

Dr. Helmut Böttiger

Ehrlich streiten
über Kernenergie

I Mehr als eine technische Frage

Ehrlich streiten über Kernenergie

Ehrlich streiten
über
Kernenergie

von
Helmut Böttiger

Petersberg 2011

I Mehr als eine technische Frage
redaktionell bearbeitet von Jochen Michels, Dipl.-Ing.

Das Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne Zustimmung des Autors und des Verlags unzulässig.

Das gilt ebenso für Vervielfältigungen, Übersetzungen, die Einspeicherung und Verarbeitung in optischen und/oder elektronischen Systemen.

1. Auflage 2011 ISBN xxx-x-xxxxxx-xx-x

© Copyright 2011 H. Böttiger

Alle Rechte vorbehalten 2011

Teil 1: Kernenergie ist nicht unumstritten

Immer wieder verlangt man Bekenntnisse in der einen oder anderen Richtung. Wir versuchen das Thema ganz von vorn und möglichst grundsätzlich anzugehen.

I Mehr als eine technische Frage

II. Die große Strompreisfrage

III. Fortschritt braucht Redlichkeit

In sehr alten Schöpfungsmythen kommt immer wieder die gleiche Geschichte vielfältig abgewandelt vor. Der Schöpfer läßt den Menschen vor sich treten und streckt ihm in der rechten Hand einen Stein, in der linken eine Frucht entgegen. Immer wählt der Mensch im Mythos die Frucht - und damit das Leben und den physischen Tod. Mit dem Stein hätte er Sterilität und körperliche Unsterblichkeit gewählt. Die Episode spiegelt ein Stück Grundweisheit der Menschheit wider. Denn noch immer steht jeder nachdenkliche Mensch in bewußten Momenten seines Lebens vor dieser Entscheidung, nur im Routineablauf des Tages denken wir nicht daran. Jeder möchte leben, etwas erleben, scheut aber die Gefahr; er will ein Ziel unbedingt erreichen, aber wenn er es erreicht hat, soll es weiter gehen; oder aber er sucht Sicherheit und Geborgenheit und erstickt dabei in Langeweile. Was hat diese Geschichte mit der Kernenergie zu tun? Sehr viel, wie wir am Ende dieser Ausführungen hoffentlich verstehen werden.

Kernenergie war ein heiß diskutiertes Thema. Die Bundesbürger wollen inzwischen mehrheitlich aussteigen. Trotzdem will sich kaum einer damit abfinden. Nicht einmal die Rot-Grünen scheinen über den unverhofften Sieg froh zu sein. Wird das Thema Kernenergie angesprochen, kommt sogleich vehemente Ablehnung oder gereizte Gleichgültigkeit, manchmal sogar stille Wehmut auf. Wir halten die Frage der Kernenergie für eine der grundsätzlichen Fragen, von deren Beantwortung letztendlich die Zukunft und die Zukunftswilligkeit der Menschheit abhängen.

Wenn man Grundsätzliches in Banales einwickelt und dieses dann „hin-terhältig“ erörtern läßt, kommt außer Geschrei oder Achselzucken meist

I. Mehr als eine technische Frage

nichts heraus. Ob mit Absicht oder aus Leichtfertigkeit, jedenfalls verlief bisher die gesamte öffentliche Diskussion um die Kernenergie in dieser verwickelten Form. Das Deutsche Atomforum wollte die Diskussion um die Kernenergie „versachlichen“, hat Millionen für „Aufklärungsschriften“ ausgegeben und einige Fachleute damit bemüht, mit dem Ergebnis, daß sich die Deutschen schließlich mehrheitlich gegen die Kernenergie und für den Ausstieg ausgesprochen haben. Das Atomforum fürchtete die „Unsachlichkeit“, täuschte sich aber darin, was bei der Diskussion um die Kernenergie wirklich „Sache“ ist.

Natürlich bringen irrationale, hysterische Debatten niemanden weiter. Und wenn man ehrlich streiten will, sollte man wissen, worum es eigentlich geht, was Sache ist. Daher wollen wir - bevor wir auf die Kernenergie als solche zu sprechen kommen und warum wir sie trotz der damit verbundenen möglichen Gefahren für einen entscheidenden Schritt der Menschheit nach vorne halten - zunächst über die Hintergründe der Kernenergie-debatte nachdenken.

I. Mehr als eine technische Frage

Wenn über Kernenergie im Unterschied zu anderen Energiequellen diskutiert wird, hört sich das meist an, als wäre es eine technische Frage wie die, ob man zum Besuch der Verwandtschaft lieber das Auto oder die Eisenbahn nehmen solle. Wenn man wirklich unentschlossen ist und nicht weiß, was vernünftiger ist, wägt man zwischen den Vor- und Nachteilen ab und trifft so schließlich eine Entscheidung. Aber selbst über die banale Frage: Auto oder Eisenbahn kann es, wenn mehrere an der Entscheidung beteiligt sind, zu erregten Debatten kommen - und zwar dann, wenn die Diskutanten sich ihre heimlichen Vorlieben und Abneigungen nicht eingestehen. Sie schieben dann allerlei Gründe vor, als wären sie die ausschlaggebend zwingenden, um scheinbar vernünftig das zu tun, was sie eigentlich aus vernunftferner Vorliebe, also eines Vorurteils wegen, tun wollen. Wir kennen solche Scheindebatten nur allzugut. Man beißt sich fest, die Emotionen schlagen hoch, jede Seite findet, die andere müsse doch endlich ihren „Fehler“ einsehen, was diese jedoch nicht tut.

Kommt die uneingestandene Voreinstellung nicht zur Sprache, bleibt die Vernunft auf der Strecke und die Diskussion endet in Schreierei oder

Ehrlich streiten über Kernenergie

kopfschüttelndem Ärger - es sei denn, jemand sorgt endlich mit einem Witz für befreiendes Gelächter. Dann wundert man sich gemeinsam, wie man sich über eine so banale Sache so heißreden konnte, und wendet sich wichtigeren Dingen zu. Die Sache selbst erscheint nur noch als banal; das, worum es eigentlich gegangen war, bleibt verborgen. Offensichtlich war etwas eingewickelt, das so zu Herzen geht, daß es die Emotionen anfeuerte. Und dies ist es, was beide Seiten - bewußt oder unbewußt - hindert, sich und anderen das heimliche Vorurteil einzugestehen.

Was aber wäre so hintergründig an der Kernenergie?

Was hintergründig ist, wird nicht leicht wahrgenommen. Wenn man sich etwas nicht erklären kann, dies aber will, wird oft geraten und unterstellt. Kernkraftbefürworter werden schnell mit dem Spruch abgetan: Die werden doch von der „Atomlobby“ bezahlt. Den Kernkraftgegnern wird meist Irrationalität vorgeworfen und dafür religiöse, ideologische, archetypische Ursachen angeführt. Selten werden ihre oft ebenso vorhandenen materiellen Interessen offen angesprochen.

II. Die große Strompreisfrage

Die Gegner-Seite argumentiert also: Die „Atomlobby“ will viel und günstig Strom verkaufen. Günstig hieße: zu niedrigen Gestehungskosten und hohen Preisen. Wenn das mit „Atomstrom“ möglich ist, wird sie dafür Marketing machen. Eine Form des Marketing könnte sein, Befürworter anzuwerben. Das Deutsche Atomforum ist eine teure, offizielle Lobby der Stromversorgungswirtschaft. Warum sollte es daneben nicht auch eine verdeckte, inoffizielle geben? Auszuschließen ist das nicht.

