

## 24. Kernkraft?

*Wir machen den Fehler, Nuklearenergie mit Nuklearwaffen in Verbindung zu bringen, so als wäre alle Nukleartechnik übel. Das ist genau so falsch, als wenn man Nuklearmedizin mit Nuklearwaffen in Verbindung brächte.*

Patrick Moore, Ehemaliger Direktor von Greenpeace International

*Sollen wir tatsächlich 17 Atomkraftwerke versenken mit all den Werten, die da gebunden sind? Und sollen wir das technische Knowhow, das wir haben, aufgeben? Gut, diese Entscheidungen sind getroffen worden von der deutschen Politik. Ich halte sie für falsch.*

Hans-Werner Sinn, Vorsitzender des ifo Instituts für Wirtschaftsforschung

◦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 Durchschnittsbürger verbraucht, liegt bei etwa 16 kg pro Tag (4 kg Kohle, 4 kg Öl und 8 kg Gas). Das bedeutet, dass jeden Tag nur Ihre Wege 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 Durchschnittsbürgers 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!

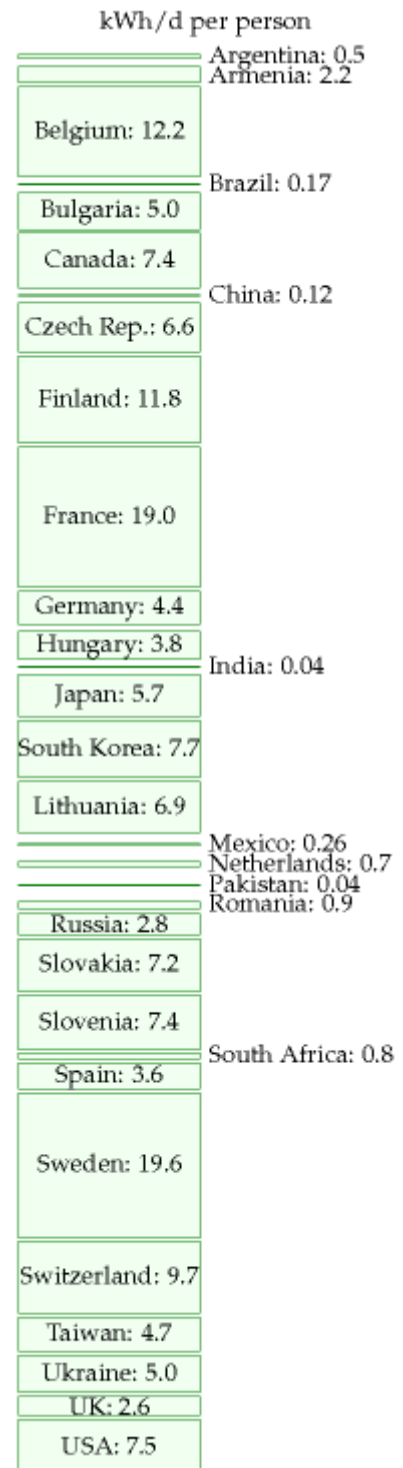


Fig.24.1: Elektrizität aus Kernspaltung in 2007 pro Kopf, in kWh pro Tag pro Person, in jedem Land mit Atomkraftwerken.

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.

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>17</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 Uranpotential 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.

---

<sup>17</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.

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 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, der planmäßig erwartete Energiebedarf sollte der planmäßig bereitgestellten Energie entsprechen.“

