

# Kernenergie – Mythos und Realität

Präsentation auf der Konferenz:  
Herausforderungen des Klimawandels  
– globale und lokale Strategien zur  
Rettung des Planeten  
Warschau, 19.-20. April 2007

Prof. Steve Thomas ([stephen.thomas@gre.ac.uk](mailto:stephen.thomas@gre.ac.uk))  
PSIRU ([www.psir.org](http://www.psir.org))  
Universität Greenwich

# Übersicht

- Der Weltmarkt für Kernkraftwerke
- Relikte in Osteuropa
- USA: Nuclear Power 2010
- GB: Kernkraft mit aller Macht wieder zurück?
- Olkiluoto: Demonstration neuer Kerntechnologie, oder dass sich nichts verändert hat?
- Schlüsselfaktoren in der Atomwirtschaft
- Neue Studien zu den Kosten der Kernenergie
- Bedarf an und Ausmaß der Subventionen
- Schlussfolgerungen

Land	Standort	Typ	Erbauer	MW	Baubeginn	% gebaut	Inbetr.setz.
China	Tianwan 2	WWER	Russland	1000	2000	99	2007
China	Lingao 3, 4	PWR	China	2 x 1000	2005, 06	20, 15	2010, ?
China	Quinshan 2-3, 4	PWR	China	2 x 1000	2006, 07	20, 20	2010, 11
	Sanmen 1, 2	AP1000	Whouse	2 x 1100	?	0, 0	2013
China	Yangjiang 1, 2	AP1000	Whouse	2 x 1100	?	0, 0	2013
Taiwan	Lungmen 1, 2	ABWR	GE	2 x 1300	1999	57, 57	2009, 10
Finnland	Olkiluoto 3	EPR	Areva	1600	2005	20	2011
Frankreich	Flamanville 3	EPR	Areva	1700	2007	0	2012
Indien	Kaiga 3, 4	Candu	Indien	2 x 202	2002	98, 82	2007
Indien	Kudankulam 1, 2	WWER	Russland	2 x 917	2002	76, 66	2009
Indien	PFBR	FBR	Indien	470	2005	23	?
Indien	Rajasthan 5, 6	Candu	Indien	2 x 202	2002	92, 73	2007
Iran	Bushehr	WWER	Russland	915	1975	95	2007
Japan	Tomari 3	PWR	Mitsub	866	2004	66	2009
Korea	Shin Kori 1	PWR	Doosan	1000	2006	43	2010
Pakistan	Chasnupp	PWR	China	300	2005	25	2011
Rumänien	Cernavoda 2	Candu	AECL	655	1983	98	2007
Russland	Balakovo 5	WWER	Russland	950	1987	?	2010
Russland	Kalinin 4	WWER	Russland	950	1987	?	2010
Russland	Volgodonsk 2	WWER	Russland	950	1987	?	2008

# Der Weltmarkt für Kernkraftwerke

- Berichte von einer Wiederbelebung der Nachfrage sind verfrüht
- Weltweit sind nur 22 Einheiten im Bau und drei weitere bestellt, verglichen mit 435 in Betrieb
- Von den 22 benutzen 16 die indische, russische oder chinesische Bauweise
- Von den 22 sind 15 in Indien, Russland oder China
- Bei 7 von den Anlagen war die Bauzeit länger als 10 Jahre bzw. wird so erwartet

# Verfügbare Bauweisen

3 Bestellungen Generation III/III+ im Westen:

1. Areva EPR, basierend auf Framatome N4 und Siemens Konvoi. 2 Bestellungen. Zulassung in Frankreich und Finnland, in den USA nicht vor 2011
2. Westinghouse AP-1000, basierend auf AP-600. AP-600 ohne Bestellungen fallengelassen wegen hoher Kosten. Zulassung in USA (Feb 2006), wird aber nicht in Europa angeboten
3. GE ESBWR, basierend auf SBWR. Keine Bestellungen von SBWRs oder ESBWRs. US-Zulassung 2009/10, wird aber nicht in Europa angeboten