Tatsächlich kommt es rein marktwirtschaftlich denkenden, privatisierten Stromlieferanten ausschließlich auf den Unterschied zwischen Gestehungskosten und Preis an. Wenn nur der Unterschied groß genug ist, kommt es auf die Höhe der Herstellungskosten, solange sie für alle Anbieter gleich hoch sind, nicht so sehr an.

Und hier kommen die Kernkraftgegner ins Spiel. Das herrschende Wirtschaftsdogma lehrt einen zwingenden Zusammenhang zwischen Angebot

III. Fortschritt braucht Redlichkeit

und Nachfrage, so daß gelten soll: verknappt man das Angebot, steigen die Preise. Der Erzeuger kann zwar weniger absetzen, bekommt aber seinen verringerten Aufwand deutlich besser bezahlt. Als zusätzlichen Vorteil kann er anstehende Ersatz- und Neuinvestitionen einsparen.

Besonders der letztgenannte Effekt wird über steigende Energiekosten in alle gewerblichen Bereiche ausgefächert. Energiekosten fallen auf allen Stufen der Güterproduktion an, und sie addieren sich aus allen Vorprodukten, Werkzeugen, den Transporten usw. auf. Hohe Energiekosten verteuern die Herstellung von Gütern unverhältnismäßig stark, werfen weniger produktive Firmen aus dem Markt, machen weniger Neuinvestitionen nötig und senken drastisch das Güterangebot mit der Folge höherer Preise. Die vorhandene zahlungsfähige Nachfrage muß sich mit weniger Gegenleistungen zufrieden geben.

Was also könnte den Stromverkäufern willkommener sein als ein Chor von Menschen, die höhere Energiekosten zur Drosselung der Energiebereitstellung fordern? Was könnte ihr in diesem Zusammenhang mehr in den Kram passen als die Propaganda von Energieerzeugungstechniken, die aus sich heraus hohe Energiepreise rechtfertigen und von deren Konkurrenz daher keine ernsthafte Gefahr ausgeht. Es ist also auch nicht auszuschließen, daß Kernkraftgegner, wenn sie den Befürwortern vorwerfen, von der „Industrie“ bezahlt zu werden, von sich auf andere schließen. Sie fördern das Finanziers-Interesse an knapper Energie und damit hohen Preisen. Daß der vereinigte Chor der Medien so beharrlich auf Seiten der Kernkraftgegner erklingt, unterstreicht diese These.

III. Fortschritt braucht Redlichkeit

Hingegen werfen auch die Kernkraftgegner den Befürwortern irrationale ideologische Vorstellungen vor, wenn sie von Fortschritts- und Technikgläubigkeit reden. Die Befürworter seien deshalb Gläubige, weil sie dabei den Preis des Fortschritts außer acht lassen. Und habe der Fortschritt im letzten Jahrhundert nicht gezeigt, wie verhängnisvoll er sei, mit wieviel menschlichem Unglück er erkaufte werden mußte?

Ehrlich streiten über Kernenergie

Gerät die Diskussion an diesen Punkt, läßt sie sich kaum weiterführen. Offensichtlich ist beides richtig: Der technische, vor allem der energie-technische Fortschritt hat dem Menschen kaum zu ermessenden Segen gebracht, aber er brachte in seiner Begleitung nicht zu bestreitendes menschliches Unglück mit sich und einen nicht zu übersehenden kulturellen und moralischen Verfall. Doch lag dieses Unglück wirklich am technischen Fortschritt und nicht vielmehr an den Methoden und Formen seiner An- und Zueignung? Sogenannte Umweltschützer stellen einen kausalen Zusammenhang zwischen den materiellen Segnungen und dem wachsenden Unglück her und wollen nicht sehen, daß zwischen beidem viel schlechte Politik (Finanz-, Macht-, Kultur-Politik usw.) für zweifelhafte Interessen wirkt. Das berührt ein Gebiet, aus dem sich normale Kernkraftbefürworter wie ihre Gegner heraushalten wollen.

Wenn sich also in diesen Fragen der „sachliche“ Zusammenhang nicht leicht entdecken läßt, könnte ein Blick auf die existentielle Wahrhaftigkeit weiterhelfen, das heißt die Frage, welche praktischen Konsequenzen der einzelne für sich und seine Lebensweise aus der bezogenen Position zieht. Auf wieviel Segnungen des technischen Fortschritts verzichtet der Kernkraftkritiker tatsächlich um des eigenen und anderer Menschen Glückes willen?

Im Fall der anderen Seite müßte die gleiche Frage lauten: Wie sehr bemüht sich der Kernkraftbefürworter darum, daß der von ihm angestrebte Fortschritt nicht nur ihm selbst und seinem unmittelbaren materiellen Einkommen Vorteile bringt, sondern anderen Menschen und tatsächlich der Menschheit zugute kommt, ohne daß politisch interessierte Kreise die Segnungen ausschließlich für sich selbst beschlagnahmen?

Solange die Diskussion über die Kernenergie die verborgenen Vorurteile und Ängste umschiffet und ganz „sachlich“ geführt wird, ohne daß klar wird, was eigentlich ihr Gegenstand ist, darf man sicher sein, daß nichts dabei herauskommt. Interessierte Kreise können dann hinter den Kulissen treiben, was sie wollen. Erst wenn wir uns eingestehen, daß es uns in der Frage der Kernenergie um mehr geht als „nur“ um eine Energiequelle und daß hinter den Ängsten und Einwänden gegen sie anderes stecken könnte als technische Risiken - dann ist es sinnvoll, in die Debatte einzusteigen.

I. Leben und Energie

Als erstes wollen wir die Kernkraft als Energiequelle für den Menschen betrachten.

Teil 2: Quellen der Energie

I. Leben und Energie

II. Chemische Bindungsenergie

III. Äußere Anwendung chemischer Bindungsenergie

IV. Und nun die Kernenergie

Ohne Energie läuft nichts. Energie ist, so die gängige Definition, die Fähigkeit, Arbeit im physikalischen Sinn zu verrichten. Laufen soll also vor allem die Wirtschaft - aber muß man dazu unbedingt auf Kernenergie zurückgreifen? Gegenfrage: Warum sollten wir uns nicht der Kernenergie bedienen? **Was ist an ihr so anders als an anderen Energiequellen?** Um diese Frage richtig einzuordnen, wollen wir zunächst recht grundsätzlich an die für den Menschen als lebende und kulturschaffende Wesen wichtigsten energetischen Abläufe erinnern.

I. Leben und Energie

Grundlage allen Lebens ist neben dem Vorhandensein von flüssigem Wasser Energie. Alle Lebewesen nehmen als Nahrung besondere Energierohstoffe auf. Die für ihre Lebensäußerungen erforderliche Energie beziehen sie aus der chemischen oder molekularen Umwandlung solcher Stoffe. Diese werden dabei von einem Zustand, in dem sie mehr Energie enthalten (Stärke, Zucker) in einen energetisch geringerwertigen Zustand (z.B. Kot, CO₂, Wasser) umgewandelt.

Hauptenergiespender für die bekannteren Tierarten und für den Menschen als biologisches Lebewesen sind Kohlehydrate. Das sind Stoffe, die aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen zusammengesetzt sind. Im technischen Bereich verwenden wir aus den gleichen Bestandteilen, aber anders, zusammengesetzte Kohlenwasserstoffe. Daneben werden noch andere, energetisch gehaltvolle chemische Bindungen verwendet, auf die wir hier aber nicht weiter eingehen.

