

## 24. Kernkraft?

*We made the mistake of lumping nuclear energy in with nuclear weapons, as if all things nuclear were evil. I think that's as big a mistake as if you lumped nuclear medicine in with nuclear weapons.*

Patrick Moore, Ehemaliger Direktor von Greenpeace International

Kernkraft gibt es in zwei Geschmacksrichtungen. Kernspaltung ist diejenige, die wir kennen und in unseren Kraftwerken benutzen; Spaltung benutzt Uran als Brennstoff, ein besonders schweres Element. Kernfusion ist die andere, von der wir noch nicht wissen, wie wir sie in Kraftwerken implementieren könnten; Fusion würde leichte Elemente als Brennstoff benutzen, insbesondere Wasserstoff. Spaltungsreaktionen teilen einen schweren Kern in zwei mittelgroße, wodurch Energie frei wird. Fusionsreaktionen verschmelzen zwei leichte Kerne zu einem mittelgroßen, wodurch Energie frei wird.

Beide Formen der Kernkraft, Spaltung und Fusion, haben eine wichtige Eigenschaft: Die Nuklearenergie, die pro Atom verfügbar ist, ist nahezu eine Million mal größer als die chemische Energie in einem Atom typischer Treibstoffe. Das bedeutet, dass die Menge an Treibstoff und Abfall, mit der man bei einem Kernreaktor zu tun hat, bis zu einer Million mal kleiner sein kann als die Menge an Treibstoff und Abfall, die bei einem vergleichbaren konventionellen Kraftwerk anfällt.

Lassen Sie mich diese Idee personalisieren. Die Masse fossilen Brennstoffs, die der Durchschnittsbrite verbraucht, liegt bei etwa 16 kg pro Tag (4 kg Kohle, 4 kg Öl und 8 kg Gas). Das bedeutet, dass jeden Tag nur lhretwegen eine Menge fossiler Treibstoffe, die dem Inhalt von ein-einhalb Bierkästen entspricht, aus einem Loch im Boden geholt, transportiert, verarbeitet und irgendwo verbrannt wird. Der fossile Brennstoffverbrauch des Durchschnittsbritten erzeugt 11 Tonnen Abfall an Kohlendioxid pro Jahr, das sind 30 kg pro Tag. Stellen Sie sich vor, jeder wäre verantwortlich für das Sammeln und Verwerten des eigenen Kohlendioxidmülls. 30 kg wäre ein praller Rucksack voll jeden Tag, entsprechend dem Inhalt von drei Bierkästen!

Im Vergleich dazu ist die erforderliche Menge an Natururan, die in einem gängigen Kernkraftwerk dieselbe Energiemenge wie diese 16 kg fossile Brennstoffe erzeugt, gerade mal 2 Gramm; und der entstehende Abfall wiegt ein Viertel Gramm. (Diese 2 g Uran sind übrigens nicht so klein wie ein Millionstel von 16 kg pro Tag, weil heutige Reaktoren weniger als 1% des Urans verbrennen.) Um 2 g Uran pro Tag zu liefern, müssen die Bergleute in den Uranminen etwa 200g Erz pro Tag fördern.



Fig.24.1: Elektrizität aus Kernspaltung in 2007 pro Kopf, in kWh pro Tag pro Person, in jedem Land mit Atomkraftwerken.

Die Materialströme, die in einen Atomreaktor hinein und aus ihm heraus fließen, sind klein gegen die Ströme fossiler Brennstoffe. „Small is beautiful“, Klein ist hübsch, doch nur weil der nukleare Abfallstrom klein ist, heißt das nicht, dass er kein Problem wäre; er ist nur ein „hübsch kleines“ Problem.

### „Nachhaltige“ Energie aus Kernspaltung

Fig.24.1 zeigt, wie viel Elektrizität weltweit im Jahr 2007 durch Kernkraft erzeugt wurde, aufgesplittet nach Ländern.

Kann Kernkraft „nachhaltig“ sein? Vergessen wir für einen Moment die üblichen Fragen über Sicherheit und Entsorgung, und stellen wir die Kernfrage, ob die Menschheit über Generationen von der Kernspaltung leben kann. Wie groß sind die weltweiten Reserven von Uran oder anderem spaltbaren Material? Haben wir nur für ein paar Jahrzehnte einen Vorteil vom Uran, oder über Jahrtausende?

Um die „nachhaltige“ Leistung des Urans abzuschätzen, nehme ich das gesamte abbaubare Uran in der Erde und im Meerwasser, teile es fair unter den 6 Milliarden Menschen auf und frage: „Wie schnell dürfen wir es verbrauchen, wenn es 1000 Jahre reichen muss?“

Fast das gesamte abbaubare Uran liegt im Ozean, nicht in der Erde: Meerwasser enthält 3,3 mg Uran pro m<sup>3</sup> Wasser, was sich auf 4,5 Milliarden Tonnen weltweit summiert. Ich nannte das Uran in den Ozeanen „abbaubar“, doch das ist etwas ungenau – das meiste Ozeanwasser ist ziemlich unerreichbar und der ozeanische Konvektionsgürtel rotiert nur etwa alle 100 Jahre einmal herum; und niemand hat bisher die Uranextraktion aus Meerwasser im industriellen Maßstab demonstriert. Daher mache ich separate Abschätzungen für zwei Fälle: Erstens wenn man nur Uranerz benutzt und zweitens wenn man das ozeanische Uran hinzunimmt.

	Millionen Tonnen Uran
Australien	1.14
Kasachstan	0.82
Kanada	0.44
USA	0.34
Südafrika	0.34
Namibia	0.28
Brasilien	0.28
Russische Föderation	0.17
Usbekistan	0.12
Welt insgesamt (konventionelle Reserven im Boden)	4.7
Phosphatlager	22
Meerwasser	4 500

Tabelle 24.2: Bekannte abbaubare Reserven von Uran. Oben die „hinreichend gesicherten“ und die „abgeleiteten“ Ressourcen, zu Kosten unter \$130 pro kg Uran, Stand 1.1.2005. Das sind die geschätzten Bestände in Gebieten, in denen die Erkundung bereits stattfand. Außerdem liegen noch 1,3 Millionen Tonnen abgereichertes Uran in Lagerbeständen herum, als Nebenprodukt früherer Uran-Aktivitäten.

Das Uranerz im Boden, das mit einem Aufwand von unter 130\$ pro kg abbaubar ist, ist nur etwa ein Tausendstel davon. Wenn die Preise über 130\$ pro kg steigen, werden Phosphatlager wirtschaftlich, die Uran in kleinen Konzentrationen enthalten. Der Abbau von Uran aus Phosphaten ist problemlos und wurde in Amerika und Belgien bis 1998 durchgeführt. Für meine Schätzung zum Uranerz addiere ich konventionelles Uran und die Phosphate, und erhalte die gesamten Ressourcen von 27 Millionen Tonnen Uran (Tabelle 24.2).

Wir müssen zwei Arten der Urannutzung im Reaktor unterscheiden: (a) die weithin angewandte Once-Through Methode<sup>26</sup> holt Energie hauptsächlich aus dem  $^{235}\text{U}$  (das nur 0,7 % des natürlichen Uran ausmacht) und wirft das verbleibende  $^{238}\text{U}$  weg; (b) Schnelle Brüter Reaktoren, die aufwändiger zu bauen sind, wandeln das  $^{238}\text{U}$  in spaltbares Plutonium  $^{239}\text{Pu}$  und erhalten so etwa 60 mal mehr Energie aus dem Uran.



Fig.24.3: (oben links) Arbeiter schieben Uranstäbe in den X-10 Grafitreaktor.

Fig.24.4: (oben rechts) Atomkraftwerk Three Mile Island



Fig.24.5: (links) Dounreay Nuclear Power Development Establishment, dessen Hauptaufgabe die Entwicklung der Schneller-Brüter-Reaktortechnologie war. Foto von John Mullen.

### ***Once-Through Reaktoren, die Uran aus dem Boden verwenden***

Ein Once-Through 1-Gigawatt-AKW braucht 162 Tonnen Uran pro Jahr. Die bekannten durch Bergbau förderbaren Ressourcen, verteilt auf 6 Milliarden Menschen, würden für 1000 Jahre reichen, wenn wir Atomstrom mit einer Rate von **0,55 kWh pro Tag pro Person** produzierten. Diese „nachhaltige“ Produktionsrate entspricht dem Output von gerade mal 136 AKWs, der Hälfte der heutigen Produktion. Es ist sehr wahrscheinlich, dass das Uranpotenzial dabei unterschätzt wird, denn solange es noch keine Uran-Knappheit gibt, besteht auch keine Veranlassung zu größeren Erkundungen und seit den 1980ern wurden kaum neue Erkundungen durchgeführt; daher wird vielleicht noch mehr Uran entdeckt werden. In der Tat schätzte ein 1980 veröffentlichter Artikel die Ressourcen an niederwertigerem Uran etwa 1000mal höher ab als unsere angenommenen 27 Millionen Tonnen.