### ***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.

## 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.

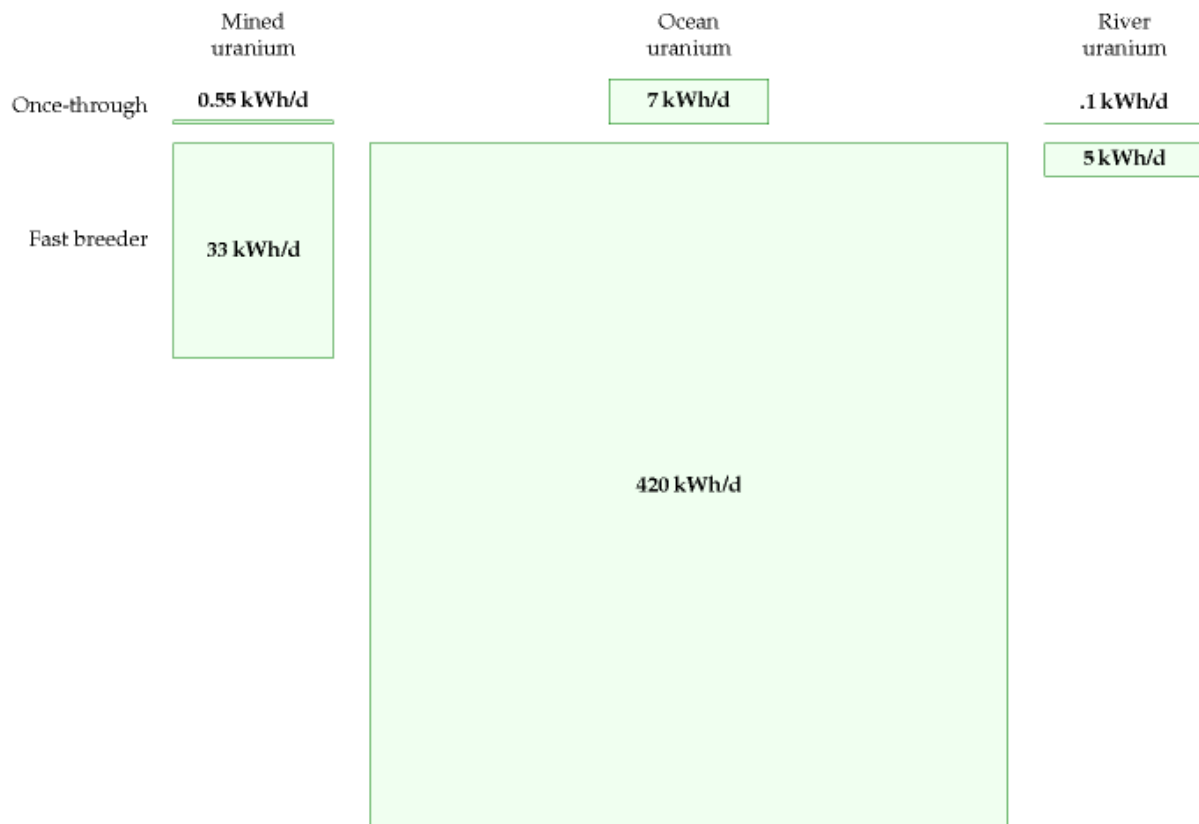


Fig.24.6: "Nachhaltige" Energie aus Uran. Zum Vergleich: die weltweite Atomenergieproduktion ist heute bei 1,2 kWh/d pro Person. Die Britische Atomenergieproduktion liegt bei 4 kWh/d pro Person, Tendenz fallend.

## 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-Kernkraftwerk 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.

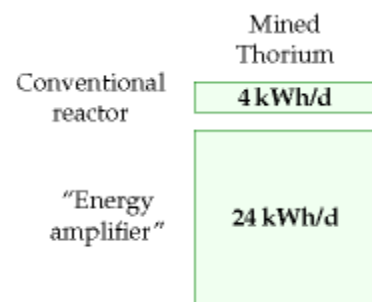
## Thorium

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)
Türkei	380
Australien	300
Indien	290
Norwegen	170
USA	160
Kanada	100
Südafrika	35
Brasilien	16
Andere Länder	95
<b>Welt insgesamt</b>	<b>1 580</b>

Tabelle 24.7: (links) Bekannte weltweite Thorium-Ressourcen in Monazit (ökonomisch abbau-bar)

Fig.24.8: (rechts) Thorium-Optionen



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“, das vom Nobelpreisträger Carlo Rubbia und seinen Kollegen vorgestellt wurde, könnte nach deren Schätzung 6 Millionen Tonnen Thorium in 15.000 TWy 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.