# Marktlage für neue Aufträge im Nuklearbereich

- Westliche Lieferanten aktiv in Europa—  
Areva & Westinghouse—haben 6 Aufträge:  
Olkiluoto (Finnland), Flamanville (Frankreich)  
China (4 Einheiten)
- China, Korea und Japan haben in den letzten  
25 Jahren regelmäßig ihre Auftragslage  
überschätzt, aber könnten 1-2 neue Anlagen  
ordern
- Keine weiteren Aufträge in Sicht außer von  
den USA (mehr dazu später)

Land	Standort	Typ	Erbauer	MW	Bau- beginn	Bau- stopp	% gebaut	Wieder- beginn erwartet 2007/08
Argentinien	Atucha 2	HWR	Siemens	692	1981	1994	80	Ja
Bulgarien	Belene 1, 2	WWER	Russia	1000	1987	1991	45	Ja
Brasilien	Angra 3	PWR	Siemens	1275	1976	?	30	Nein
N Korea	Kedo 1 2	PWR	S Korea	1000	1997	2003	33	Nein
Rumänien	Cernavoda 3, 4, 5	Candu	AECL	655	1983	?	10	Nein
Russland	Kursk 5	RBMK	Russland	925	1985	?	70	Nein
Slowakei	Mochovce 3, 4	WWER	Russland	405	1983	1990	40, 30	Ja
Ukraine	Khmelnitsky 3, 4	WWER	Russland	950	1986	1990	30, 15	Nein

# Relikte in Osteuropa

## Verlockungen

- Der Bau erscheint oft fortgeschritten (die Hülle wird komplettiert vor den Innenarbeiten)
- Die Fertigstellung scheint lukrative Energieexporte zu ermöglichen
- Energie aus Mochovce & Belene würde Energie, produziert in Bohunice & Kozloduy, ersetzen

## Aber

- Veraltete Bauweisen. Falls der Bau unter heutigen Standards unakzeptabel wäre, teure Aufrüstung
- Große Teile der Ausstattung wurden 15 Jahre gelagert. Das könnte teure Arbeiten oder Ersatz erfordern.
- Unklarheit über Qualität des Vorhandenen. Zu beweisen, dass es den Standards entspricht, wäre teuer und Sanierung sehr teuer.

# Relikte in Osteuropa

## Bulgarien

- Der Bau von Belene begann 1987, wurde 1991 gestoppt, zu 45% komplett
- Auftragsvergabe 2006 an Atomstroyexport, aber wird die Finanzierung stehen?

## Slowakei

- ENEL verpflichtete sich, Mochovce 3 & 4 fertigzustellen, als es Slovenske Elektrarne gekauft hat
- Wiederaufnahme des Baus 2007

# Relikte in Osteuropa

## Rumänien

- Da der Bau von Cernavoda 3-5 noch nicht weit fortgeschritten ist, effektiv ein Neuauftrag. Viele Hürden zu bezwingen

## Russland

- Starker innenpolitischer Druck, Kursk 5 zu vollenden, aber wäre es durchführbar?

## Ukraine

- Politischer Druck für Chmelnyzkyj 3 & 4, aber keine Priorität

# US-Initiative: Nuclear Power 2010

Letzter Auftrag in USA, der nicht annulliert wurde, 1974. Hohe Garantien und Subventionen stützen Bushs Nuclear 2010-Programm, dazu gehören:

- Steuervergünstigung (PTC): €13,5/MWh Gutschrift für 8 Jahre, für 6-8 Reaktoren: Kosten €4,3 Mrd.
- Kreditbürgschaften für die ersten 6 Reaktoren. Der „Congressional Research Service“ schätzt die Haftung auf €10,5-12 Mrd.
- Absicherung gegen Verzögerungen durch Aufsicht oder Justiz, bis zu €375 Mio. für erste 2 Reaktoren, €188 Mio. für die nächsten 4
- Finanzierung von F&E im Wert von €640 Mio.
- Unterstützung bei historischen Stilllegungskosten bis €1 Mrd.
- Gesamtkosten dieses Programms ca. €15 Mrd.