Könnte unser derzeitiger Once-Through Umgang mit Bergbau-Uran nachhaltig sein? Das ist schwer zu sagen, weil die Unsicherheiten über zukünftige Erkundungen so hoch sind. Bei der heutigen Verbrauchsrate können Once-Through Reaktoren sicher noch Hunderte Jahre betrieben werden. Wenn wir aber Kernkraft weltweit auf das 40fache

---

<sup>26</sup> Once-Through, wörtlich „einmal durch“, steht hier für die klassische Kernreakorteknik, in der spaltbares Material (ggf. nach Anreicherung) einmal als Kernbrennstoff verwendet und dann der Entsorgung zugeführt wird.

ausbauen wollen, um mit ihr fossile Brennstoffe abzulösen und weiteres Wachstum des Lebensstandards zu sichern, steht zu befürchten, dass die Once-Through Reaktortechnologie nicht „nachhaltig“ ist.

### ***Schnelle Brüter Reaktoren, die Uran aus dem Boden verwenden***

Uran kann 60mal effizienter in schnellen Brütern genutzt werden, die das gesamte Uran verbrennen – sowohl  $^{238}\text{U}$  als auch  $^{235}\text{U}$  (im Gegensatz zu den Once-Through Reaktoren, die fast nur  $^{235}\text{U}$  verbrennen). Auch der verbrauchte Treibstoff, den Once-Through Reaktoren übriglassen, das abgereicherte Uran, könnte in Schnellen Brütern genutzt werden, daher muss Uran, das in Once-Through-Reaktoren schon einmal verwendet wurde, nicht Abfall sein. Würden wir all das Uran im Boden (plus die Reste an abgereichertem Uran) in 60mal effizienteren Schnellen Brütern verarbeiten, wäre das eine Leistung von **33 kWh pro Tag pro Person**. Die Einstellungen zum Schnellen Brüter reichen von „Das ist eine gefährliche fehlgeschlagene experimentelle Technologie, über die man gar nicht sprechen sollte“ bis „wir können und sollten sofort beginnen, Schnelle Brüter zu bauen“. Ich bin nicht kompetent, die Risiken der Schnellen Brüter zu bewerten und ich will nicht ethische Aussagen mit faktischen Aussagen vermischen. Mein Ziel ist lediglich, beim Verstehen der Zahlen zu helfen. Die einzige ethische Aussage, die ich hier festhalten will ist: „Wir sollten ein Konzept haben, das aufgeht“.<sup>27</sup>

### ***Once-Through, mit Uran aus den Ozeanen***

Das Uran in den Meeren entspricht, wenn es komplett herausgezogen und in Once-Through Reaktoren verarbeitet werden würde, einer Gesamtenergie von

$$\frac{4,5 \text{ Milliarden Tonnen pro Planet}}{162 \text{ Tonnen Uran pro GW-Jahr}} = 28 \text{ Millionen GW-Jahre pro Planet.}$$

Wie schnell könnte man das Uran aus den Ozeanen extrahieren? Die Ozeane zirkulieren langsam: die Hälfte des Wassers ist im Pazifischen Ozean, und das Wasser aus den pazifischen Tiefen zirkuliert in der großen ozeanischen Konvektion nur etwa alle 1600 Jahre an die Oberfläche. Nehmen wir an, dass 10% des Urans innerhalb einer solchen 1600-Jahres-Periode extrahiert werden könnten. Das wäre eine Extraktionsrate von 280.000 Tonnen pro Jahr. In Once-Through Reaktoren lieferte das eine Leistung von

$$2,8 \text{ Millionen GW-Jahre} / 1600 \text{ Jahre} = 1750 \text{ GW,}$$

was, aufgeteilt auf 6 Milliarden Menschen, **7 kWh pro Tag pro Person** entspricht (Gegenwärtig gibt es weltweit 369GW AKW-Leistung, also entspricht diese Zahl einer Vervierfachung des heutigen Levels). Ich folgere also, dass Uranextraktion aus den Ozeanen die Once-Through-Reaktoren zu einer „nachhaltigen“ Option machen würde – unter der Annahme, dass diese Reaktoren die Energiekosten des Extraktionsprozesses abdecken können.

### ***Schnelle Brüter, die Uran aus den Ozeanen benutzen***

Weil „Schnelle Brüter“-Reaktoren 60mal effizienter sind, könnte dieselbe Extraktion von ozeanischem Uran **420 kWh pro Tag pro Person** liefern. Zu guter Letzt ein nachhaltiges Szenario, das den heutigen Verbrauch übertrifft! – doch nur mit Hilfe zweier Technologien, die eine kaum entwickelt, die andere aus der Mode: Extraktion ozeanischen Urans, und Schnelle Brüter.

---

<sup>27</sup> „aufgehen“, engl. to add up, bedeutet hier wie im folgenden, dass etwas Sinn macht, vernünftig und konsistent, in sich stimmig, widerspruchsfrei ist.

### **Uran aus Flüssen**

Der Urangehalt der Ozeane wird noch von dem der Flüsse übertroffen, die Uran mit einer Rate von 32.000 Tonnen pro Jahr mit sich führen. Wenn 10% dieses Zuflusses abgefangen werden, wäre das genügend Brennstoff für 20 GW Once-Through Reaktoren oder 1200 GW Schnelle Brüter. Die Schnellen Brüter würden dann **5 kWh pro Tag pro Person** liefern.

All diese Zahlen sind in Fig.24.6 zusammengefasst.

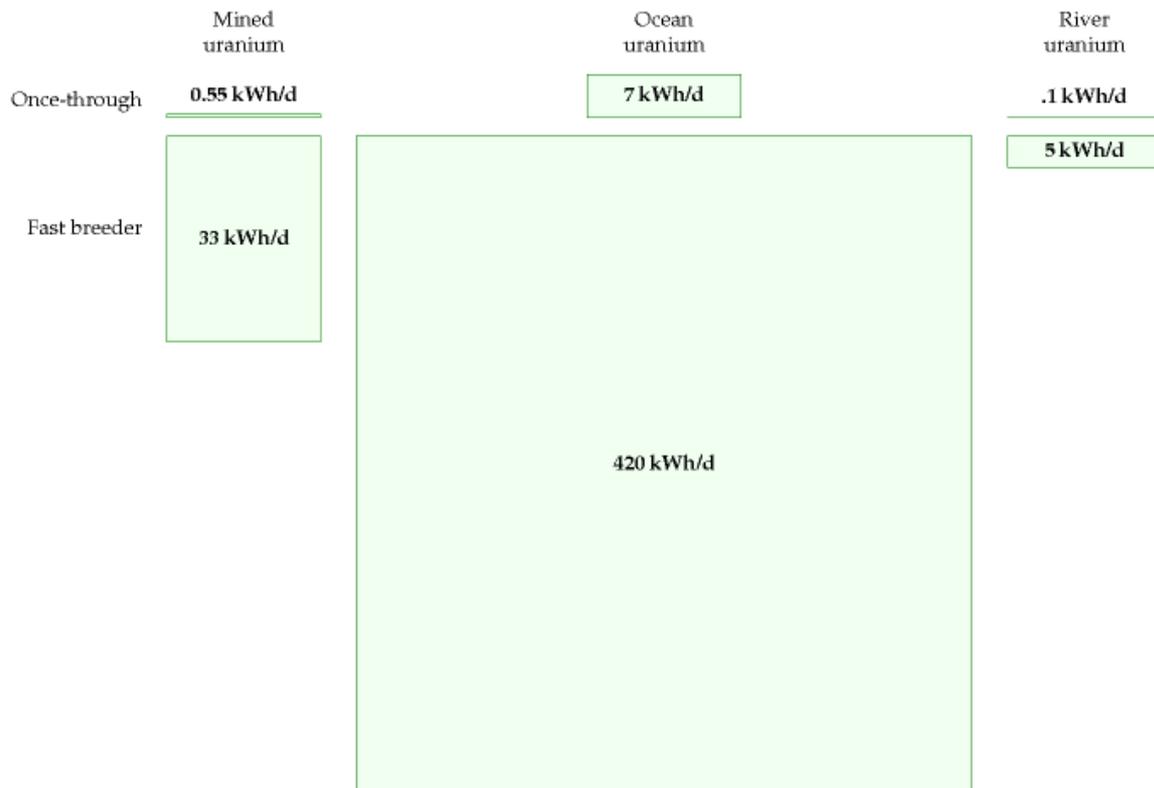


Fig.24.6: "Nachhaltige" Energie aus Uran. Zum Vergleich: die weltweite Atomenergieproduktion ist heute bei 1,2 kWh/d pro Person. Die Britische Atomenergieproduktion liegt bei 4 kWh/d pro Person, Tendenz fallend.