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

## Flächenverbrauch

Stellen wir uns vor, Europa beschließt ernst zu machen mit dem Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen und baut viele neue Kernkraftwerke – um den deutschen Atomausstieg nicht zu verletzen, könnte man dabei die Fläche Deutschlands ja aussparen und die AKWs in den Nachbarländern positionieren. °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 Europa 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 700 GW

(ungefähr 12x die AKW-Leistung von Frankreich), die durch 700 AKWs geliefert werden, wobei jedes davon einen Quadratkilometer Fläche beansprucht. Das sind etwa 0,01% der Fläche (ohne Deutschland). Windfarmen, die dieselbe Leistung erzeugen, würde etwa 500mal mehr Fläche verbrauchen.

## Die Ökonomie des Rückbaus

Was kostet es, ein AKW rückzubauen? Die britische Behörde für nukleare Stilllegungen hat ein Jahresbudget von 2 Milliarden € für die nächsten 25 Jahre. Die Atomindustrie verkaufte jedem Briten 4 kWh/d seit etwa 25 Jahren, also sind die Kosten der Stilllegungsbehörde 2,3 Cent/kWh<sup>18</sup>. Das ist eine beträchtliche Subvention – doch bei weitem nicht, das muss man sagen, so beträchtlich wie die Subvention für Offshore-Wind (7 Cent/kWh).

## Sicherheit

Die Sicherheit von Kernkraftwerken bleibt 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 hatte Gürtel und Hosenträger. Unabhängig von den nicht funktionierenden Sicherheitsalarmen hätte man bei 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

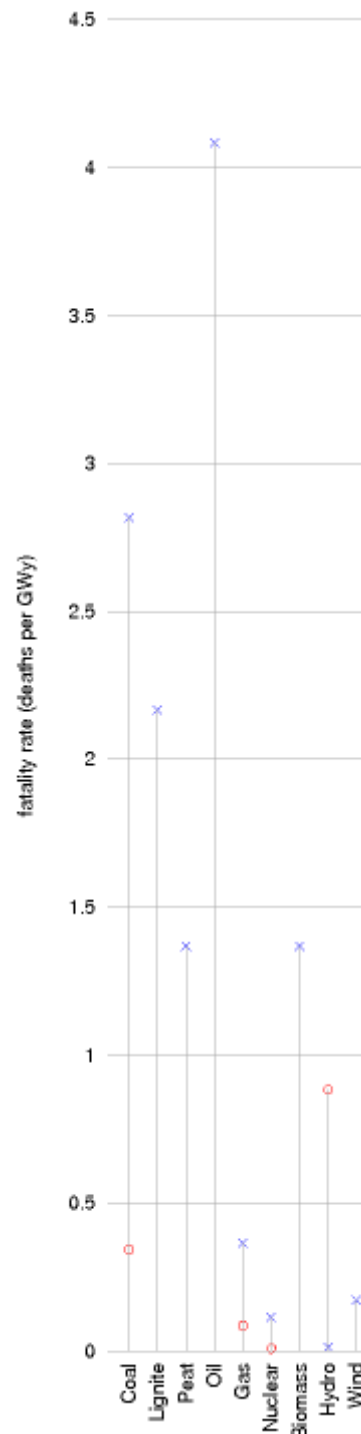


Fig.24.11: Opferraten der Elektrizitätserzeugung nach Technologien. X: Schätzungen der Europäischen Union durch das ExternE Projekt, O: Paul-Scherrer-Institut.

<sup>18</sup> Die britische 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).



diese Privatfirma ein Profitmotiv, hey? Die Kritik des *Chief Inspector of Nuclear Installations* war niederschmetternd: „Die Anlage wurde in einer Kultur des Wegsehens 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. Der deutsche Elektrizitätsbedarf ist um die 60 GW oder, wenn Sie so wollen, 60 GWy pro Jahr. Erhalten wir also unsere Elektrizität von einer Quelle mit 1 Toten pro GWy, würde das bedeuten, dass das britische Elektrizitätsversorgungssystem 60 Leute pro Jahr tötet. Zum Vergleich: 4000 Menschen sterben jährlich auf deutschen 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 Deutschland 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



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

Opferrate im Kohlebergbau, pro Tonne geförderte Kohle, ungefähr 50mal höher als in 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.