Die Energie aus dem Stoffwechsel ermöglicht es den Lebewesen, sich zu bewegen, Nahrung zu suchen, sich zu vermehren, kurz: zu leben. Dabei

Ehrlich streiten über Kernenergie

wird aus den eingenommenen Kohlehydraten (CH_{xxx}) und dem Luftsauerstoff O_2 zumeist Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Ein normaler Mensch atmet auf diese Weise pro Tag (24 Stunden) etwa 1 Kilogramm CO_2 aus. Das sind etwa 500 Liter dieses Gases.

Untergraben sich die Lebewesen allmählich ihre Existenzgrundlage, indem sie allen Sauerstoff umwandeln, oder erzeugen sie sich mit dem CO_2 ein lebensunwirtliches Treibhaus? Offensichtlich nicht! Es ist ein Grundsatz der Natur, daß nichts verloren geht - auch keine Energie. Was geschieht, sind Stoffumwandlungen und ebenso Energieumwandlungen. Wenn wir Energie einsetzen, dann wandeln wir sie von einer Form in eine andere um. Die Abfälle, das Wasser und das CO_2 werden nämlich wieder zu Kohlehydraten aufbereitet, „recycelt“.

Dazu muß allerdings die Energie, die sie abgegeben haben, wieder in sie eingehen. Das „Recycling“ dieser Energieabfallstoffe ermöglicht das riesige Kernkraftwerk am Himmel, die Sonne, in Verbindung mit den Pflanzen. Die Pflanzen leisten die Stoffumwandlung, die dazu erforderliche Energie liefert die Sonne in reichlichem Maße - und zwar in Form eines breiten Spektrums elektromagnetischer Strahlung. Stehen flüssiges Wasser, CO_2 und Sonnenenergie auf der Erde reichlich zur Verfügung, wie z.B. im tropischen Urwald, gedeiht das Leben üppig. Sind Wasser, CO_2 und Sonnenenergie nur spärlich vorhanden, wie in kalten oder trockenen Gebieten, dann wachsen die Pflanzen entsprechend dürftig.

Die meisten bekannten Pflanzen zerlegen unter Einwirkung von Sonnenlichtquanten (Photonen) Wasser und Kohlendioxid und verbinden die freiwerdenden Atome neu zu Kohlehydraten. Aus ihnen bauen die Pflanzen im wesentlichen ihren Körper auf, der dann zum Teil wieder Tieren als Nahrung dient. Ein erwachsener Baum (z.B. eine 115-jährige Buche) hat durchschnittlich 200.000 Blätter mit 1.200 m^2 Oberfläche, 1014 Chloroplasten (Zellorgane der Pflanzen, die die Umwandlung durchführen und zusammen 180 g Chlorophyll enthalten). Ein solcher Baum nimmt täglich 9.400 Liter CO_2 (= etwa 18,6 Kg) aus der Luft und stellt daraus und aus dem aufgenommenen Wasser 12 kg Kohlehydrate her. Nebenbei geben die Pflanzen, wenn sie wachsen, O_2 - also Sauerstoff - ab, den wir wieder einatmen können.

II. Chemische Bindungsenergie

II. Chemische Bindungsenergie

Betrachten wir ein Atom des Gases Wasserstoff - das kleinste und leichteste Atom, das wir kennen. Es besteht nach der gängigen Vorstellung aus einem positiven Ladungsträger - einem Proton - als Kern, den eine negative Ladung - ein Elektron - umkreist. Daneben gibt es etwa 90 weitere stabile Elemente. Sie unterscheiden sich durch die Anzahl der Protonen im Kern und die entsprechende Anzahl an Elektronen, welche den Kern in bestimmten Abständen umkreisen. Zur Stabilisierung enthalten schwerere Kerne auch noch ladungsneutrale Neutronen.

Chemische Verbindungen kommen über die Elektronen auf der äußersten Schale (mit dem größten Abstand vom Kern) zustande. Das soll ein alltägliches Beispiel verdeutlichen: Das Salz auf unserem Esstisch ist chemisch gesehen Natriumchlorid (NaCl). Das Alkalielement Natrium hat auf seiner äußersten Elektronenschale nur ein einsames Elektron. Andererseits fehlt auf der äußeren Schale des Halogens Chlor nur noch ein einziges, um aufgefüllt zu sein. Beide Elemente verbinden sich daher zu Kochsalz, indem das vereinzelt Elektron des Natriums die Elektronenschale des Chloratoms sozusagen vervollständigt.

Die chemische Bindungsenergie ist die Energiedifferenz zwischen dem ungebundenen und gebundenen Zustand der beteiligten Atome oder Teilmoleküle - einfach gesagt: die Energie, die aufgewandt werden muß, um den Stoff in alle seine atomaren Bestandteile zu zerlegen und die frei wird, wenn die Bestandteile sich zum Molekül vereinigen.

Sie tritt meistens als Wärmebewegung seiner Teile, im Fall von Kohlenstoff und Sauerstoff z.B. als Wärme des Verbrennungsabgases CO_2 in Erscheinung. Diese Wärme wird dann vielleicht auf eine Herdplatte übertragen und läßt einen Bratpfel garen.

III. Äußere Anwendung chemischer Bindungsenergie

Der Mensch lebt wie alle Tiere von solchen Stoffwechseln in seinem Organismus. Dabei werden jeweils wohldosiert geringe Mengen von Stoffen gewechselt, ohne daß wir bewußt darauf Einfluß nehmen. Der Mensch begann sich vom Tier dadurch zu unterscheiden, daß er sich nicht nur auf den Stoffwechsel im Inneren seines Organismus beschränk-

Ehrlich streiten über Kernenergie

te. Er begann die Stoffe in seiner Umgebung zu ändern, er nähte Kleider, schnitzte Werkzeuge, legte Felder an und bemerkte, daß seine organische Energiequelle für diese Verrichtungen zu knapp wurde. Er begann seine Lebensaktivität zu erweitern, indem er den Stoffwechsel anderer Lebewesen für eigene Zwecke nutzt. Er begann - was Tiere nicht können - den energetischen Stoffwechsel unabhängig von biologischen Organen in eigenen, selbst hergestellten Vorrichtungen zu handhaben: die Beherrschung des Feuers.

Im wesentlichen handelt es sich beim Feuer um eine wenig kontrollierte Form dessen, was beim „natürlichen“ Stoffwechsel langsam und wohldosiert in kleinen Mengen abläuft. Wie bei einer Kettenreaktion werden bei einem Feuer feste molekulare Bindungen in großer Zahl hergestellt. Die dabei freigesetzte Energie nutzt der Mensch für seine Zwecke. Die Entwicklung der Technik bestand zunächst darin, die molekularen Kettenreaktionen besser zu steuern - das reichte vom Nachlegen von Brennholz bis zur geregelten Einspritzung des Brennstoffgemischs in den Verbrennungsmotor.

In einem anderen Schritt ging es darum, die freiwerdende Energie gezielter einzusetzen. Während beim offenen Feuer unter einem Kochtopf das meiste der freigesetzten Energie ungenutzt in die Umgebung entweicht, wird in modernen Feuerungsanlagen schon über die Hälfte der freigesetzten Molekularenergie dem Zweck, z.B. der Dampferzeugung zugeführt. Auf diese Art steigerte der Mensch im Laufe der technologischen Entwicklung die Effizienz seiner Energienutzung. Dazu entwickelte er auch bestimmte chemische Verfahren und Apparate (z.B. die Brennstoffzelle), die den Stoffwechselprozeß in ähnlicher Weise - nur eben komplexer - organisieren, als es im Organismus geschieht.