### **Wie sieht es mit den Kosten aus?**

Wie in diesem Buch üblich, schenken die Haupt-Berechnungen der Ökonomie wenig Beachtung. Weil aber dieser potenzielle Beitrag von auf ozeanisches Uran gestützter Energieerzeugung einer der größten in unserer Liste „nachhaltiger“ Produktion ist, scheint es angemessen nachzufragen, ob dieses Uran-Energie-Szenario ökonomisch überhaupt plausibel ist.

Japanische Forscher fanden eine Methode, Uran für etwa \$100-300 pro Kilogramm aus Meerwasser zu extrahieren, die Kosten bei Uranerz liegen dagegen um die \$20/kg. Weil Uran so viel mehr Energie pro Tonne als traditionelle Brennstoffe enthält, hätte dieser 5fache oder 15fache Kostenzuwachs beim Uran wenig Auswirkung auf die Kosten des Atomstroms: Atomstromkosten werden dominiert durch die Kosten für Bau und Rückbau von Kernkraftwerken, nicht durch die Kosten des Brennstoffs. Auch ein Preis von \$300/kg würde auf den Strompreis nur mit etwa 0,3 Cent pro kWh durchschlagen. Der Aufwand für die Uranextraktion aus dem Meerwasser könnte sich verringern, wenn man die Extraktion mit einer anderen Nutzung des Meerwassers verbindet – beispielsweise der Kraftwerkskühlung.

Noch sind wir nicht zu Hause: Lässt sich die japanische Technologie hoch skalieren? Welche Energiekosten verursacht das Verarbeiten des Meerwassers? Im zitierten japanischen Experiment sammelten drei Käfige voll mit 350 kg Uran-anziehendem Adsorbiermaterial „mehr als 1 kg Yellow Cake in 240 Tagen“, dieser Wert entspricht 1,6 kg pro Jahr. Die Käfige hatten eine Querschnittsfläche von 48 m<sup>2</sup>. Um ein Once-Through 1GW-AKW zu betreiben, brauchen wir 160.000 kg pro Jahr, eine Produktionsrate 100.000mal größer als das japanische Experiment. Wenn wir nur die japanische Technologie hoch skalieren, die das Uran passiv aus dem Meerwasser adsorbierte, würde unser 1GW-Kernkraftwerk Adsorber-Käfige mit einer Sammelfläche von 4,8 km<sup>2</sup> benötigen, die 350.000 Tonnen Adsorbiermaterial beinhalten – mehr als das Gewicht an Stahl im Reaktor selbst. Um diese große Zahlen in menschliche Größen zu bringen: Würde Uran, sagen wir, 22 kWh pro Tag pro Person liefern, dann könnten sich 1 Million Menschen einen Reaktor teilen, und jeder von ihnen benötigte 0,16 kg Uran pro Jahr. Also benötigt jeder Mensch ein Zehntel der im japanischen Experiment benutzten Apparate, mit einem Gewicht von 35 kg und einer Fläche von 5 m<sup>2</sup> pro Person. Der Vorschlag, dass solche Uran-Extraktionsanlagen gebaut werden, ist also in derselben Größenordnung wie Vorschläge der Art „jeder sollte 10 qm Solarmodule haben“ oder „jeder sollte ein Ein-Tonnen-Auto besitzen und einen zugehörigen Parkplatz“. Eine große Investition, sicher, doch nicht jenseits vernünftiger Skalen. Und das war die Berechnung für Once-Through Reaktoren. Für Schnelle Brüter wäre 60mal weniger Uran nötig, was für die Masse des Urankollektors dann 0,5 kg pro Person ergibt.

## Thorium

Thorium ist ein radioaktives Element ähnlich dem Uran. Früher zur Herstellung von Glühstrümpfen verwendet, ist es etwa dreimal häufiger in der Erdkruste vorhanden als Uran. Bodenmaterial enthält gewöhnlich etwa 6 ppm (0,0006%) Thorium und einige Minerale enthalten 12% Thoriumoxid. Thorium kann in einfachen Reaktoren vollständig verbrannt werden (im Gegensatz zu Standard-Uranreaktoren, die nur etwa 1% natürlichen Urans verbrennen). Thorium wird in Kernreaktoren in Indien verwendet. Wenn Uranerz knapp wird, wird Thorium wahrscheinlich der dominante Kernbrennstoff werden.

Land	Reserven (in 1000 t)			Mined Thorium
Türkei	380	Tabelle 24.7: (links) Bekannte weltweite Thorium-Ressourcen in Monazit (ökonomisch abbau-bar)  Fig.24.8: (rechts) Thorium-Optionen	Conventional reactor	4 kWh/d
Australien	300		"Energy amplifier"	24 kWh/d
Indien	290			
Norwegen	170			
USA	160			
Kanada	100			
Südafrika	35			
Brasilien	16			
Andere Länder	95			
<b>Welt insgesamt</b>	<b>1 580</b>			

Thoriumreaktoren liefern 3,6 Milliarden kWh Wärme pro Tonne Thorium, d.h. ein 1GW Reaktor braucht etwa 6 Tonnen Thorium im Jahr, wenn seine Generatoren 40% effizient sind. Die weltweiten Thoriumvorkommen werden auf 6 Millionen Tonnen geschätzt, viermal mehr als die bekannten Reserven in Tabelle 24.7. Wie schon bei Uran scheint es auch beim Thorium plausibel, dass die Ressourcen unterschätzt sind, weil Thoriumerkundung heutzutage als nicht interessant gilt. Wenn wir wie beim Uran annehmen, dass die Ressourcen 1000 Jahre reichen sollen und auf 6 Milliarden Menschen gleichmäßig verteilt werden, finden wir, dass „nachhaltig“ eine Leistung von **4 kWh/d pro Person** generiert werden kann.

Ein alternativer, sog. beschleunigergetriebener Kernreaktor für Thorium, das „Rubbiatron“<sup>28</sup>, das vom Nobelpreisträger Carlo Rubbia und seinen Kollegen vorgestellt wurde, könnte nach deren Schätzung 6 Millionen Tonnen Thorium in 15.000 TWh Energie, oder 60 kWh/d pro Person über 1000 Jahre umwandeln. Mit einer 40% effizienten Umwandlung in Elektrizität würde das 24 kWh/d pro Person für 1000 Jahre liefern. Und auch der Abfall aus dem Rubbiatron wäre viel weniger radioaktiv. Es wird argumentiert, dass zu gegebener Zeit viele Male mehr Thorium ökonomisch abbaubar wäre als die gegenwärtige Schätzung von 6 Millionen Tonnen. Sind die Annahmen – 300 mal mehr – korrekt, würden das Thorium und das Rubbiatron 120 kWh/d pro Person für 60.000 Jahre garantieren.

## Flächenverbrauch

Stellen wir uns vor, England beschließt ernst zu machen mit dem Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen und baut viele neue Kernkraftwerke, auch wenn diese nicht „nachhaltig“ sein mögen. Wenn wir genug AKWs bauen, um eine signifikante CO<sub>2</sub>-Reduktion im Transportwesen und beim Heizen möglich zu machen, passen diese AKWs alle in England hinein? Die Zahl, die wir wissen müssen ist die Leistung pro Fläche eines AKWs: etwa 1000 W/m<sup>2</sup> (Fig.24.10). Stellen wir uns vor, wir erzeugen 22 kWh pro Tag pro Person an Atomstrom – das entspricht etwa 55 GW (ungefähr die AKW-Leistung von Frankreich), die durch 55 AKWs geliefert werden, wobei jedes davon einen Quadratkilometer Fläche beansprucht. Das sind etwa 0,02% des Landes. Windfarmen, die dieselbe Leistung erzeugen, würde etwa 500mal mehr Fläche verbrauchen: 10% des Landes. Wären die AKWs paarweise entlang der Küste (Länge 3000 km bei 5 km Auflösung) aufgestellt, dann wäre es ein Paar je 100 km. Während die Gesamtfläche bescheiden ist, wäre der Anteil an Küstenlinie, die dadurch aufgefressen würde, immerhin 2% (2 Kilometer alle 100 km).