### ***Eine emotionale Sicherheitsbewertung***

♦Kernenergie ist statistisch gesehen also nicht risikoreicher als andere Energiequellen, doch das Risiko ist anders geartet. Diese Andersartigkeit des Risikos bedeutet auch eine eingeschränkte „subjektive Vergleichbarkeit“.

Das Risiko – mathematisch gesehen der Erwartungswert einer statistischen Variablen – ist abhängig von der Wahrscheinlichkeit  $W$  eines Schadensereignisses und dem (erwarteten) Umfang des Schadens  $U$ , z.B. in Anzahl der Todesopfer:

$$\text{Risiko} = W \cdot U .$$

In allen Bereichen – egal ob im Verkehr, bei der Arbeit, oder auch im Energiesektor – gilt: Um ein Unfall-Risiko zu bewerten, müssen wir uns über die Wahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses und über dessen (mittleren) erwarteten Umfang eine Vorstellung bilden. Über den Umfang eines Unfalls informiert uns die Tagespresse in jeder denkbaren Schattierung, eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Unfallereignisses ist schon schwieriger zu gewinnen.



Ein Beispiel:

Im Jahr 2010 verunglückten 829 Personen tödlich bei 49 Flugzeugunfällen weltweit. Im gleichen Zeitraum verunglückten allein in Deutschland bei 2,4 Millionen Autounfällen 375.000 Personen auf den Straßen, 3600 davon tödlich.

Die Daten für Flug- und Autounfälle sind nicht exakt vergleichbar, trotzdem scheint es angemessen, bei dieser Faktenlage Fliegen in puncto Sicherheit dem Autoverkehr vorzuziehen. Diese Meinung kommt nicht von der Schwere der Unfälle – in der Tat sind Flugzeugabstürze regelmäßig verheerender als selbst die schlimmsten Massenkarambolagen auf deutschen Straßen – sondern von der extremen Kleinheit der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens.

Dennoch gibt es viele Menschen, die kategorisch das Fliegen wegen seiner Gefährlichkeit ablehnen, jedoch bedenkenlos in einen PKW steigen. Woran liegt das? Zum einen könnte es eine Rolle spielen, dass Fliegen vielen Menschen als unnatürlichere Fortbewegungsart vorkommen mag als das Fahren, weil das Fahren der natürlichen Bewegungsmöglichkeit des Menschen näher zu liegen scheint als Fliegen. Ein weiterer Punkt ist die „subjektive Überschätzung sehr geringer Wahrscheinlichkeiten“: Sollen wir zwei Risiken zueinander in Relation setzen, so vergleichen wir zunächst den befürchteten Schadensumfang,  $U$ . Das  $U$  einer Flugzeugkatastrophe ist natürlich um ein Vielfaches höher als das  $U$  eines Verkehrsunfalls. Nun vergleichen wir die beiden Wahrscheinlichkeiten,  $W$ . Die Wahrscheinlichkeit eines schweren Autounfalls ist schon recht klein, aber größer als

null. Die Wahrscheinlichkeit eines Flugzeugunglückes ist auch „recht klein aber größer als null“. Vermutlich ist sie wohl noch kleiner als die eines Autounfalls, aber kann das das „riesige“ Übergewicht einer Flugzeugkatastrophe gegenüber einem Autounfall aufwiegen? Obige Zahlen beantworten uns diese Frage mit „Ja, bei weitem“, doch gewisse Zweifel bleiben, es ist ein Kalkulationsergebnis, das der gefühlten Wirklichkeit zu widersprechen scheint. Ein quantitatives Differenzieren so kleiner Wahrscheinlichkeiten ist uns – jedenfalls ohne Mathematik – nicht mehr möglich. Was ist wahrscheinlicher, sechs Richtige im Lotto zu tippen, oder vom Blitz erschlagen zu werden?