IV. Und nun die Kernenergie

Um die knappe Energie effizienter zu nutzen, mußte der Mensch die hier grob skizzierten energetischen Abläufe immer genauer beeinflussen und dazu die Zusammensetzung der Atome immer genauer untersuchen. Dabei stieß er auf einen Widerspruch, der ihm zu denken gab: Wenn sich nur entgegengesetzte Ladungen anziehen, gleich gerichtete aber abstoßen - warum fallen dann die Elektronen nicht in die Protonen, und warum fliegen die Protonen im Kern nicht auseinander? Offensichtlich herrschen

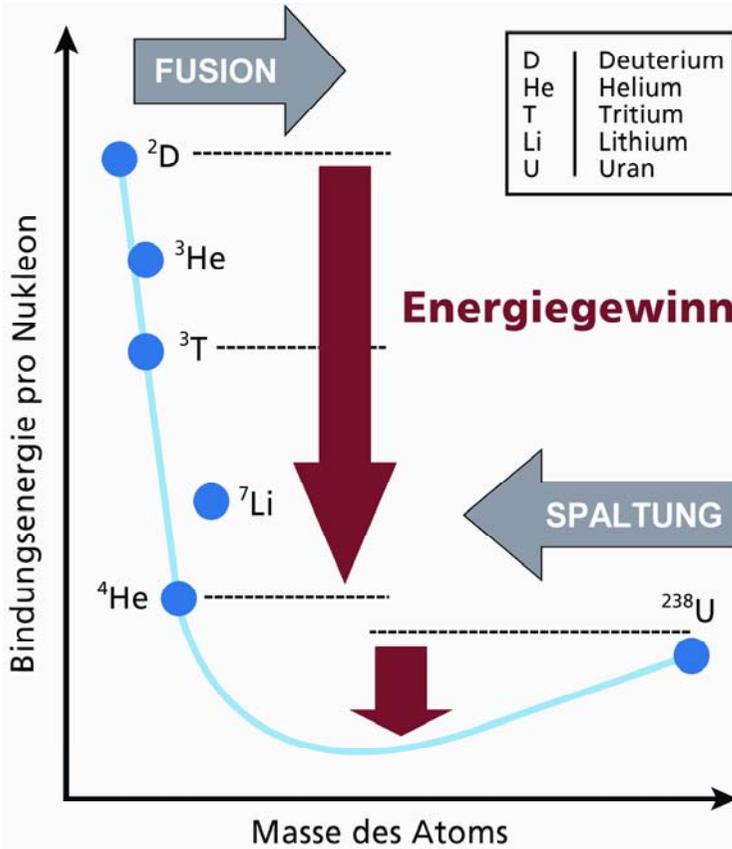
IV. Und nun die Kernenergie

in der kleinen Welt des Kerns andere Kräfte als in unserer Umgebung! Die Bestandteile des Kerns (Nukleonen, Protonen und Neutronen) müssen von einer Kraft zusammengehalten werden, die größer ist als die elektrostatische Abstoßung der Protonen.

Was sind dies für Bindungskräfte, die man „starke Wechselwirkung“ nennt? Ihr Wesen wird immer noch nicht so recht verstanden, aber man mißt ihre Wirkung recht genau. Daher weiß man, daß Kerne mit etwa 50 Nukleonen, wie z.B. Eisen, die stabilsten sind. Kleinere Kerne werden mit geringerer Kraft zusammengehalten als mittlere. Gleiches gilt für sehr schwere Kerne. Kerne mit mehr als 90 Protonen sind sogar so instabil, daß sie auf Dauer nicht zusammenhalten.

Nun gilt für die Bindungsenergie der Kerne ähnliches wie für die chemische Bindungsenergie. Die Kernbindungsenergie ist die Energie, die aufgewendet wird, um den Kern in seine Bestandteile zu zerlegen. Wenn man leichte Kerne zu schwereren verschmilzt (Kernfusion),

Ehrlich streiten über Kernenergie



Freisetzung der Kernbindungskräfte bei der Verschmelzung kleiner Kerne und Spaltung großer.

wird Energie freigesetzt; das geschieht aber auch, wenn große Kerne in kleinere zerbrechen (Kernspaltung).

Da es sich bei Kernbindungskräften um wesentlich stärkere Kräfte als diejenigen handelt, welche die Moleküle zusammenhalten, werden pro Kernreaktion auch wesentlich größere Energiemengen umgesetzt. Beim Zerfall eines Urankerns wird mehr als 50 Millionen mal so viel Energie frei wie bei der Bildung eines CO_2 -Moleküls aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Ein Gramm Uran_{235} setzt bei seiner Spaltung so viel Energie frei

IV. Und nun die Kernenergie

wie die Verbrennung von 2,7 Tonnen Steinkohle. Ähnliches gilt für die Verschmelzung leichter Kerne.

In einem Kern mit der Masse 240 (das sind bei Plutonium etwa 94 Protonen und 146 Neutronen) werden die Teilchen mit einer Bindungsenergie von je 7,6 Mio. Elektronenvolt zusammengehalten. Bei einem Kern mit der Masse 120 (z.B. Zinn mit 50 Protonen) sind es je Teilchen 8,5 MeV. Wird nun Plutonium mitten durch in Zinn gespalten (wir nehmen das theoretisch an, denn in der Regel sind die Bruchstücke ungleich groß), werden pro Kernteilchen rund 0,9 MeV atomarer Bindungsenergie frei. Bei der Spaltung eines einzigen Plutoniumkerns sind das insgesamt 216 MeV ($0,9 \times 240$). Von dieser Energie werden rund 85% als Wärme der Spaltprodukte und 15% durch besondere Anregungszustände der Bruchstücke abgegeben, die durch verschiedene Arten der Strahlung abgebaut und schließlich auch in Wärme umgewandelt werden.

Gelingt es, zwei Wasserstoffatome des schweren Wassers (Deuterium) miteinander zu verschmelzen, bekommt man entweder das Heliumisotop He-3 und ein Neutron plus 3,25 MeV Energie oder das Wasserstoffisotop Tritium und ein Proton plus 4 MeV Energie. Verschmilzt man Deuterium und Tritium, erhält man das Helium-4 und ein Neutron sowie 17,6 MeV an Energie.

Die Kernfusion ist schwieriger zu erreichen als die Spaltung schwerer Kerne, dafür stehen ihre „Brennstoffe“ in wesentlich größeren Mengen zur Verfügung: Man hat errechnet, daß in einem Liter Meerwasser genug Deuterium enthalten ist, um damit die gleiche Energiemenge wie bei der Verbrennung von 7.000 Tonnen Steinkohle freizusetzen. Daraus läßt sich erkennen, wie absurd es ist, von Energieknappheit im technischen Sinne zu reden. Knappheit ist vielmehr eine wirtschaftliche Größe, sie geht in den Preis ein und rührt an mächtige menschliche Interessen. Allerdings stehen der friedlichen Nutzung der Kernfusion noch große technische und wirtschaftliche Probleme im Weg.

Der große Vorteil hoher Energiedichte liegt auf der Hand. Nur einer sei erwähnt: Ein Gramm läßt sich leichter handhaben als drei Tonnen, und bei seiner Spaltung fallen auch nur etwa ein Gramm Abfall in Form von Spaltprodukten an. Bei der Kohleverbrennung sind das für den gleichen Energiegewinn etwa 3 Tonnen CO₂ und je nach Qualität der Kohle gut 100 kg Asche, die auch mit allerlei unangenehmen Stoffen vermischt ist.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Widerstände gegen die Kernfusion wurden bisher kaum laut, weil ihre wirtschaftliche Nutzung noch in weiter Ferne liegt. Die Kernkraftgegner bekämpfen bisher nur die wirtschaftlich genutzte Kernspaltung. Dabei stellt sich die Frage: Warum soll der Mensch diese verfügbare Energiequelle nicht nutzen? Dadurch, daß es ihm gelang, molekulare Bindungskräfte für sich und seine Ziele zu nutzen, hob er sich einst als Mensch vom Tier ab und übernahm die Verantwortung für die selbst geschaffene, menschliche Umwelt. Die Nutzung der Kernbindungskräfte gibt ihm größere Macht, seine bereits übernommene Verantwortung weiter auszubauen und nachdrücklicher wahrzunehmen.