# US-Initiative: Nuclear Power 2010

- Verschiedene Gruppen haben ihr Interesse bekundet, z.B. das 'NuStart'-Konsortium und Dominion, aber Fortschritte sind langsam und es gibt keine verbindliche Zusagen für Aufträge
- Dominion-Chef Thomas Capps sagte 2005: "Wir werden in absehbarer Zeit kein Kernkraftwerk bauen. Standard & Poor's und Moody's [die Ratingagenturen] würden einen Herzanfall bekommen. Und der Leiter unserer Finanzabteilung auch."
- Aufträge im Nuklearbereich muss man mit Zustimmung von Geldgebern vergeben, es ist nicht einfach eine Entscheidung für Nutzungen
- Die Finanzkreise betrachten Kernkraft aufgrund bisheriger Erfahrungen als großes wirtschaftliches Risiko
- Alles, was diese Aufträge zeigen können, ist, dass Regierungen Kernkraftwerke bauen können, indem sie die Steuerzahler und Verbraucher zum Zahlen zwingen

# GB: Kernkraft mit aller Macht wieder zurück?

- 8 Jahre hat es gedauert für die Bautypen Sicherheitszulassungen zu erhalten und Standorte zu genehmigen
- Erste Anlage wird nicht vor 2015 bestellt werden
- 6 Jahre Bauzeit, also Energieerzeugung ab 2021
- 6000 MW neue atomare Gesamtleistung 2026
- Privatunternehmen müssen letztlich entscheiden
- Keine staatlichen Subventionen, aber Kernenergie teurer als Gas, also warum sollten sich Unternehmen für Kernenergie entscheiden?
- Im Februar 2007 entschied der High Court, dass das Konsultationsverfahren der Regierung mangelhaft war und wiedereröffnet werden muss, was eine Verzögerung von mindestens einem Jahr bedeutet

# Wie erzielt man niedrige Kosten?

## Olkiluoto

- Der Baupreis soll €3 Mrd. betragen, €2000/kW, höher als alle jüngeren Prognosen
- Werden diese Kosten eingehalten? Sind sie wirklich fix?
- Ist es eine 'Lockware'? EDF verkündete Flamanville würde 10% mehr kosten, ohne einige Dinge, die im Olkiluoto-Preis enthalten sind
- Bürgschaften von Frankreich (Thema einer Untersuchung der EU wegen staatlicher Beihilfen) & Schweden
- Die Bayerische Landesbank (BLB) gab einen Kredit über €1,95 Mrd. (60% der Kosten) bei 2,6% Nominalzins
- Die Betreibergesellschaft TVO ist eine nicht-gewinnorientierte Gesellschaft im Besitz von energieintensiven Unternehmen
- Die Besitzer von TVO erhalten für die volle Laufzeit vertraglich zugesichert Strom zum Selbstkostenpreis

# Probleme in Olkiluoto

- 18 Monate nach Baubeginn lag das Kraftwerk 18 Monate hinter dem Zeitplan (Dez. 2006)
- Areva hat bis Dez. 2006 €700 Mio. verloren und bilanzneutrale Verpflichtungen „in Höhe von €1,5-2 Mrd.“ angehäuft
- Im Okt. 2006 hat Areva den Projektleiter ersetzt
- Im Januar 2007 ließ Areva verlauten:

Areva-Siemens kann keine 100%-ige Haftung akzeptieren, weil es sich bei dem Projekt um eine gewaltige Kooperation handelt. Das Baugelände ist gemeinschaftlich, und daher lehnen wir eine 100%-ige Haftung absolut ab

# Was ist schief gelaufen in Olkiluoto?

- September 2005: Probleme mit der Stärke und Porosität des Betons des Fundaments des Reaktorgebäudes. Fertigung von Druckbehälter und Dampferzeuger lag „einige Wochen“ hinter dem Zeitplan.
- Februar 2006: Probleme bei der Qualitätskontrolle von Druckbehälterschweißnähten und Verzögerungen in der Detailkonstruktion
- Oktober 2006: TVO stellt fest, dass 3 von den 4 'hot legs' nicht gemäß der Spezifikationen angefertigt worden waren
- März 2007: beschädigte Stahlverkleidung für den Sicherheitsbehälter muss repariert werden