Also, worauf soll man nun vertrauen, Intuition oder Statistik? „Der Statistik natürlich“, sagen Sie? „Zahlen lügen nicht, doch unsere Gefühle führen uns oft genug in die Irre“ - wirklich?

In der mathematischen Statistik gilt das Gesetz der großen Zahlen. Es sagt aus, dass das Ergebnis eines vom Zufall beeinflussten Prozesses dann dem statistischen Erwartungswert entspricht, wenn der Prozess oft genug immer wieder (unabhängig) abläuft: Die statistische Wahrscheinlichkeit mit einem sechsseitigen Würfel eine Sechs zu werfen, sei  $1/6$ . Werfen wir 6 Millionen mal einen solchen Würfel, werden wir ziemlich genau eine Million mal die Sechs würfeln. Ob wir bei einmal Würfeln hier und jetzt eine Sechs schaffen werden, das kann die Statistik genauso gut oder schlecht vorhersagen wie Astrologie oder Tarotkarten. Die statistische Wahrscheinlichkeit für einen Flugzeugabsturz ist 0,000012% oder  $1:8.300.000$ . Untersucht man 8300 Milliarden Flüge, wird man ziemlich genau eine Million Abstürze registrieren. Sind wir nur am absturzfremen Ablauf *eines* Fluges interessiert, nämlich etwa an dem des Jets, in den wir gerade einsteigen, ist die Prognose, die uns die mathematische Statistik vermittelt, beliebig unpräzise.

Kommen wir zurück auf unsere ursprüngliche Fragestellung, die Risikobewertung der Kernenergie. Wie sieht hier das Gesetz der großen Zahlen aus? Nehmen wir an, das Risiko eines GAUs läge bei 1 pro 1000 Reaktor-Betriebsjahren. Würden wir dann 1 Milliarde Reaktoren ein Jahr lang beobachten (oder 10 Millionen Reaktoren hundert Jahre lang), könnten wir wohl ziemlich genau 1 Million GAUs registrieren. Beobachten wir nur ein paar Reaktoren ein paar Jahre lang ... was erwarten wir? Ist schon *ein* GAU in *einem* Reaktor inakzeptabel? Die Wahrscheinlichkeit dafür ist jedenfalls „sehr klein, aber größer als null“. Das ist auch die offizielle Begründung für den deutschen Atomausstieg. Hörten wir nicht schon Stimmen, die genau das Gleiche schon seit vielen Jahren sagten?

Ich möchte diesen Exkurs in die emotionale Sicherheitsbewertung hier beenden und abschließend festhalten, dass es wohl eine gute Idee ist, nach nicht-fossilen und gleichzeitig nicht-nuklearen Lösungen des Energieproblems zu suchen, und eine beides umfassende Strategie zu entwickeln. Für den Fall, dass uns das nicht gelingen sollte, liefert dieses Kapitel die Zahlen und Fakten für den Beitrag, den die Kernenergie zur Lösung des Energieproblems leisten kann.

## 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.

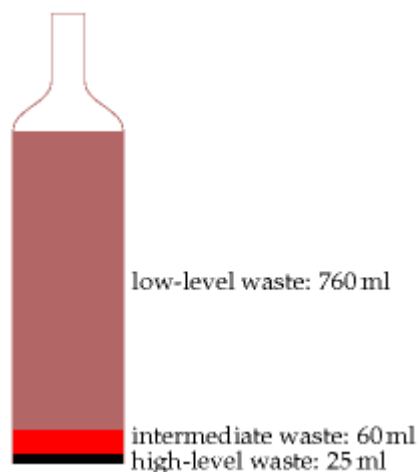


Fig.24.13: Britischer Atom-müll, pro Person, pro Jahr, hat ein Volumen von etwas mehr als einer Weinflasche voll.

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, der Sommerresidenz der englischen Königsfamilie, 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 Atommüll mit dem Atommüll 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 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 Unmengen 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 einen 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)!

