Einzelfall, daß ein und das selbe Teil für Kernkraftwerke durch diesen Status (Dokumentation, Zulassung etc.) oft ein Vielfaches des "handelsüblichen" kostet. Ein wesentlicher Schritt für den Erfolg, ist dabei die klare Trennung in "sicherheitsrelevante" und "sonstige" Teile. Eine Vorfertigung und komplette Prüfung von Baugruppen kann dabei entscheidend sein. Wird beispielsweise das Notkühlsystem komplett passiv ausgelegt – also (fast) keine elektrische Energie benötigt – können die kompletten Schaltanlagen usw. in den Zustand "normales Kraftwerk" entlassen werden.

### **Was ist die richtige Größe?**

Die Bandbreite der elektrischen Leistung von SMR geht etwa von 40 bis 300 MWe. Die übliche Definition von "klein" leitet sich von der Baugröße der Zentraleinheit ab. Sie sollte noch in einem Stück transportierbar sein. Dies ist eine sehr relative Definition, die sich beständig nach oben ausweitet. Es werden heute immer größere Einheiten (Ölindustrie, Schiffbau usw.) auch über Kontinente transportiert. Der Grundgedanke bei dieser Definition bleibt aber die Zusammenfassung eines "kompletten" Reaktors in nur einem Teil und die Funktionsprüfung vor der Auslieferung, in einer Fabrik.

Sinnvoller erscheint die Definition nach Anwendung. Grundsätzlich sind Inselösungen und die Integration in vorhandene Netze unterscheidbar. Besonders abgelegene Regionen erfordern einen erheblichen Aufwand und laufende Kosten für die Energieversorgung. Auf diese Anwendung zielt beispielsweise das russische Konzept eines schwimmenden Kernkraftwerks. Die beiden je 40 MWe Reaktoren sollen nach Chuktoa in Ost-Sibirien geschleppt werden und dort Bergwerke versorgen. Sehr großes Interesse existiert auch im kanadischen Ölsandgebiet. Ein klassischer Anwender war früher auch das US-Militär. Es besitzt wieder ein verstärktes Interesse, abgelegene Militärstützpunkte durch SMR zu versorgen. Langfristig fallen in diese

Kategorie auch Chemieparks und Raffinerien.

Kernkraftwerke unterliegen – wie alle anderen Kraftwerke auch – prinzipiell einer Kostendegression und Wirkungsgradverbesserung mit steigender Leistung. Es ist deshalb bei allen Kraftwerkstypen eine ständige Vergrößerung der Blockleistungen feststellbar. Heute wird die maximale Leistung hauptsächlich durch das Netz bestimmt. Man kann die Grundregel für Neuinvestitionen (stark vereinfacht) etwa so angeben:

- Baue jeden Block so groß, wie es das Netz erlaubt. Das Netz muß Schnellabschaltungen oder Ausfälle vertragen können.
- Baue von diesen Blöcken auf einem Gelände so viel, wie du kannst. Wieviel Ausfall kann das Netz bei einem Ausfall einer Übertragungsleitung verkraften? Wie kann die Brennstoffversorgung am Standort gewährleistet werden (Erdgaspipeline, Eisenbahnanschluss, eigener Hafen etc.)? Wie groß ist das Kühlwasserangebot und wie sind die Randbedingungen bezüglich des Umweltschutzes?

Aus den vorgenannten Überlegungen ergeben sich heute international Blockgrößen von 200 bis 800 MWe, bei zwei bis acht Blöcken an einem Standort.

Wie groß der potentielle Markt ist, sieht man allein an der Situation in den USA. Dort müssen wegen verschärfter Bestimmungen zur Luftverschmutzung (Mercury and Air Toxic Standards (MATS) und Cross-State Air Pollution Rule (CSDAPR)) bis 2016 rund 34 GWe Kohlekraftwerke vom Netz genommen werden. Neue Kohlekraftwerke dürfen praktisch nicht mehr gebaut werden. Die Umstellung auf Erdgas kann wegen der erforderlichen Gasmengen und des daraus resultierenden Nachfragedrucks nur eine Übergangslösung sein. Da die "alten Kohlekraftwerke" relativ klein sind, würde ein Ersatz nur durch "große" Kernkraftwerke einen erheblichen Umbau der Netzstruktur erforderlich machen. Eine schmerzliche Erfahrung, wie teuer Zentralisierung ist, macht gerade Deutschland mit seinem Programm "Nordseewind für Süddeutschland". Insofern brauchen SMR auch nur mit "kleinen" Kohlekraftwerken (100 bis 500 MWe) konkurrieren, die der gleichen Kostendegression unterliegen.