Fig.24.9: Die Kraftwerke bei Sizewell. Sizewell A im Vordergrund hatte eine Kapazität von 420 MW und wurde Ende 2006 geschlossen. Sizewell B, dahinter, hat eine Kapazität von 1,2 GW. Foto von William Connolley.



Fig.24.10: Sizewell beansprucht weniger als 1 km<sup>2</sup> Platz. Der Abstand des blauen Gitters ist 1 km. © Crown Copyright; Ordnance Survey

<sup>28</sup> Engl. „energy amplifier“

## Die Ökonomie des Rückbaus

Was kostet es, ein AKW rückzubauen? Die Behörde für nukleare Stilllegungen hat ein Jahresbudget von 2 Milliarden € für die nächsten 25 Jahre. Die Atomindustrie verkaufte jedem in England 4 kWh/d seit etwa 25 Jahren, also sind die Kosten der Stilllegungsbehörde 2,3 Cent/kWh<sup>29</sup>. Das ist eine beträchtliche Subvention – doch bei weitem nicht, das muss man sagen, so beträchtlich wie die Subvention für off-shore Wind (7 Cent/kWh).

## Sicherheit

Die Sicherheit von Kernkraftwerken bleibt in England bedenklich. Die Wiederaufbereitungsanlage THORP in Sellafield, erbaut 1994 mit 1,8 Milliarden £, hatte ein wachsendes Leck wegen eines gebrochenen Rohres von August 2004 bis April 2005. Über diese acht Monate flossen insgesamt **85.000 Liter** uranhaltige Flüssigkeit in eine Wanne, die mit Sicherheitssystemen ausgestattet war, dafür ausgelegt, Lecks von **15 Liter** unverzüglich zu erkennen. Doch blieb das Leck unentdeckt, weil die Operateure die Tests nicht durchgeführt hatten, die sicherstellen sollten, dass die Sicherheitssysteme arbeiteten; und weil die Operateure ohnehin gewöhnlich Sicherheitsalarme ignorierten.

Das Sicherheitssystem kam mit Gürtel und Hosenträger. Unabhängig von den nicht funktionierenden Sicherheitsalarmen hätten Routinemessungen der Flüssigkeiten in der Wanne eine abnormale Konzentration von Uran spätestens einen Monat nach der Entstehung des Lecks feststellen müssen; doch die Operateure kümmerten sich oft nicht darum, diese Routinemessungen auch durchzuführen, weil sie sich zu beschäftigt fühlten; und als sie die Messungen vornahmen und eine abnorme Konzentration von Uran in der Wanne feststellten (am 28. August 2004, 26. November 2004 und 24. Februar 2005), hatte diese Feststellung keine Konsequenzen.

Bis April 2005 liefen **22 Tonnen** Uran aus, und doch hatte kein Leck-Detektionssystem ein Leck detektiert. Schlussendlich wurde das Leck durch die *Buchhaltung* entdeckt, als die Erbsenzähler feststellten, dass sie 10% weniger Uran herausbekamen als ihre Klienten nach eigenen Angaben hineingefüllt hatten! Gott sei Dank hatte diese Privatfirma ein Profitmotiv, hey? Die Kritik des *Chief Inspector of Nuclear Installations* war niederschmetternd: „Die Anlage wurde in einer Kultur des Wegsehens



Fig.24.11: Opferraten der Elektrizitätserzeugung nach Technologien. X: Schätzungen der Europäischen Union durch das ExternE Projekt, O: Paul-Scherrer-Institut.

<sup>29</sup> Die Stilllegungsbehörde ist nicht nur für die zivilen, sondern auch für die militärischen Nuklearanlagen zuständig. Der Löwenanteil des Budgets fällt somit auf den Rückbau militärischer Anlagen, diese 2,3 Cent/kWh sind damit wohl deutlich überschätzt (David MacKay, Errata).

betrieben, die zuließ, dass Instrumente im Alarmmodus weiterbetrieben werden anstatt dem Alarm nachzugehen und den zugehörigen Fehler zu beheben.“

Wenn wir private Unternehmen neue Reaktoren bauen lassen, wie können wir dann sicherstellen, dass höhere Sicherheitsstandards angewandt werden? Ich weiß es nicht.

Auf der anderen Seite dürfen wir uns aber nicht zu sehr hineinreißen lassen in die Angst vor den Gefahren der Kernkraft. Kernkraft ist nicht unendlich gefährlich. Sie ist einfach gefährlich, wie auch Kohlebergwerke, Ölplattformen, Wasserkraftwerke und Windturbinen gefährlich sind. Auch wenn wir keine Garantie gegen zukünftige Nuklearunfälle haben, ist es, denke ich, der richtige Weg Kernkraft zu bewerten, wenn man sie objektiv mit anderen Energiequellen vergleicht.

Kohlekraftwerke setzen zum Beispiel die Bevölkerung radioaktiver Strahlung aus, weil Kohlenasche üblicherweise Uran enthält. Nach einem Artikel im *Science Journal* sind in Amerika Menschen in der Umgebung von Kohlekraftwerken höheren Strahlungsdosen ausgesetzt als in der Umgebung von Kernkraftwerken.

Wenn wir die öffentlichen Risiken der verschiedenen Energiequellen quantitativ bewerten wollen, brauchen wir eine neue Einheit. Ich will die Einheit „Todesopfer pro GWy (Gigawatt-Jahr)“ einführen. Lassen Sie mich erläutern, was es bedeutet, wenn eine Energiequelle eine Opferrate von 1 Toten pro GWy hat. Ein Gigawatt-Jahr ist die Energie, die ein 1GW-Kraftwerk produziert, wenn es ein Jahr durchgehend in Betrieb ist. Englands Elektrizitätsbedarf ist um die 45 GW oder, wenn Sie so wollen, 45 GWy pro Jahr. Erhalten wir also unsere Elektrizität von einer Quelle mit 1 Toten pro GWy, würde das bedeuten, dass das britische Elektrizitätsversorgungssystem 45 Leute pro Jahr tötet. Zum Vergleich: 3000 Menschen sterben jährlich auf Englands Straßen. So lange Sie also *nicht* eine Kampagne zur Abschaffung der Straßen führen, werden Sie zugeben, dass „1 Toter pro GWy“ eine Opferrate ist, die zwar traurig stimmt, mit der man aber zufrieden leben kann. Natürlich wären 0,1 Tote pro GWy vorzuziehen, doch es braucht nur einen kurzen Moment des Nachdenkens um sich klar zu machen, dass, leider, fossile Brennstoffe eine höhere Opferrate haben müssen als 0,1 Tote pro GWy – denken sie nur an die Unglücke an Bohrtürmen; Hubschrauberabstürze im Meer; Feuer an Pipelines; explodierende Raffinerien; Grubenunglücke im Kohlebergbau: es gibt in England Dutzende Unglücksfälle pro Jahr im Umfeld der Brennstoffkette.

Lassen Sie uns also die aktuellen Opferraten einer Reihe von Elektrizitätsquellen ansehen. Die Opferraten schwanken weit von Land zu Land. In China ist etwa die Opferrate im Kohlebergbau, pro Tonne geförderte Kohle, ungefähr 50mal höher als in



Fig.24.12: Kraftwerk Tschernobyl (oben), die verlassene Stadt Prypiat, die zum Support des Kraftwerks gegründet wurde (unten). Foto von Nik Stanbridge

den meisten anderen Nationen. Fig.24.11 zeigt Zahlen aus Studien des Paul-Scherrer-Instituts (PSI) und eines EU-Projektes namens ExternE, das umfassende Abschätzungen aller Auswirkungen der Energieproduktion durchführte. Nach den EU-Zahlen haben Stein- und Braunkohle und Öl die höchsten Opferraten, gefolgt von Torf und Biomasse, mit Opferraten über 1 pro GWy. Atom und Wind sind die besten, mit Opferraten unter 0,2 pro GWy. Wasserkraft ist nach EU-Angaben die sicherste, nach der PSI-Studie jedoch die schlechteste, weil letztere eine andere Auswahl von Ländern untersuchte.