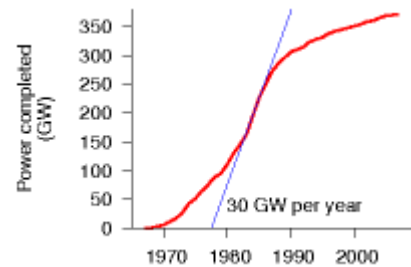


Fig.24.14: Grafik der weltweiten Gesamtleistung aus Kernenergie, die seit 1967 gebaut wurde und noch in Betrieb ist. Die Spitze der Zubaurate lag im Jahr 1984, mit 30 GW pro Jahr.

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?

*Wir sagen, wir wollen die Sonne  
in eine Box packen. Die Idee ist toll.  
Das Problem ist, wir wissen nicht,  
wie wir die Box bauen sollen.*

Sébastien Balibar, Forschungsdirektor des 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.

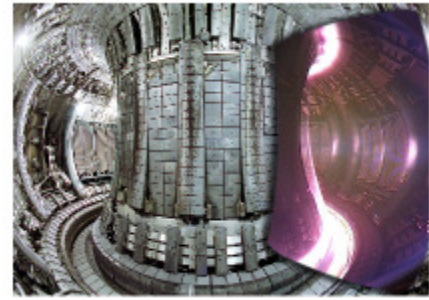


Fig.24.15: Das Innere eines experimentellen Fusionsreaktors, der JET Vakuumbehälter. Das „Bild im Bild“ rechts zeigt das JET Plasma, aufgenommen mit einer einfachen TV-Kamera. Foto: EFDA-JET.

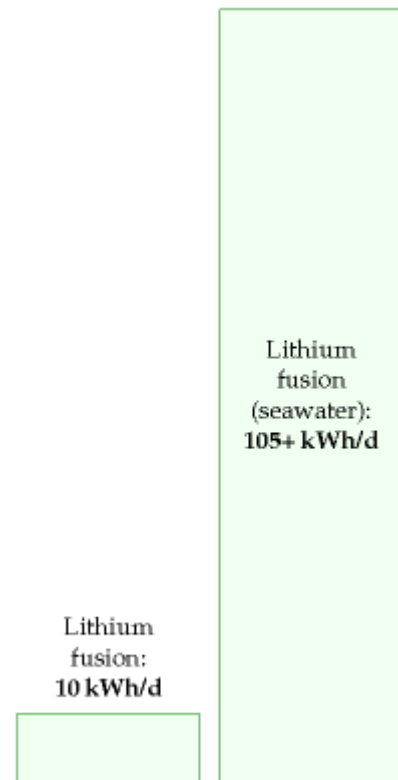


Fig.24.16: Lithium-basierte Fusion, fair und nachhaltig benutzt, könnte unseren Verbrauch decken. Lithium aus dem Bergbau würde 10 kWh/d/p für 1000 Jahre liefern, Meerwasser 105 kWh/d/p für über eine Million Jahre.

## Lithiumfusion

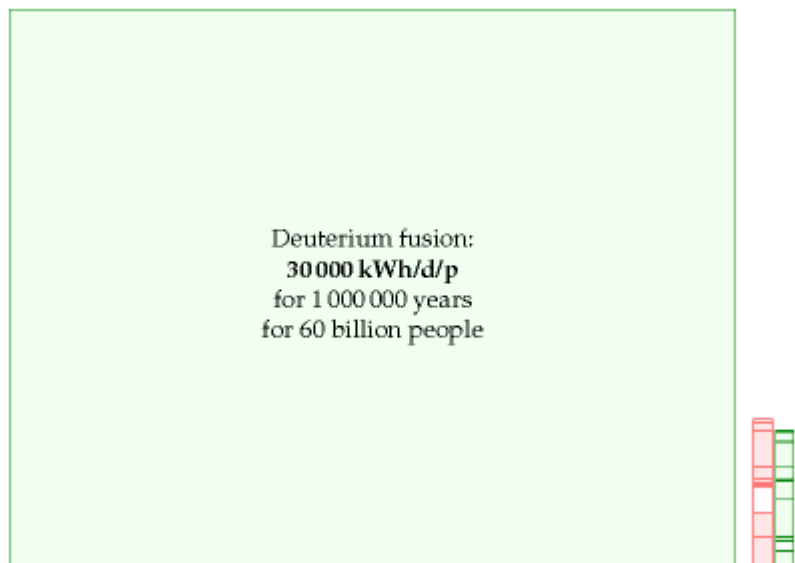
Die weltweiten Lithiumreserven in Erzlagerstätten werden auf 9,5 Millionen Tonnen abgeschätzt. Werden all diese Reserven der Fusion innerhalb von 1000 Jahren zugeführt, liefert das 10 kWh/d pro Person.