Es ist nicht so klar, ob sich die Kritik an der Kernkraftnutzung gegen die Eigenart der Kernenergie richtet oder eigentlich mehr gegen die damit verbundene „Ermächtigung“ des Menschen. Der Einwand, den man zu hören bekommt, richtet sich gegen ein angebliches Katastrophenpotential der Kernkraftwerke. Auch die höheren Risiken bei einem Unfall sind Grund für solche Einwände. Der eigentliche Einwand, den man nicht zu hören bekommt, könnte das Misstrauen in die Bevollmächtigung des Menschen sein, das sich aus der zu tiefst inneren Selbsterfahrung speist. Wenden wir uns dem Gefahrenpotential zu.

Teil 3: Was geschieht eigentlich im Kernreaktor?

I. Meiler oder Ofen?

II. Einschluß des radioaktiven Materials

III. Der Spaltungsvorgang

Moderne Kernkraftwerke sind Wärmekraftwerke. Sie nutzen die bei der Kernspaltung als Wärme freigesetzte Energie wie andere Heizkraftwerke die Verbrennungswärme. Wenn es ein Problem gibt, dann liegt es im Bereich der Umwandlung der Kernbrennstoffe in Wärme. Im Kernbrennstoff ist die Energie sehr konzentriert. Die Spaltung von einem Gramm Uran entspricht der Verbrennung von 2,7 Tonnen Steinkohle.

Hohe Energiedichte birgt hohe Gefahr. Ein Messer ist deshalb gefährlicher als ein Stock, weil es die gleiche Energie auf eine viel kleinere Fläche konzentriert. Aus diesem Grunde wurden in frühen Kriegen Knüppel durch Schwerter ersetzt, ehe noch Messer in den Haushalten, z.B. zum Brotschneiden, Verwendung fanden. Hätten unsere Vorfahren deshalb auf Messer verzichten sollen? Wir haben uns inzwischen an diese Gefahr „gewöhnt“, weil wir Übung mit noch größeren Gefahren als Messerstechereien haben - etwa im täglichen Straßenverkehr.

Der Kernbrennstoff birgt in mehrerer Hinsicht Gefahr:

1. besteht Gefahr, daß er entwendet, zur Waffe verarbeitet und dann auch so eingesetzt werden kann;
2. besteht die Gefahr, daß die Freisetzung einer derart geballten Energie durch Kettenreaktion außer Kontrolle gerät;
3. geht wegen ihrer ionisierenden Strahlung auch von den Spaltprodukten („Atomabfällen“) Gefahr aus. Der Strahlung und dem Problem der Endlagerung nuklearer Abfälle werden wir ein eigenes Kapitel widmen.

Ehrlich streiten über Kernenergie

I. Meiler oder Ofen?

Als man sich unter dem Eindruck der Bomben auf Hiroshima und Nagasaki nach dem Krieg an die friedliche Nutzung der ungeheuer „geballten“ Kräfte im Atom machte, war es die erste Sorge, zu verhindern, daß spaltbares Material in falsche Hände gelangt, um als Waffe mißbraucht zu werden. Das führte dazu, daß man von den beiden grundsätzlichen Feuerungsprinzipien, dem Meiler- und dem Ofenprinzip, das auswählte, welches aus anderer Sicht das größere Katastrophenpotential beinhaltet: den Meiler.

- Beim Meiler ist der gesamte Brennstoff einer langen Brennphase im Reaktor angeordnet. Der Verbrennungsvorgang wird dann so geregelt, daß gleichzeitig immer nur ein kleiner Teil des Brennstoffs in Energie umgewandelt wird.
- Im Ofen hingegen befindet sich jeweils nur so viel Brennstoff, wie nötig ist, um den Verbrennungsprozeß in der gewünschten Intensität aufrecht zu erhalten; dafür muß aber ständig neuer Brennstoff nachgelegt werden.

Will man vor allem die Brennstoffe unter Kontrolle haben, empfiehlt sich das Meilerprinzip. So lange der Meiler im Betrieb ist, kann niemand an den Brennstoff gelangen. Zugriff auf den Brennstoff ist nur während der kurzen Stillstandszeiten nach einer ein- oder mehrjährigen Betriebszeit möglich, in denen das Brennstoffinventar unter strengen Kontrollen ausgewechselt wird. Würde wie beim Ofenprinzip ständig nachgefeuert, müßten ständig vor Ort Brennstoffe bereitliegen. Ihre Kontrolle wäre möglicherweise viel aufwendiger.

Die meisten der heute gebräuchlichen Kernkraftwerke arbeiten daher nach dem Meilerprinzip. Mit dem in Deutschland entwickelten, aber inzwischen aufgegebenen Kugelbettreaktor wurde ein nuklearer Reaktorofen konzipiert, auf den wir später zu sprechen kommen.

II. Einschluß des radioaktiven Materials

Entscheidend für die Nutzung der Kernenergie ist der zuverlässige Einschluß der Strahlungsquellen, vor allem der stark strahlenden Spaltpro-

II. Einschluß des radioaktiven Materials

dukte. Beim Meiler kommt die sichere Kontrolle des Abbrandprozesses hinzu. Beide Gefahrenquellen sind eng miteinander verknüpft. Gerät der Abbrandprozeß außer Kontrolle, läßt sich auch der sichere Einschluß der strahlenden Substanzen nicht gewährleisten.

Der Brennstoff selbst strahlt nur sehr gering, er könnte gefahrlos in der Hosentasche transportiert werden. Hochradioaktive, also gefährlich strahlende Spaltprodukte entstehen erst durch den Spaltprozeß. Sie werden auf mehrfache Weise eingeschlossen:

- Zunächst werden sie im nuklearen Brennstoff selbst eingeschlossen. Es handelt sich dabei vorwiegend um Uranerz (UO_2), das vermahlen und zu fingerdicken Tabletten gepreßt wird. Es besteht zu etwa 96,5 % aus Uran 238 , das sich als pufferndes Dämpfungsmittel eignet. Die sich aus der Spaltung eines Kerns ergebenden Spaltprodukte bleiben weitgehend in dem dämpfenden Kristallgitter des Uranerzes hängen. Das gilt selbst für Edelgase wie Krypton und Xenon.
- Die Brennstofftabletten werden in dichtverschweißten Edelstahlröhren, den sogenannten Brennstäben, festgehalten. Bei diesem Stahl handelt es sich meistens um eine Zirkoniumlegierung, weil Zirkonium kaum Neutronen einfängt. Dieses Stahlrohr wurde so ausgelegt,
 1. daß es weder im Inneren zu chemischen Wechselwirkungen (Korrosion) zwischen Brennstoff, Spaltmaterial und Hüllrohr, noch außen mit dem die Röhren umspülenden Kühlmittel kommt;
 2. daß die Spaltprodukte, soweit sie doch aus dem Brennstoff austreten, die Röhre nicht verlassen können, aber dort auch keinen Überdruck entstehen lassen;
 3. daß sie durch Reibschwingungen oder andere mechanische Einwirkungen weder verbogen oder in ihrer Halterung gelockert werden können.
- Die Brennstäbe wiederum umschließt das Kühlmittel in einem entsprechenden Reaktordruckgefäß aus einem Stahl, der den hier auftretenden besonderen Beanspruchungen gewachsen ist. Die Belastungen, d.h. die Anforderungen an die Festigkeit und Zähigkeit des Werkstoffs, übersteigen im Kernkraftwerk nicht die in