### ***Inhärente Sicherheit der Kernenergie***

Angespornt von Bedenken wegen nuklearer Unfälle haben Ingenieure viele neue Reaktoren mit verbesserten Sicherheitsausrüstungen ersonnen. Das GT-MHR Kraftwerk beispielsweise soll inhärent sicher sein und hat darüber hinaus eine höhere Effizienz bei der Umwandlung von Wärme in Strom als konventionelle AKWs [gt-mhr.ga.com].

### **Sagen und Mythen**

Zwei häufig angeführte Nachteile der Kernkraft sind die Baukosten und der Abfall. Lassen Sie uns einige Aspekte dazu beleuchten.

***Der Bau eines AKW benötigt große Mengen Beton und Stahl, Materialien deren Herstellung eine große CO<sub>2</sub>-Verschmutzung mit sich bringt.***

Stahl und Beton eines 1GW AKW hat einen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von etwa 300.000 t CO<sub>2</sub>.

Verteilt man diese große Zahl über die 25-jährige Lebensdauer des Reaktors und rechnet die CO<sub>2</sub>-Beiträge auf die Standardeinheiten (g CO<sub>2</sub> pro kWh(el)) um, ergibt das

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{-Intensität aus d. Bauphase} &= \frac{300 \times 10^9 \text{ g}}{10^6 \text{ kW}(\text{el}) \times 220.000 \text{ h}} \\ &= 1,4 \text{ g/kWh}(\text{el}), \end{aligned}$$

was viel geringer ist, als der Wert des fossilen Brennstoffs von 400 g CO<sub>2</sub>/kWh(el). Das IPCC schätzt ab, dass die *gesamte* CO<sub>2</sub>-Intensität eines AKW (einschließlich Bau, Brennstoffverarbeitung und Rückbau) unter 40 g CO<sub>2</sub>/kW(el) liegt (Sims et al. 2007).

Verstehen sie mich bitte nicht falsch: Ich versuche nicht, pro-Kernkraft zu sein. Ich bin nur pro-Arithmetik.

### ***Ist der Abfall eines Reaktors nicht ein großes Problem?***

Wie wir am Anfang des Kapitels bereits feststellten, ist das Volumen des anfallenden Mülls verhältnismäßig klein. Wo die Asche von zehn Kohlekraftwerken eine Masse von vier Millionen Tonnen pro Jahr ausmacht (mit einem Volumen von etwa 40 Litern pro Person pro Jahr), umfasst der nukleare Müll von Englands 10 AKWs nur ein Volumen von 0,84 Liter pro Person pro Jahr – stellen Sie sich das als eine Flasche Wein pro Person pro Jahr vor (Fig.24.13).

Das meiste davon ist nieder-radioaktiver Abfall. 7% sind mittel-radioaktiver Abfall und nur 3% davon – 25 ml pro Jahr – sind hochradioaktiver Abfall.

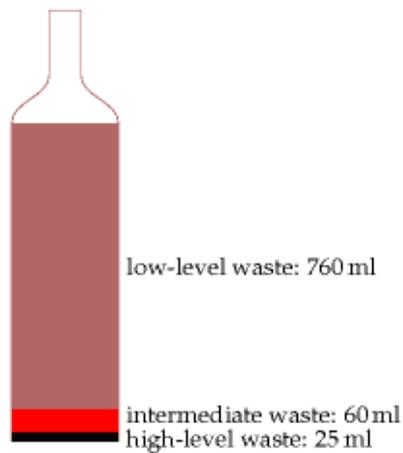


Fig.24.13: Britischer Atom-  
müll, pro Person, pro Jahr, hat  
ein Volumen von etwas mehr  
als einer Weinflasche voll.

Der hochradioaktive Abfall ist ein wirklich übler Stoff. Es ist üblich, den hochradioaktiven Abfall die ersten 40 Jahre beim Reaktor zu belassen. Er wird in Wasserbecken gelagert und gekühlt. Nach 40 Jahren ist die Radioaktivität auf 1/1000 gefallen. Die Radioaktivität nimmt weiter ab; wenn wir den Abfall wiederaufarbeiten und Plutonium und Uran für die weitere Verwendung als Kernbrennstoff trennen, dann ist nach 1000 Jahren die Aktivität des hochradioaktiven Abfalls auf dem Level natürlichen Uranerzes. Endlager-Ingenieure brauchen also ein Konzept, den Abfall für die nächsten 1000 Jahre zu sichern.

Ist das ein schwieriges Problem? 1000 Jahre sind sicherlich eine lange Zeit verglichen mit der Lebenserwartung von Regierungen und Ländern! Doch ist das Volumen so klein, dass ich denke, nuklearer Abfall ist eines der kleineren Probleme, im Vergleich zu den anderen Arten von Müll, den wir zukünftigen Generationen hinterlassen. Bei 25 ml pro Jahr bringt jeder in seinem ganzen Leben weniger als 2 Liter hochradioaktiven Müll zusammen. Auch wenn wir das mit den 60 Millionen Menschen multiplizieren, scheint das Volumen des über die Lebenszeit aufgelaufenen hochradioaktiven Abfalls nicht unbeherrschbar groß: 105.000 Kubikmeter. Das ist dasselbe Volumen wie 35 olympische Schwimmbecken. Würde man diesen Müll in einer ein Meter dicken Schicht ausbringen, er würde gerade ein Zehntel eines Quadratkilometers belegen.

Es gibt bereits viele Plätze, die für Menschen gesperrt sind. Ich sollte nicht in Ihren Garten spazieren. Und auch Sie nicht in meinen. Keiner von uns ist in Balmoral<sup>30</sup> willkommen. „Betreten verboten“-Schilder gibt es überall. Downing Street, Heathrow Airport, Kasernen, aufgelassene Bergwerke – überall ist gesperrt. Ist es unvorstellbar einen weiteren 1-km<sup>2</sup>-Platz – vielleicht tief unter Tage – für die nächsten 1000 Jahre zu sperren?

Vergleichen Sie diese 25 ml hochradioaktiven Abfall pro Jahr pro Person mit anderen Formen traditionellen Abfalls, die wir gegenwärtig deponieren: Hausmüll – 517 kg pro Jahr pro Person; Gefahrmüll – 83 kg pro Jahr pro Person.

Manchmal wird möglicher neuer Atom-  
müll mit dem Atom-  
müll verglichen, mit dem wir  
bereits zu tun haben, dank unserer bestehenden alten Reaktoren. Hier sind die Zahlen für England. Der projektierte Umfang von „Abfall erhöhter Aktivität“ bis 2120, aus dem Rückbau bestehender AKWs, ist 478.000 m<sup>3</sup>. 2% dieses Volumens (etwa 10.000 m<sup>3</sup>) setzen sich zusammen aus dem hochradioaktiven Abfall (1.290 m<sup>3</sup>) und dem verbrauchten Kernbrennstoff (8.150 m<sup>3</sup>) und beinhalten 92% der Aktivität. Würden wir

<sup>30</sup> die Sommerresidenz der englischen Königsfamilie

zehn weitere Reaktoren bauen (10 GW), kämen aus diesen weitere 31.900 m<sup>3</sup> an verbrauchtem Kernbrennstoff hinzu. Das ist dasselbe Volumen wie 10 Schwimmbecken.

**Wenn wir Ummengen von Energie aus nuklearer Spaltung und Fusion erhalten, würde die dann nicht zur globalen Erwärmung beitragen, weil, all die zusätzliche Energie doch früher oder später als Wärme in die Umgebung gelangt?**

Das ist eine lustige Frage. Und weil wir alles in diesem Buch sorgfältig in denselben Einheiten ausgedrückt haben, ist sie recht einfach zu beantworten. Lassen Sie mich zuerst die Schlüsselzahlen der globalen Energiebilanz aus Seite 21 rekapitulieren: Die mittlere solare Leistung, die von Atmosphäre, Land und Wasser aufgenommen wird, ist 238 W/m<sup>2</sup>; eine Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration würde effektiv die Nettoerwärmung um 4W/m<sup>2</sup> erhöhen. Diese 1,7%ige Erhöhung erachtet man als schlechte Nachricht für das Klima. Veränderungen der Sonnenleistung während des 11jährigen solaren Zyklus erreichen 0,25 W/m<sup>2</sup>. Nehmen wir nun an, in 100 Jahren oder so sei die Weltbevölkerung 10 Milliarden, und jeder lebt nach dem europäischen Lebensstandard und verbraucht täglich 125 kWh, die er von fossilen, nuklearen oder geothermischen Quellen bezieht. Die Erdoberfläche pro Person wäre bei 51.000 m<sup>2</sup>. Teilen wir nun die Leistung pro Person durch die Fläche pro Person, finden wir den zusätzlichen Beitrag der menschlichen Energie zu 0,1 W/m<sup>2</sup>. Das ist ein Vierzigstel dessen, worüber wir uns derzeit ärgern, und ein wenig kleiner als der 0,25 W/m<sup>2</sup> Effekt des Sonnenzyklus. Also ja, unter diesen Annahmen würde die menschliche Energieerzeugung gerade so als Beitrag zum globalen Klimawandel aufscheinen.