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(e) pro Gramm Lithium. Wenn ein Fusionsreaktor 2.300 kWh(e) 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. Wir erinnern 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.24.17: 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 (UK) 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**  
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.** 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**  
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:

„Manchmal werden Bedenken laut, die bekannten Ressourcen könnten unzureichend sein, wenn man die derzeitige Förderrate hochskaliert. Doch ist das der „Limits to Growth“-Trugschluss, ... der die Beschränktheit unsere Wissens außer Acht lässt - Beschränktheit unseres Wissens zu einer gegebenen Zeit darüber, was tatsächlich in der Erdkruste vorhanden ist. Unsere Kenntnis der Geologie ist so geartet, dass wir sicher sein müssen, dass unsere identifizierten Ressourcen metallischer Mineralien nur ein kleiner Bruchteil dessen sind, was tatsächlich vorhanden ist.“

“Die gemessenen Ressourcen an Uran, der bekannte Umfang dessen, was ökonomisch aus dem Erz gewonnen werden kann, ... ist abhängig vom vorangegangenen Erkundungsaufwand, und im Grunde eher eine Aussage über unseren Kenntnisstand als über das, was in der Erdkruste liegt.“

“Die derzeit weltweit gemessenen Uranressourcen (5,5 Mt) ... sind ausreichend für über 80 Jahre. Dies ist ein höherer Level gesicherter Ressourcen als für die meisten Mineralien normal ist. Weitere Erkundung und höhere Preise werden nach aktuellem geologischen Wissen sicherlich über die gegenwärtig genutzten hinaus zu weiteren abbaubaren Ressourcen führen.“

“Wirtschaftlich denkende Akteure werden nur dann Geld in das Auffinden dieser neuen Reserven investieren, wenn sie sehr sicher sind, daraus Gewinne erwirtschaften zu können, was üblicherweise steigende Preisprognosen auf Grund von drohender Unterversorgung erfordert. Wenn die Marktwirtschaft funktioniert und sie die Kapital-Effizienz maximiert, dann sollte zu keiner Zeit und für keine Ressource mehr als ein paar Jahrzehnte im Voraus Reservensicherheit bestehen.“

[Erkundung hat Kosten, Erkundung von Uran beispielsweise kostet \$1–\$1.50 pro kg Uran (\$3,4/MJ), das sind 2% des Spotmarkt-Preises von \$78/kgU; dagegen

liegen die mittleren Auffindungskosten für Rohöl bei \$6/Barrel (\$1050/MJ) (12% des Spotmarkt-Preises) im Mittel über (mindestens) die letzten drei Jahrzehnte.]

“Im Gegensatz zu Metallen, die schon seit Jahrhunderten in Gebrauch sind, hat die Gesellschaft gerade erst begonnen, Uran zu nutzen. Es gab erst einen Zyklus von Erkundung – Entdeckung – Produktion, weitgehend getragen von den Preisspitzen der späten 1970er.”