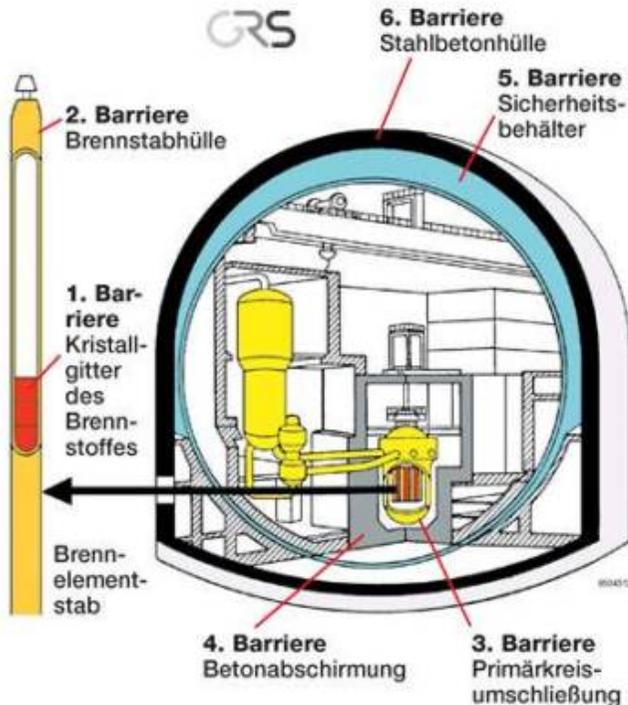
Ehrlich streiten über Kernenergie

anderen Produktionsbereichen. Doch unterliegen der Werkstoff und seine Verarbeitung im Falle der Verwendung in Kernkraftwerken einer besonderen Qualitätsüberwachung. Das gilt auch für alle übrigen Bestandteile, wie z.B. Abdichtungen an den verschiedenen Durchführungen (Pumpwellen, Ventilspindeln, etc.)

- Das Reaktorgefäß befindet sich in einem Gehäuse (Betonabschirmung) in einer Stahlkugel (Sicherheitsbehälter) und einer starken Stahlbetonhülle. Die Umbauung ist so ausgelegt, daß sie beim Versagen aller anderen Barrieren das radioaktive Inventar und den Druck, der ihre Freisetzung aus dem Reaktorkern erzeugen würde, aufnehmen und zurückhalten kann. Diese Sicherung hat sich z.B. bei dem Reaktorunfall in Harrisburg 1979 bewährt. Die Dimension der Umhüllung war dagegen bei den Japanischen Reaktoren in Fukushima zu klein bemessen, so dass sie der Freisetzungsdruck nach der Zerstörung der Kühlsysteme durch Erdbeben und Tsunami platzen ließ. Das Gehäuse ist innen gegen Splitterwirkung und von außen gegen Flugzeugabstürze und Explosionen weitgehend (wenn nicht bestimmten Stellen in einem bestimmten Einfallwinkel mit sehr großen Maschinen gezielt getroffen werden) geschützt.
- Hinzu kommen Reinigungs- und Filtersysteme: sie entfernen radioaktive Stoffe, die einzelne Barrieren doch überwunden haben sollten, z.B. aus dem Kühlmittel. Innerhalb des Reaktorgebäudes wird in den zugänglichen Räumen ein System von Unterdruck derart aufrechterhalten, daß die Luft, falls eine Undichte entsteht, immer nur von außen nach innen gesogen wird. Dadurch ist gesichert, daß Luft mit möglicherweise freigesetzten Schwebeteilchen nur über die Filtersysteme, die sie einfangen, nach außen gelangt.

Diese Barrieren gegen das Austreten radioaktiver Substanzen reichen im Normalbetrieb völlig aus, so daß durch den Betrieb des Kernkraftwerkes keine zusätzliche Radioaktivität in die Umgebung gelangen kann.

II. Einschluß des radioaktiven Materials



Schema der Barrieren beim Druckwasserreaktor. Sicherheitsrelevant ist das Verhältnis des Reaktordruckgefäßes zum äußeren Containment (Stahlkugel und Beton Mantel), GRS mbH

Das geschieht allenfalls bei schweren Störungen des Reaktorbetriebs. Zu einer schwerwiegenden Störung kommt es, wenn die Spaltvorgänge im Reaktor außer Kontrolle geraten, also „durchgehen“, wie das beim Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 aufgrund falscher Steuerung der Personals der Fall war, oder wenn die Abfuhr der Nachzerfallswärme, der Wärme, die nach Abschalten der Spaltprozesse im Reaktor noch frei wird, nicht gelingt, was beim Reaktorunfall in Fukushima die Tsunami-Katastrophe in Gang gesetzt hat. Um das zu verstehen, müssen wir uns den Kernspaltungsprozeß etwas näher ansehen.

Ehrlich streiten über Kernenergie

III. Der Spaltungsvorgang

Prinzipiell könnten alle Atomkerne gespalten werden, energetisch sinnvoll ist das aber nur bei den überschweren Kernen, die aufgrund eines ungünstigen Verhältnisses zwischen Protonen und Neutronen nicht mehr stabil sind und zur Spaltung neigen. Die gebräuchlichsten Kerne sind die von

- Uran $_{235}$, das zu 0,7% im Natururan enthalten ist,
- Plutonium, das aus Uran $_{238}$, und
- Uran $_{233}$, das aus Thorium (Th $_{232}$)

gebrütet wird. Ein solcher Kern zerfällt, wenn ihn ein freies Neutron mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit (nicht zu schnell und nicht zu langsam) trifft. Das Neutron dringt in den Kern ein und veranlasst die im Kern vorhandenen Teilchen, sich umzugruppieren. Dabei gerät der Kern in Schwingungen, die ihn in fünf von sechs Fällen in zwei Teile (meist im Verhältnis von 40:60) platzen lassen. Im sechsten Fall entsteht ein Atom des nicht spaltbaren Uran $_{236}$.

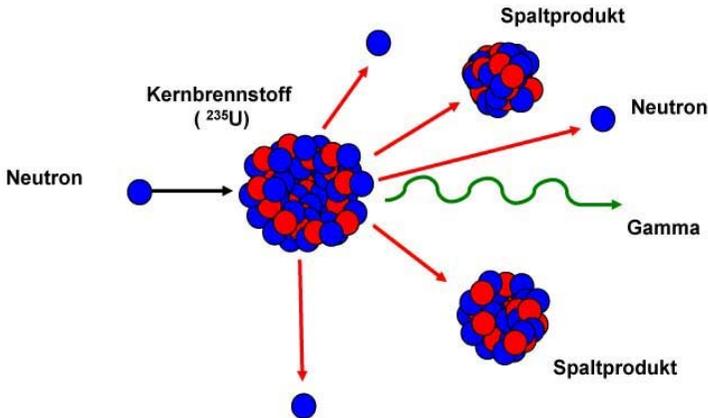
Die Bruchstücke, meist je ein Krypton- und ein Bariumkern, fliegen mit der Energie von 167MeV (Megaelektronenvolt, etwa $2,67 \times 10^{-11}$ Joule) auseinander. Sie werden in Bruchteilen von mm Entfernung durch Atome der Brennstofftablette abgebremst. Dabei wandelt sich ihre Bewegungsenergie in Wärme um. Außerdem werden zwei bis drei Neutronen mit einer kinetischen Energie von rund 5MeV frei. Sie können Brennstoff und Hüllrohr durchdringen und werden im Reaktorwasser, dem Moderator, innerhalb weniger Dezimeter gebremst.