**Ich hörte, dass Kernkraftwerke nicht in ausreichender Rate erbaut werden können, um einen nutzbaren Beitrag zu leisten.**

Die Schwierigkeit, AKWs schnell zu bauen wurde übertrieben mit Hilfe einer irreführenden Vortragstechnik, die ich „das magische Spielfeld“ nenne. In dieser Technik scheinen zwei Dinge miteinander verglichen zu werden, doch die Grundlage des Vergleichs wird auf halber Strecke gewechselt. Der Umweltredakteur des Guardian schrieb in seiner Zusammenfassung eines Berichts der Oxford Research Group: „Damit Kernkraft in den nächsten zwei Generationen einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten kann, müsste die Industrie nahezu 3000 neue Reaktoren errichten – oder etwa eine jede Woche, 60 Jahre lang. Ein ziviles Ausbauprogramm dieser Größenordnung ist ein Wunschtraum und völlig undurchführbar. Die höchste Zubaurate der Geschichte ist 3,4 neue Reaktoren pro Jahr.“ 3000 klingt viel größer als 3,4, nicht wahr? In dieser Anwendung der „magischen Spielfeld“-Technik ist der Sprung nicht nur auf der Zeitskala, sondern auch noch zwischen zwei Regionen Während die erste Zahl (3000 neue Reaktoren in 60 Jahren) sich auf den ganzen Planeten bezieht, ist die zweite Zahl (3,4 neue Reaktoren pro Jahr) die maximale Zubaurate eines einzelnen Landes (Frankreich)!

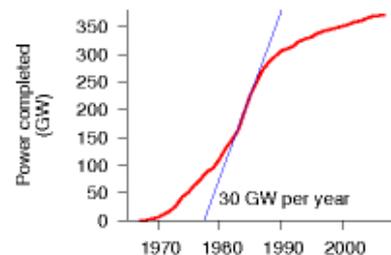


Fig.24.14: Grafik der weltweiten Gesamtleistung aus Kernenergie, die seit 1967 gebaut wurde und noch in Betrieb ist. Die Spitze der Zubaurate lag im Jahr 1984, mit 30 GW pro Jahr.

Eine ehrlichere Darstellung hätte den Vergleich auf einer planetenweiten Basis gehalten. Frankreich hat 59 der weltweit 429 laufenden AKWs, deshalb ist es plausibel, dass die weltweite maximale Zubaurate etwa zehnmal der Zubau Frankreichs ist, d.h. 34 neue Reaktoren pro Jahr. Und die erforderliche Rate (für 3000 neue Reaktoren in 60 Jahren) ist 50 pro Jahr. Also ist die Behauptung „Ein ziviles Ausbauprogramm dieser

Größenordnung ist ein Wunschtraum und völlig undurchführbar“ einfach Geschwätz. Ja, es ist eine große Zubaurate, doch liegt sie in derselben Größenordnung wie frühere Raten.

Wie vernünftig ist die Behauptung, dass die größte weltweite Zubaurate bei etwa 34 Reaktoren pro Jahr liegt? Schauen wir auf die Zahlen. Fig.24.14 zeigt die Gesamtleistung der weltweiten Nuklearflotte als Funktion der Zeit, wobei nur die 2007 noch laufenden Reaktoren berücksichtigt sind. Die Zuwachsrate war 1984 am höchsten und hatte damals einen Wert von (Trommelwirbel bitte ...) etwa 30 GW pro Jahr – ungefähr 30 1GW-Reaktoren. Voila!

## Was ist mit der Kernfusion?

*We say that we will put the sun into a box. The idea is pretty. The problem is, we don't know how to make the box.*

Sébastien Balibar, Director of Research, CNRS

Fusionsenergie ist spekulativ und experimentell. Ich denke es ist leichtsinnig, anzunehmen, dass das Fusionsproblem geknackt werden wird, doch ich möchte gerne abschätzen, wie viel Energie die Fusion liefern könnte, wenn das Problem geknackt ist.

Diese zwei Fusionsreaktionen werden als sehr vielversprechend eingestuft:

- die DT-Reaktion, die Deuterium und Tritium fusioniert und Helium erzeugt; und
- die DD-Reaktion, die Deuterium mit Deuterium fusioniert.

Deuterium, ein natürlich vorkommendes schweres Wasserstoffisotop, kann aus Meerwasser gewonnen werden; Tritium ein noch schwereres Wasserstoffisotop, kommt in der Natur nicht in größeren Mengen vor (da seine Halbwertszeit nur 12 Jahre beträgt), kann aber aus Lithium erzeugt werden.

ITER ist ein internationales Projekt zur Entwicklung eines stetig arbeitenden Fusionsreaktors. Der ITER Prototyp wird die DT-Reaktion verwenden. DT wird gegenüber DD bevorzugt, weil die DT-Reaktion mehr Energie freisetzt und weil sie „nur“ 100 Millionen °C erfordert, um abzulaufen, im Gegensatz zur DD-Reaktion, die 300 Millionen °C erfordert. (Die maximale Temperatur in der Sonne ist 15 Millionen °C).

Lassen Sie uns fantasieren und annehmen dass das ITER Projekt erfolgreich wäre. Welche nachhaltige Energie könnte die Fusion dann liefern? Kraftwerken, die die DT-Reaktion benutzen, geht der Saft aus, wenn das Lithium zu Ende geht. Vor dieser Zeit ist hoffentlich dann die zweite Installation der Fantasie Wirklichkeit geworden: Fusionsreaktoren, die nur Deuterium benötigen.

Ich werde diese beiden Energiequellen „Lithiumfusion“ und „Deuteriumfusion“ nennen nach dem primären Brennstoff um den wir uns jeweils sorgen. Schätzen wir nun ab, wie viel Energie jede dieser Quellen liefern kann.



Fig.24.15: Das Innere eines experimentellen Fusionsreaktors, der JET Vakuumbehälter. Das „Bild im Bild“ rechts zeigt das JET Plasma, aufgenommen mit einer einfachen TV-Kamera. Foto: EFDA-JET.

### Lithiumfusion

Die weltweiten Lithiumreserven in Erzlagerstätten werden auf 9,5 Millionen Tonnen abgeschätzt. Werden all diese Reserven der Fusion innerhalb von 1000 Jahren zugeführt, liefert das 10 kWh/d pro Person.

Es gibt eine weitere Quelle für Lithium: Meerwasser, wo Lithium in einer Konzentration von 0,17 ppm enthalten ist. Um Lithium mit einer Rate von 100 Millionen kg pro Jahr aus Meerwasser zu produzieren, braucht man schätzungsweise Energie von 2,5 kWh(el) pro Gramm Lithium. Wenn ein Fusionsreaktor 2.300 kWh(el) pro Gramm Lithium zurückgibt, wäre die gewonnene Energie 105 kWh/d pro Person (bei 6 Milliarden Menschen). Bei dieser Rate würde das Lithium der Ozeane über eine Million Jahre lang reichen.

### Deuteriumfusion

Wenn wir uns vorstellen, dass Wissenschaftler und Ingenieure das Problem lösen, die DD-Fusion ans Laufen zu bekommen, haben wir sehr gute Neuigkeiten. Es sind 33g Deuterium in jeder Tonne Wasser und die Energie, die aus der Fusion nur eines Gramms Deuterium gewonnen werden kann, liegt bei irrsinnigen 100.000 kWh. Erinnern wir uns, dass die Ozeane 230 Millionen Tonnen pro Person beinhalten, und folgern, dass genug Energie vorhanden ist, um jeden Menschen einer zehnfach höheren Weltbevölkerung mit 30.000 kWh pro Tag (das ist 100mal mehr als der durchschnittliche amerikanische Verbrauch) eine Million Jahre lang zu versorgen (Fig.24.17).