# Was ist schief gelaufen in Olkiluoto?

Seija Suksi, Finnisches Amt f. Strahlen- & Atomsicherheit (STUK):  
Arbeitszeit und -aufwand für die notwendige Ausführungsplanung der Anlage wurde eindeutig unterschätzt als der Gesamtzeitplan vereinbart wurde - Areva hat nicht sehr viel Erfahrung in der Bauausführung. Allem voran haben sie nicht gewusst, dass auch das Fundament eine sicherheitstechnisch relevante Komponente darstellt und sie hatten nicht genug Erfahrung, um die Subunternehmer zu beraten. Der enge Finanzrahmen ist auch ein Problem für Auswahl und Beaufsichtigung der Subunternehmer. Sie haben sehr oft den Subunternehmer ausgewählt, der das niedrigste Angebot abgab. Wir hatten den Eindruck, dass Framatome versucht hat, es so darzustellen, dass alle konkreten Probleme von Subunternehmern verursacht worden waren, aber die Wurzeln des Problems liegen viel tiefer im Gesamtmanagement des Projekts. Die STUK will, dass TVO den Projektmitarbeitern deutlicher vermittelt, dass ihre Verantwortung nicht mit der Schlüsselübergabe endet. TVO sollte daran denken, dass sie verantwortlich sind für die Sicherheit des Kraftwerks und diese Verantwortung kann nicht an den Stromversorger übertragen werden.

# Warum herrscht Uneinigkeit über die Kosten von Kernenergie?

- Es gab schon immer die Annahme, dass neue Kraftwerke viel billiger und sicherer sein würden als die existierenden
- Prognosen der Kosten und des Leistungsverhaltens stellen im Allgemeinen diejenigen, die auch ein persönliches Interesse an der Kernkraft haben, und waren stets optimistisch
- Nur wenige Aufträge waren in den letzten 20 Jahren vergeben worden, auf die man Prognosen hätte stützen können
- Sehr wenig harte Fakten zu Bau- und Betriebskosten werden veröffentlicht
- Alle Bauweisen, die im Westen in Betracht kommen, sind unerprobt. Nur ein Kraftwerk modernen Designs ist im Bau

# Wichtigste wirtschaftliche Faktoren

- Baukosten und -zeit. Man erwartet, dass das Abbezahlen von Baukosten und Zinsen rund  $2/3$  der Kosten von Atomstrom ausmacht
- Kapitalkosten. Kernkraft ist die kapitalintensivste Methode der Stromerzeugung. Für ein monopolistisches Staatsunternehmen sind die Kapitalkosten gering (5-8%), aber für Privatunternehmen auf dem freien Markt hoch (>15%). Stromversorgungsunternehmen mit garantiertem Absatzmarkt gibt es selten
- Betriebsleistung. Die Verlässlichkeit der Anlage (Auslastungsgrad) bestimmt die effektive Leistung. Umso mehr Leistung, umso breiter kann man die Fixkosten streuen. Auslastungsgrade um 90% wurden erwartet, aber nur in wenigen Ländern wurde dieses Niveau erreicht

# Andere wichtige Faktoren

- Kosten für Betrieb und Wartung (O&M). Viele Leuten denken, Kernenergie wäre im Wesentlichen kostenfrei, wenn die Anlage erst gebaut ist. British Energy ging Pleite, weil es von den Einnahmen noch nicht einmal die Betriebskosten abdecken konnte.
- Stilllegung & Atommüllentsorgung. Wenn die Kosten genau prognostiziert werden und Rückstellungen gesammelt werden und sicher investiert, ist dies kein bedeutender Posten.
- Aber es gibt keine Erfahrungen mit der Entsorgung von hochradioaktivem Abfall (HLW) und wenige mit Stilllegungen, und daher sind Kostenvoranschläge Vermutungen. Großbritanniens Rückstellungen für Stilllegungen gingen 7 Mal verloren und es gibt wenige Rückstellungen für die HLW-Entsorgung.

# Weniger wichtige Faktoren

- Vermutete Lebensdauer. Besonders bei hohen Kapitalkosten, wird die erwartete Wirtschaftlichkeit durch das, was in den ersten 10-15 Jahren passiert, bestimmt.
- Kernbrennstoffe. Der Kauf von Kernbrennstoffen macht nur einen kleinen Teil der Stromerzeugungskosten aus. Die Entsorgungskosten für verbrauchte Kernbrennstäbe werden als relativ gering eingeschätzt, sind aber ungewiss.
- Versicherungs- und Haftpflichtdeckung. Gemäß internationaler Abkommen tragen die Regierungen das Hauptrisiko, aber auch eingeschränkte Deckung ist teuer.
- Ausgangsleistung. Frühere Generationen von Kraftwerken liefen oft nicht so wie geplant, indem sie beispielsweise nicht die vorgesehene Leistung erreichten.