Zusätzlich entstehen 20MeV an β - und γ -Strahlung, die aber ebenfalls in Wärme umgewandelt wird. Die Reaktorwärme wird über das Primärkühlmittel in einen Wärmetauscher abgeführt und dort zur weiteren Nutzung (Dampferzeugung) ausgekoppelt.

Die erste Kontrollaufgabe besteht darin, sicherzustellen, daß von den freigesetzten zwei bis drei Neutronen nur eines - aber dies auch sicher - zu einer weiteren Kernspaltung führt. Zu diesem Zweck muß es auf

III. Der Spaltungsvorgang

Kernspaltung von U-235 durch thermische Neutronen



Schema einer Kernspaltung

die erforderliche Geschwindigkeit abgebremst werden. Dem dient der sogenannte Moderator, meist schweres Wasser oder Graphit. Für die Sicherheit ist entscheidend, daß die übrigen ein bis zwei Neutronen nicht auch zu einer Kernspaltung führen.

Diese Sicherheit bieten sogenannte „Neutronengifte“. Das sind Kerne, die wie ein Puffer Neutronen aufnehmen, ohne selbst gespalten zu werden. Dazu zählen unter anderem die Brutstoffe wie das erwähnte Uran₂₃₈, aus dem die Brennstofftablette zum größten Teil besteht. Auch Spaltprodukte wie z.B. Xenon₁₃₅ nehmen Neutronen auf. Weitere Neutronen bleiben im Moderator, im Strukturmaterial, und auch in der Ummantelung der Brennstofftabletten stecken.

Natürlich ist es unmöglich, die Neutronen einer jeden Kernspaltung exakt zu steuern. Die freigesetzte Energie ergibt sich aus einer großen Zahl an Kernzerfällen mit einer entsprechend großen Menge Neutronen. Diese läßt sich mit der nötigen statistischen Wahrscheinlichkeit durch:

- Beimischung von Absorbermaterial zum Brennstoff,
- durch die Anordnung der Brennelemente,

Ehrlich streiten über Kernenergie

- zusätzliche leere oder mit Absorbermaterial gefüllte Stäbe
- die Zusammensetzung des Moderators und
- die gesamte Geometrie der Anlage

sehr genau steuern. Auf diese Weise ist der kontrollierte Abbrand des Kernbrennstoffs weitgehend gewährleistet.

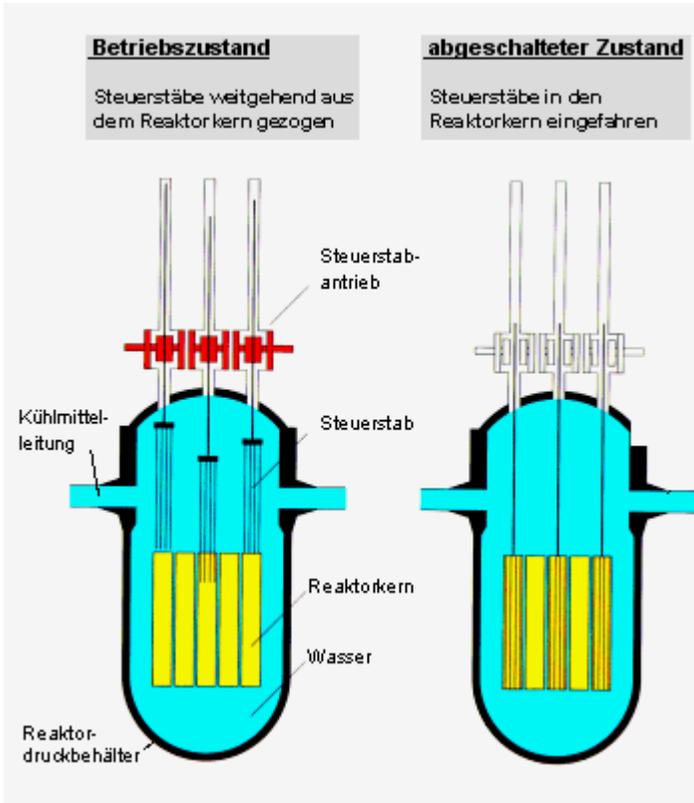
Im Reaktor sorgen einige zusätzliche Selbstregelungseffekte dafür, daß sich mögliche Leistungssteigerungen durch zusätzliche Spaltvorgänge von selbst abbauen bzw. unmöglich sind. Steigt die Temperatur infolge zunehmender Spaltprozesse im Reaktor an, vergrößert sich nämlich die Absorptionsfähigkeit von Uran₂₃₈. Sein Anteil in den Brennstofftabletten fängt nun mehr Neutronen ein und senkt dadurch die Anzahl der Spaltvorgänge wieder. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Dichte des Moderators - besonders im Falle von Wasser - ab. Dadurch sinkt seine Bremswirkung auf die Neutronen, so daß

sie eher von U₂₃₈-Kernen absorbiert werden und entsprechend weniger Kernspaltungen auslösen.

Die Auslegung eines Reaktors muß so sein, daß der sogenannte **Leistungskoeffizient negativ** ist. D.h. wenn bei einem zu hohen Anheben der Steuerstäbe eine Vermehrung der Spaltneutronen zu einer Leistungssteigerung des Reaktors führt, muß die erwähnte Gegenwirkung, der Temperaturkoeffizient, diese sogar überbieten. Im Endergebnis muß die Zahl der Spaltungsvorgänge pro Zeit sinken.

Die Auslegung des Reaktors, seine Geometrie und die Abstimmung der Volumenverhältnisse sorgen dafür, daß der Kernbrennstoff gleichmäßig abbrennt, ohne daß von außen steuernd eingegriffen werden muß. Eingriffe von außen sind durch Steuerstäbe, die ebenfalls mit Neutronengiften gefüllt sind, möglich. Sie lassen sich zur Regelung der Spaltvorgänge mehr oder weniger weit in den Reaktor einführen. Schließlich kann bei Bedarf ein weiteres Neutronengift, meistens Bor, dem Reaktorwasser zugefügt werden. Beides - der Einsatz

III. Der Spaltungsvorgang



Regelung der Spaltvorgänge durch Neutronen absorbierende Steuerstäbe bis zur Abschaltung

von Steuerstäben oder die Zugabe von Bor - kommt vorwiegend beim Abschalten und Anfahren des Reaktors zum Einsatz.

Die Steuerstäbe dienen vor allem dazu, die Neutronen, die beim Herunterfahren der Reaktorleistung und dem allmählichen Abkühlen des Reaktors zunächst vermehrt auftreten, zu kompensieren. Dann müssen sie den abgeschalteten Reaktor unterkritisch halten und gewährleisten, daß der Reaktor, wenn er wieder mit frischen Brennelementen bestückt ist, langsam und kontrolliert hochgefahren werden kann.

Teil 4: Warum der „GAU“ beherrschbar ist

I. Was ist der „GAU“?

II. Sicherheitsprinzipien

III. Vergrößerung der Sicherheitsrisiken durch die Politik

Abgesehen von Materialermüdungen, möglichen Undichtstellen, dem Abreißen von Leitungen und ähnlichen Unfällen, die relativ problemlos behoben werden können und denen durch entsprechende Materialkontrolle vorgebeugt wird, sind das Abschalten oder Hochfahren des Reaktors im Bereich der noch oder schon niedrigen Reaktorleistung die eigentlich kritischen Momente im Reaktorbetrieb. Nur im Niedriglastbereich kann es durch Fehlsteuerung, durch zu schnell hochgezogene Steuerstäbe zu extrem schnellen Leistungssteigerungen („Durchgehen“) kommen, denen der entgegengewirkende Temperaturkoeffizient zu spät folgt.