### **Das Sicherheitskonzept**

Bei der Markteinführung von SMR gibt es kaum technische, aber dafür um so größere administrative Probleme. Aus diesem Grund rechtfertigt sich auch das staatliche Förderprogramm in den USA. Die Regierung schreibt zwingend eine Zulassung und Überwachung durch die NRC vor. Dieses Verfahren muß vollständig durch die Hersteller und Betreiber bezahlt werden. Die Kosten sind aber nicht nur (mit dem jedem Genehmigungsantrag innewohnenden) Risiko des Nichterfolges versehen, sie sind auch in der Höhe unkalkulierbar. Die Prüfung erfolgt in Stundenlohnarbeit, zu Stundensätzen von knapp 300 US-Dollar! In diesem System begründet sich ein wesentlicher Teil der Kostenexplosion bei Kernkraftwerken. Die NRC hat stets – nicht ganz uneigennützig – ein offenes Ohr für Kritik an der Sicherheit von Kernkraftwerken. Mögen die Einwände auch noch so absurd sein. Als "gute Behörde" kann sie stets "Bürgernähe" demonstrieren, da die Kosten durch andere getragen werden müssen, aber immer den eigenen Stellenkegel vergrößern. Dieses System gerät erst in letzter Zeit in das

Licht der Öffentlichkeit, nachdem man erstaunt feststellt, um wieviel billiger und schneller beispielsweise in China gebaut werden kann. Nur mit geringeren Löhnen, läßt sich das jedenfalls nicht allein erklären.

Die "Massenproduktion" von SMR erfordert völlig neue Sicherheitskonzepte. Auf die technischen Unterschiede, wird in den weiteren Teilen noch ausführlich eingegangen werden. Die Frage ist eher, welches Niveau man als Bezugswert setzt. Einem überzeugten "Atomkraftgegner" wird nie ein Kraftwerk sicher genug sein! Im Gegenteil, ist die ständige Kostentreiberei ein zentrales "Kampfmittel". Allerdings wird durch die Erfolge von China und Korea das Märchen von der "ach so teuren Atomkraft" immer schwerer verkaufbar. Selbst in einem tiefgläubigen Land wie Deutschland, muß man daher immer mehr auf andere Strategien (z. B. angeblich ungelöste "Entsorgung") ausweichen. Sollte man jedoch das heute erreichte Sicherheitsniveau als Grenzwert setzen, lassen sich bei den meisten SMR-Konzepten bedeutende Kostenvorteile erreichen. Es ist nicht auszuschließen, daß das – außerhalb Deutschlands – so gesehen wird. Andererseits kann man durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen die Auswirkungen auf das Umfeld auch bei schwersten Störfällen so stark begrenzen, daß ein Einsatz innerhalb des Stadtgebiets z. B. zur Fernwärmeversorgung akzeptabel wird. Könnte sogar sein, daß SMR in Städten mit starker Luftverschmutzung hoch willkommen sind.

Es gibt aber durchaus einige offene Fragen. Je mehr Standorte es gibt, um so aufwendiger ist die Organisation eines lückenlosen Überwachung- und Bewachungssystems. Heute hat jedes US-Kernkraftwerk zwischen 400 und 700 Festangestellte. Allein die "eigene Privatarmee" umfaßt durchschnittlich 120 Mann. Für jeden Reaktor gibt es ständig zwei – vom Energieversorger zu bezahlende – NRC-Kontrolleure.

International sind Abkommen zu treffen, die sich über die gegenseitige Anerkennung von Zulassungen und Prüfungen verständigen. Es macht keinen Sinn, wenn jedes Land von neuem das gesamte Genehmigungsverfahren noch einmal wiederholt. Bisher gilt eine NRC-Zulassung international als "gold standard". Es würde sich lohnen, wenn die Kerntechnik sich hierbei an der internationalen Luftfahrt orientiert. Ebenfalls ein Bereich, mit sehr hohen Sicherheitsanforderungen.

Nach allgemeiner Auffassung sollten die Lieferketten in "nuclear" und "non nuclear" unterteilt betrachtet werden. Die Lieferketten für alle sicherheitstechnisch bedeutenden Teile (Brennelemente, Dampferzeuger, Kühlmittelpumpen usw.) müssen schon sehr früh in der Genehmigungsphase stehen, da ihre Entwürfe unmittelbar mit der Sicherheit verbunden sind. Die Zulieferer müssen sehr eng mit dem eigentlichen Kraftwerkshersteller verknüpft werden. Es ergibt sich ein ähnliches Geschäftsmodell, wie in der Automobilindustrie. Dort werden die Zulieferer mit ihrem speziellen Wissen und Erfahrungen möglichst früh und eng in den Entwicklungsprozess einbezogen. Diese Lieferketten sollten für die Bauartzulassung (vorübergehend) festgeschrieben werden. Es sollten Bauteile gebaut und eingehend geprüft werden. Während dieses Prozesses sind alle Produktionsschritte und Prüfverfahren genau zu dokumentieren, um den Herstellerkreis später ausweiten zu können. Alle sonstigen Bestandteile des Kraftwerks können im Industriestandard und nach lokalen Gegebenheiten unmittelbar nach der

jeweiligen Auftragsvergabe vergeben werden.

### **Hinweis**

Dieser erste Teil beschäftigt sich mehr mit den grundsätzlichen Eigenheiten sog. "Small Modular" Reaktoren. Die Betonung liegt hier auf der energiewirtschaftlichen Betrachtung. Es folgt ein zweiter Teil, der sich näher mit der Technik von SMR in der Bauweise als Leichtwasserreaktor beschäftigt. Ein dritter Teil wird auf die ebenfalls im Bewerbungsverfahren befindlichen schnellen Reaktoren eingehen.

Dr. Ing. Klaus Dieter Humpich

Der Beitrag erschien zuerst bei [NUKEKlaus](#)