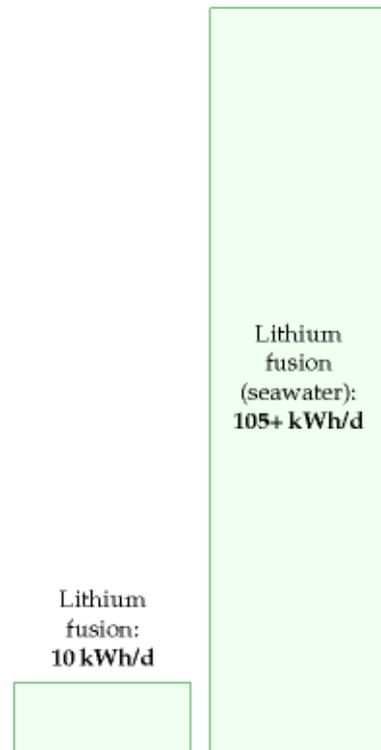


Fig.24.16: Lithium-basierte Fusion, fair und nachhaltig benutzt, könnte unseren Verbrauch decken. Lithium aus dem Bergbau würde 10 kWh/d/p für 1000 Jahre liefern, Meerwasser 105 kWh/d/p für über eine Million Jahre.

Fig.24.17: Deuterium-basierte Fusion, wenn sie realisierbar ist, eröffnet reichlich nachhaltige Energie für Millionen von Jahren. Die Skala des Diagramms ist in jeder Dimension zehnfach verkleinert, damit der Beitrag der Fusion auf die Seite passt. Zum Vergleich sind der rote und grüne Stapel aus Fig. 18.1 im selben Maßstab daneben gestellt.



## Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

- 179 Fig.24.1** Quelle: World Nuclear Association [5qntkb]. Die gesamte Kapazität arbeitender Kernreaktoren ist 372 GW(el), sie benötigen 65.000 Tonnen Uran jährlich. Die USA haben 99 GW, Frankreich 63,5 GW, Japan 47,6 GW, Russland 22 GW, Deutschland 20 GW, Südkorea 17,5 GW, Ukraine 13 GW, Kanada 12,6 GW und England 11 GW. Im Jahr 2007 erzeugten alle Reaktoren der Welt zusammen 2.608 TWh Elektrizität, das sind im Mittel 300 GW oder 1,2 kWh pro Tag pro Person.
- 181 Schnelle Brüter Reaktoren ... erhalten so etwa 60 mal mehr Energie aus dem Uran** *162Fast breeder reactors obtain 60 times as much energy from the uranium.* Quelle: [www.world-nuclear.org/info/inf98.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf98.html). Derzeit führt Japan in der Entwicklung Schneller-Brüter-Reaktoren.
- 181 Ein Once-Through 1-Gigawatt-AKW braucht 162 Tonnen Uran pro Jahr** *-A once-through one-gigawatt nuclear power station uses 162 tons per year of uranium.* Quelle: [www.world-nuclear.org/info/inf03.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf03.html). Ein 1 GW(el) Kraftwerk mit einer thermischen Effizienz von 33% bei einem Load-Faktor von 83% hat den folgenden Fußabdruck: Bergbau - 16.600 Tonnen von 1%-Uranerz; Mahlen - 191 t Uranoxid (enthält 162 t Natur-Uran); Anreicherung und Brennstabherstellung - 22,4 t Uranoxid (enthält 20 t angereichertes Uran). Die Anreicherung erfordert 115.000 SWU; siehe Seite 118 zu den Energiekosten einer SWU (separative work unit).
- 181 Uran-Ressourcen sind etwa 1000mal höher als unsere angenommenen 27 Millionen Tonnen** *163it's been estimated that the low-grade uranium resource is more than 1000 times greater than the 22 million tons we just assumed.* Deffeyes und MacGregor (1980) schätzen die Ressourcen von Uran in Konzentrationen von 30 ppm oder mehr auf  $3 \times 10^{10}$  Tonnen. (Die mittlere Erzgüte in Südafrika lag 1985 und 1990 bei 150 ppm. Phosphate liegen typischerweise bei 100 ppm im Mittel.) Das sagte die World Nuclear Association zu den Uranreserven im Juni 2008:  
"From time to time concerns are raised that the known resources might be insufficient when judged as a multiple of present rate of use. But this is the Limits to Growth fallacy, ... which takes no account of the very limited nature of the knowledge we have at any time of what is actually in the Earth's crust. Our knowledge of geology is such that we can be confident that identified resources of metal minerals are a small fraction of what is there."  
"Measured resources of uranium, the amount known to be economically recoverable from orebodies, are ... dependent on the intensity of past exploration effort, and are basically a statement about what is known rather than what is there in the Earth's crust."  
"The world's present measured resources of uranium (5.5 Mt) ... are enough to last for over 80 years. This represents a higher level of assured resources than is normal for most minerals. Further exploration and higher prices will certainly, on the basis of present geological knowledge, yield further resources as present ones are used up."  
"Economically rational players will only invest in finding these new reserves when they are most confident of gaining a return from them, which usually requires positive price messages caused by undersupply trends. If the economic system is working correctly and maximizing capital efficiency, there should never be more than a few decades of any resource commodity in reserves at any point in time."  
[Exploration has a cost; exploring for uranium, for example, has had a cost of \$1-\$1.50 per kg of uranium (\$3.4/MJ), which is 2% of the spot price of \$78/kgU; in

contrast, the finding costs of crude oil have averaged around \$6/barrel (\$1050/MJ) (12% of the spot price) over at least the past three decades.]

“Unlike the metals which have been in demand for centuries, society has barely begun to utilize uranium. There has been only one cycle of exploration-discovery-production, driven in large part by late 1970s price peaks.”

“It is premature to speak about long-term uranium scarcity when the entire nuclear industry is so young that only one cycle of resource replenishment has been required.” [www.world-nuclear.org/info/inf75.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html)

Weiterführende Literatur: Herring (2004); Price and Blaise (2002); Cohen (1983).

Die IPCC, die die OECD zitiert, schätzt, dass bei den Raten von 2004 das Uran in konventionellen Ressourcen und Phosphaten 670 Jahre für Once-Through-Reaktoren, 20.000 Jahre für schnelle Reaktoren mit Plutonium-Wiederaufbereitung und 160.000 Jahre für schnelle Reaktoren mit Wiederaufbereitung von Uran und allen Aktiniden reicht. (Sims et al., 2007).

- 183 Japanische Forscher fanden eine Methode, Uran aus Meerwasser zu extrahieren**  
165 *Japanese researchers have found a technique for extracting uranium from seawater.* Die Kostenschätzung von \$100 pro kg stammt von Seko et al. (2003) und [y3wnzr]; die Schätzung von \$300 pro kg von der OECD Nuclear Energy Agency (2006, p130). Die Uranextraktion erfolgt über Gewebe, das einige Monate in den Ozean getaucht wird; das Gewebe besteht aus Polymerfasern, die vor dem Eintauchen durch Bestrahlung aufnahmefähig gemacht werden; die aufnahmefähigen Fasern sammeln Uran mit einer Rate von 2 g Uran pro kg Fasern.
- 183 Der Aufwand für die Uranextraktion aus dem Meerwasser könnte sich verringern, wenn man die Extraktion mit einer anderen Nutzung des Meerwassers verbindet – beispielsweise der Kraftwerkskühlung** – *The expense of uranium extraction could be reduced by combining it with another use of seawater – for example, power-station cooling.* Die Idee einer nuklearbetriebenen Insel, die Wasserstoff produziert, stammt von C. Marchetti. Brüter-Reaktoren würden mit Meerwasser gekühlt und könnten aus dem Kühlwasser Uran extrahieren mit einer Rate von 600 t Uran pro 500.000 Mt Meerwasser.
- 184 Thoriumreaktoren liefern 3,6 Milliarden kWh Wärme pro Tonne Thorium**  
166 *Thorium reactors deliver 3.6×10<sup>9</sup> kWh of heat per ton of thorium.* Quelle: [www.world-nuclear.org/info/inf62.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html). Es besteht noch Potenzial für Verbesserungen in Thorium-Reaktoren, daher könnte sich diese Zahl zukünftig erhöhen.
- 185 Ein alternativer Kernreaktor für Thorium, das „Rubbiatron“** – *An alternative nuclear reactor for thorium, the “energy amplifier”...* Siehe Rubbia et al. (1995), [web.ift.uib.no/~lillestol/Energy Web/EA.html](http://web.ift.uib.no/~lillestol/Energy%20Web/EA.html), [32t5zt], [2qr3yr], [ynk54y].
- 185 Tabelle 24.7 – World thorium resources in monazite.** Quelle: US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Januar 1999. [yl7tkm] zitiert in UIC Nuclear Issues Briefing Paper #67 November 2004: “Andere Mineralerze mit höherem Thoriumgehalt, wie Thorit, wären wahrscheinlich als Quelle verwendet, wenn die Nachfrage significant erhöht würde.” In [yju4a4] fehlt der Wert für die Türkei, den man hier finden kann: [yeyr7z].
- 186 Die Atomindustrie verkaufte jedem in England 4 kWh/d seit etwa 25 Jahren**  
167 *The nuclear industry sold everyone in the UK 4 kWh/d for about 25 years.* Die erzeugte Summe bis 2006 war etwa 2200 TWh. Quelle: Stephen Salter’s Energy Review for the Scottish National Party.