	Baukosten (€kW)	Reale Kapitalkosten (%)	O&M-Kosten (€MWh)	Kosten Stromerz. (€MWh)
Benchmark	1875/2025/4000	12-15	15-30	?
Lappeenranta	1875	5	18	23
PIU	1200	15	?	55
UK Energy Rev	2000	?	?	56
Scully Capital	725-1160	?	12	?
MIT	1600	11.5	11	67-79
RAE	1660	7.5	22	41
RAE (update)	1520	10	23	41
Chicago Univ	800-1450	12.5	12	42-57
Canadian Nuc	1550	10	11	27
IEA/NEA	1600-3600	5-10	8-22	17-55
Oxera	1670-2350	?	17	?
UBS	2050	?	?	30

# Wie ergeben sich in Prognosen niedrige Kosten?

- Die Prognose der PIU (2002) gibt Baukosten von  $\lt \text{€}1200/\text{kW}$  an. Sizewell B kostete  $\gt \text{€}4200/\text{kW}$  und Olkiluoto hat veranschlagte Kosten von mindestens  $\text{€}2000/\text{kW}$
- Der UK Energy Review setzte Baukosten an wie Olkiluoto, aber dieselben Stromerzeugungskosten wie PIU, welche anderen Posten wurden verändert?
- Scully Capital (2002) hatte 4 Szenarien für Baukosten,  $\text{€}700\text{-}1100/\text{kW}$
- MIT (2003) schätzte  $\text{€}1540/\text{kW}$  und O&M-Kosten 25% unter denen von laufenden Anlagen
- RAE (2004) schätzte Kapitalkosten auf 7,5% und O&M-Kosten auf 1/3 laufender britischer Anlagen

# Wie ergeben sich in Prognosen niedrige Kosten?

- Die Universität von Chicago (2004) schätzte Baukosten auf €770-1400/kW
- Canadian Energy Research Institute (2004) schätzte Baukosten auf ca. €1400/kW
- IEA/NEA (2005) hat eine Reihe von Szenarien mit sehr niedrigen Ergebnissen, z.B. 5-10% Kapitalkosten
- OXERA (2005) schätzt O&M-Kosten auf weniger als 1/3 von denen laufender Anlagen und den Auslastungsgrad auf 95%

# Notwendigkeit von Subventionen und Garantien

- Strom-Abnahmegarantie für 15 Jahre gekoppelt an die Kosten
- "Turnkey"-Bauverträge (Trennung von Bau und Betrieb)
- Leistungs-/Ausfallsicherheitsgarantien
- Betriebskostengarantie
- Deckelung der Stilllegungs- und Entsorgungskosten (bes. für verbrauchte Brennstoffe)
- Garantien gegen Verzögerungen durch Aufsicht oder Gerichte und die Folgen von Vorfällen anderswo auf der Welt

# Fazit (1)

- Kostenreduzierende Faktoren - Lerneffekte, technologischer Fortschritt, Skaleneffekte, Wirtschaftlichkeit durch erhöhte Produktionszahlen - hatten kaum einen Effekt auf die Kosten der Kernenergie. Warum?
- Fähigkeiten in der Nukleartechnologie vergehen rasch und 'Vergessen' ist wahrscheinlicher als 'Lernen' (Olkiluoto)
- Wirtschaftlichkeit durch erhöhte Produktionszahlen seit einer Ewigkeit unmöglich
- Wenig Erfahrung mit aktuellen Bauweisen
- Entsorgungs- und Stilllegungskosten sind Mutmaßungen
- Selbst wenn es Erfahrungswerte gibt, sind Kostenangaben nicht verfügbar oder nicht verlässlich

## Fazit (2)

- Privatisierung der Stromproduzenten erhöht die Kapitalkosten und verschiebt die wirtschaftlichen Risiken zu den Aktionären
- Olkiluoto ist ein Sonderfall. In den meisten anderen Ländern wären staatliche Subventionen und Garantien nötig
- Günstige Prognosen der letzten 5 Jahre basierten alle auf ausgesprochen optimistischen Annahmen
- Garantien sind wegen der wirtschaftlichen Risiken notwendig