“Es ist verfrüht, von langfristiger Uranknappheit zu reden, solange die gesamte Uranindustrie noch so jung ist, dass nur ein Zyklus des Ressourcen-Auffüllens erforderlich war.” [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** 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.
- 184 **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** 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.
- 185 **Thoriumreaktoren liefern 3,6 Milliarden kWh Wärme pro Tonne Thorium.** Quelle: [www.world-nuclear.org/info/inf62.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html). Es besteht noch Potential für Verbesserungen in Thorium-Reaktoren, daher könnte sich diese Zahl zukünftig erhöhen.
- 185 **Ein alternativer Kernreaktor für Thorium, das „Rubbiatron“** in der englischsprachigen Literatur auch als „energy amplifier“ bezeichnet. Für Details siehe Rubbia et al. (1995), [http://web.ift.uib.no/~lillestol/Energy\\_Web/EA.html](http://web.ift.uib.no/~lillestol/Energy_Web/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 Minerallerze mit höherem Thoriumgehalt, wie Thorit, wären wahrscheinlich als Quelle verwendet, wenn die Nachfrage signifikant 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** 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 € –** Tatsächlich scheint sich das Rückbau-Budget immer weiter zu erhöhen. Der aktuellste Wert für die Gesamtkosten des Rückbaus ist 73 Mrd. £. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm>

- 187 Die Kritik des *Chief Inspector of Nuclear Installations* war niederschmetternd Siehe (Weightman, 2007).
- 187 Kernkraft ist nicht unendlich gefährlich. Sie ist einfach gefährlich 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 Quelle: McBride et al. (1978). Uran und Thorium haben in Kohle Konzentrationen von 1 ppm bzw. 2 ppm. Weiterführende Literatur: [http://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](http://www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf).
- 188 Atom und Wind sind die besten, mit Opferraten unter 0,2 pro GWy 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.
- 189 Risiko =  $W * U$  ♦ Der mathematische Erwartungswert  $R$  ist allgemein gegeben durch die Summe aus allen verschiedenen möglichen Ergebnissen  $U_1, U_2, \dots, U_n$ , jeweils gewichtet mit ihren zugeordneten Wahrscheinlichkeiten  $W_1, W_2, \dots, W_n$ :
- $$R = U_1 W_1 + U_2 W_2 + \dots + U_n W_n = \sum_{i=1}^n U_i W_i$$
- Für ein Unfallrisiko vereinfachen wir das zu  $U_1=U$  (es passiert ein Unfall) und  $U_2=0$  (es passiert nichts). Es ist dann  $n=2$ ,  $W_1=W$  und  $W_2=1-W$ .
- 188 Im Jahr 2010 verunglückten 829 Personen Quellen: [4nvxqa2], Statistisches Bundesamt [63whveg]. Die statistische Wahrscheinlichkeit für einen Flugzeugabsturz ist 0,000012% vgl. [lxj7a6].

- 189 Was ist wahrscheinlicher, sechs Richtige im Lotto zu tippen, oder vom Blitz erschlagen zu werden? In Deutschland verzeichnet die Statistik ca. 3 Blitztote pro Jahr [5th8mrb]. 6 Richtige kommen im Mittel etwa dreimal pro Woche vor (Mittwochs- und Samstagslotto), der Lottogewinn wäre also etwa 50mal wahrscheinlicher, selbst wenn sich alle Deutschen an der Ziehung (gleichmäßig) beteiligen.
- 190 Stahl und Beton eines 1GW AKW hat einen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von etwa 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>.
- 190 Ist der Abfall eines Reaktors nicht ein großes Problem *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).
- 194 Die weltweiten Lithiumreserven in Erzlagerstätten werden auf 9,5 Millionen Tonnen abgeschätzt Die hauptsächlichen Lithiumvorkommen liegen in Bolivien (56,6%), Chile (31,4%) und den USA (4,3%). [www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br)
- 194 Es gibt eine weitere Quelle für Lithium: Meerwasser Einige Extraktions-Technologien wurden untersucht (Steinberg und Dang, 1975; Tsuruta, 2005; Chitrakar et al., 2001).
- 194 Wenn ein Fusionsreaktor 2.300 kWh(el) pro Gramm Lithium zurückgibt 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).