- 186 Die Behörde für nukleare Stilllegungen hat ein Jahresbudget von 2 Milliarden € – *The nuclear decommissioning authority has an annual budget of £2 billion.* Tatsächlich scheint sich das Rückbau-Budget immer weiter zu erhöhen. Der aktuellste Wert für die Gesamtkosten des Rückbaus ist 73 Mrd. £.  
[news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm](http://news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm)
- 186 Die Kritik des *Chief Inspector of Nuclear Installations* war niederschmetternd  
168*The criticism of the Chief Inspector of Nuclear Installations was withering...* (Weightman, 2007).
- 187 Kernkraft ist nicht unendlich gefährlich. Sie ist einfach gefährlich –*Nuclear power is not infinitely dangerous. It's just dangerous.* Weiterführende Literatur zum Risiko: Kammen und Hassenzahl (1999).
- 187 Menschen in der Umgebung von Kohlekraftwerken sind höheren Strahlungsdosen ausgesetzt als in der Umgebung von Kernkraftwerken –*People in America living near coal-fired power stations are exposed to higher radiation doses than those living near nuclear power plants.* Quelle: McBride et al. (1978). Uran und Thorium haben in Kohle Konzentrationen von 1 ppm bzw. 2 ppm. Weiterführende Literatur: [gabe.web.psi.ch/research/ra/ra\\_res.html](http://gabe.web.psi.ch/research/ra/ra_res.html), [www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf](http://www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf).
- 188 Atom und Wind sind die besten, mit Opferraten unter 0,2 pro GWy –*Nuclear power and wind power have the lowest death rates.* Siehe auch Jones (1984). Diese Opferraten sind aus Studien, die zukünftige Entwicklungen vorhersagen. Wir können aber auch einen Blick in die Vergangenheit werfen. In England wurden mit Kernkraft 200 GWy Elektrizität erzeugt, und die Nuklearindustrie forderte ein Todesopfer, einen Arbeiter, der 1978 bei Chapelcross starb [4f2ekz]. Ein Opfer pro 200 GWy ist eine beeindruckend niedrige Opferrate im Vergleich zur Erdöl- und Erdgas-Industrie. Weltweit gesehen ist die Opferrate von Kernkraft schwer abzuschätzen. Die Kernschmelze auf Three-Mile-Island tötete niemanden, und die damit verbundenen Lecks kosteten vermutlich ein Todesopfer in der Zeit seit dem Unfall. Der Unfall in Tschernobyl tötete zunächst 62 Menschen durch direkte Verstrahlung, und 15 Menschen vor Ort starben später an Schilddrüsenkrebs; man schätzt 4000 Krebsopfer aus der näheren Umgebung und weitere 5000 Menschen weltweit (von den 7 Millionen, die dem Fallout ausgesetzt waren), die an Krebs starben, der von Tschernobyl verursacht war (Williams and Baverstock, 2006); doch diese Todesfälle sind unmöglich zu belegen, da Krebs, vielfach durch natürliche Strahlung ausgelöst, allein 25% der Todesfälle in Europa bedingt. Ein Weg, die globale Opferrate der weltweiten Kernkraft zu bestimmen, ist, diese geschätzte Tschernobyl-Todeswolke (9000 Todesfälle) durch die kumulative Energieerzeugung von 1969 bis 1996 zu dividieren, die 3685 GWy beträgt. Das ergibt eine Opferrate von 2,4 Toten pro GWy. An Todesopfern der Windkraft nennt das Caithness Windfarm Information Forum ([www.caithnesswindfarms.co.uk](http://www.caithnesswindfarms.co.uk)) 49 Todesfälle weltweit von 1970 bis 2007 (35 Arbeiter der Windindustrie und 14 zivile Opfer). 2007 führt Paul Gipe 34 Todesopfer weltweit auf [[www.wind-works.org/articles/BreathLife.html](http://www.wind-works.org/articles/BreathLife.html)]. In der Mitte der 1990er lag die mit Windkraft assoziierte Opferrate bei 3,5 Toten pro GWy. Nach Paul Gipe fiel gegen Ende des Jahres 2000 die Todesrate der Windkraft auf 1,3 Tote pro GWy. Also sind die historischen Opferraten sowohl in der Kernkraft als auch in der Windkraft höher als die vorhergesagten zukünftigen Raten.
- 188 Stahl und Beton eines 1GW AKW hat einen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von etwa 300.000 t CO<sub>2</sub> 169*The steel and concrete in a 1 GW nuclear power station have a carbon footprint of roughly 300 000 t CO<sub>2</sub>.* Ein 1 GW Kernkraftwerk enthält 520.000 m<sup>3</sup>

Beton (1,2 Millionen Tonnen) und 67.000 Tonnen Stahl [2k8y7o]. Bei angenommenen 240 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Beton [3pvf4j], liegt der Fußabdruck des Betons bei etwa 100.000 t CO<sub>2</sub>. Gemäß Blue Scope Steel [4r7zpg] liegt der Fußabdruck von Stahl bei etwa 2,5 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Stahl. Die 67.000 Tonnen Stahl haben also einen Fußabdruck von etwa 170.000 Tonnen CO<sub>2</sub>.

188 **Ist der Abfall eines Reaktors nicht ein großes Problem** 170 *Nuclear waste discussion*. Quellen: [www.world-nuclear.org/info/inf04.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf04.html), [49hcnw], [3kduo7]. Neuer Atommüll verglichen mit altem: Committee on Radioactive Waste Management (2006).

192 **Die weltweiten Lithiumreserven in Erzlagerstätten werden auf 9,5 Millionen Tonnen abgeschätzt** 172 *World lithium reserves are estimated as 9.5 million tons*. Die hauptsächlichsten Lithiumvorkommen liegen in Bolivien (56,6%), Chile (31,4%) und den USA (4,3%). [www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br)

192 **Es gibt eine weitere Quelle für Lithium: Meerwasser** – *There's another source for lithium: seawater...* Einige Extraktions-Technologien wurden untersucht (Steinberg und Dang, 1975; Tsuruta, 2005; Chitrakar et al., 2001).

192 **Wenn ein Fusionsreaktor 2.300 kWh(el) pro Gramm Lithium zurückgibt** – *Fusion power from lithium reserves*. Die Energiedichte von natürlichem Lithium ist etwa 7500 kWh pro Gramm (Ongena und Van Oost, 2006). Es gibt große Unterschiede in den Schätzungen über die Effizienz, mit der Fusionsreaktoren diese Energie in Elektrizität verwandeln können, von 310 kWh(el)/g (Eckhardt, 1995) bis 3400 kWh(el)/g natürliches Lithium (Steinberg and Dang, 1975). Ich habe 2300 kWh(el)/g angenommen, auf Basis des vielzitierten Gesamtwertes: "Ein 1 GW Fusionsreaktor benötigt etwa 100 kg Deuterium und 3 Tonnen natürliches Lithium pro Jahr und erzeugt damit etwa 7 Milliarden kWh." [69vt8r], [6oby22], [63l2lp].

Weiterführende Literatur über Spaltung: Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000). Uranium Information Center – [www.uic.com.au](http://www.uic.com.au). [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org), [wnchw]. Über Kosten: Zaleski (2005). Über Atommüll-Lager: [shrln]. Über Brutreaktoren und Thorium: [www.energyfromthorium.com](http://www.energyfromthorium.com).

Weiterführende Literatur über Fusion: [www.fusion.org.uk](http://www.fusion.org.uk), [www.askmar.com/Fusion.html](http://www.askmar.com/Fusion.html).