Das löste bei dem Betriebsversuch in Tschernobyl das Unglück aus, denn dort waren die Steuerstäbe entgegen der ausdrücklichen Vorschriften in der Betriebsanleitung bei niedriger Reaktorleistung und niedrigem Kühlmittelumlauf vollständig herausgefahren worden. Die seltsame Anordnung traf ein aus Moskau eingeflogener sachfremder Ingenieur, der die Umwandlung einer Waffenplutoniumbrutanlage in einen zivilen Reaktorbetrieb leiten sollte, gegen den Widerstand des Betriebspersonals. Es kam zu einer plötzlichen Leistungssteigerung, die durch den Temperaturkoeffizienten sofort wieder beendet worden ist. Doch der kurze Leistungssprung genügte, um einen Teil des Brennstoffs zu verdampfen, der Rest schmolz nach unten in den Reaktorsumpf. Der plötzliche Gasdruck hob den 3.000t schweren Reaktordeckel mit den Abschirmblöcken an und stellte ihn quer, so daß die flüchtigen radioaktiven Stoffe - die Edelgase, Jod₁₃₁ und Cäsium₁₃₇ - durch die Öffnung entweichen konnten. Eine Sicherheitshülle, die diese Dämpfe zurückgehalten hätte, fehlte bei diesem Reaktor. (Durch Flüssigmetall gekühlte Reaktoren sind wegen ihrer sehr guten Wärmeabfuhr gegen solche Unfälle unempfindlich.)

Die Steuerstäbe oder die beschriebenen Temperaturkoeffizienten beenden die Kernspaltungen sofort. Bei abklingender Wärme setzen die Kernspaltungen jedoch, wenn die Steuerstäbe die entstehenden Neutronen nicht einfangen, spontan wieder ein. Gleichzeitig setzt sich nach der Abschalt-

III. Der Spaltungsvorgang

tung der rasche Zerfall der radioaktiven Stoffe, vor allem der Spaltprodukte, ungehindert fort und gibt erhebliche Wärme frei.

Vor allem ändert sich das Absorptionsverhalten der Spaltprodukte. So nimmt der Bestand an Xenon₁₃₅ nach der Abschaltung zunächst zu, erreicht nach etwa zehn Stunden den Höchststand, um nach weiteren 14 Stunden den Ausgangsstand zu unterlaufen. Xenon₁₃₅ ist ein wichtiger Neutronenabsorber.

Die Spaltprodukte sind hochradioaktiv, weil ihre Kerne noch nicht stabil sind. Selbst wenn ein Reaktor erfolgreich abgeschaltet worden ist, zerfallen und verändern sich diese Kerne weiter. Dabei wird Energie frei - vorwiegend in Form von Beta- und Gammastrahlung - und sorgt dafür, daß die Reaktorleistung anhält. Da hochradioaktive Stoffe nur eine kurze Halbwertszeit haben, klingt diese Leistung allerdings rasch ab. Zehn Sekunden nach Abschaltung des Reaktors beträgt sie nur noch 4% des Normalbetriebs. Nach fünf Stunden ist sie auf nunmehr 1% der Leistung im Normalbetrieb abgeklungen. Die Wärmeleistung der Zerfallsprozesse nach Abschalten des Reaktors entspricht nach diesen fünf Stunden noch immer etwa einem Kilowatt pro Liter - das ist der Leistung eines starken Tauchsieders vergleichbar.

Über die Vorgänge in Fukushima laufen extrem widersprüchliche Sensationsmeldungen um, so dass eine genauere Einschätzung bei Drucklegung dieses Textes nicht möglich war.

Was ist der „GAU“?

Normalerweise wird diese Wärme genau so abgeführt wie beim Normalbetrieb. Ein Problem taucht jedoch auf, wenn der Reaktor z.B. abgeschaltet werden mußte, weil der Kühlkreislauf versagt hat. In diesem Fall springen redundant bereitgehaltene Kühlsysteme, dieselgetriebene oder notstromgesicherte Notspeisepumpen ein. Sie speisen eigens dafür bereitgehaltenes Kühlwasser in die Dampferzeuger ein, um die Abwärme aufzunehmen und, wenn nötig, den erzeugten Dampf über den Schornstein abzulassen. (In Japan hatte der Tsunami wohl diese Möglichkeiten weggerissen und offensichtlich auch die Becken für das bereitgehaltene Kühlwasser leckgeschlagen.)

Wird diese Wärme überhaupt nicht abgeführt, weil alle Sicherheitssysteme ausfallen, reicht die Nachzerfallswärme bei plötzlicher Notabschal-

Ehrlich streiten über Kernenergie

tung des Reaktors aus, einen Reaktorkern, Hüllrohre und Brennstoffmatrix durchschmelzen zu lassen. Die Lava vermischt sich mit dem Wasser(dampf) des Primärkühlkreislaufs und dem Wasserstoff, der sich bei hohen Temperaturen durch die Reaktion des Wassers mit dem Zirkonium der Hüllrohre bildet und es kommt zu Knallgas-Verpuffungen.

Reicht die Kühlleistung des Primärkreislaufs nicht aus, weil vielleicht ein Leck entstanden ist, so könnte selbst der Reaktordruckbehälter der Kernschmelze möglicherweise nicht standhalten. Nun tritt das gefährliche Gemisch in die Sicherheitshülle aus, deren Volumen so berechnet ist, daß sie, wie im Fall Harrisburg, den möglichen Druck aufnehmen und ihm standhalten kann. (Diese war in Fukushima offensichtlich zu klein ausgelegt gewesen)

Die Sicherheitshülle könnte allerdings aufgerissen werden, wenn sie beim Bersten des Reaktordruckbehälters verletzt würde. Dazu könnte es kommen, wenn sich bei der Kernschmelze im Druckbehälter ein zu hoher Dampfdruck aufgebaut hätte, der nicht rechtzeitig abgelassen worden wäre (Versagen entsprechender Ventile). Auch wäre denkbar, daß der gebildete Wasserstoff explodiert. Einer solchen Explosion hat die Sicherheitshülle in Harrisburg (aber nicht in Fukushima) standgehalten. Diese Gefahr wird inzwischen durch eine Stickstoffatmosphäre im Sicherheitsbehälter oder das Zusetzen von Wasserstoff-Rekombinatoren (die in Fukushima fehlten) bekämpft.

Würden sich aus Reaktionen der Schmelze mit Bestandteilen des Fundaments kondensunfähige Gase bilden, dann könnten sie über die vorhandenen Filtersysteme abgelassen werden. Sollte sich die Schmelze unten auch noch durch die Sicherheitshülle hindurchfressen, was unwahrscheinlich ist, würden radioaktive Stoffe in die Atmosphäre austreten, wenn der Druck in der Sicherheitshülle nicht entsprechend niedrig gehalten würde. Nach den Berechnungen und dem heutigen Erkenntnisstand kann die Schmelze nicht genug Energie enthalten, um die Sicherheitshülle durch eine Dampfplosion zu zerstören oder durchzuschmelzen.

Zunehmende Qualitätskontrolle, eingebaute Redundanzen und Diversitäten bei den Ventilen und sonstigen Durchlässen, die aus dem Reaktorkern in das Reaktorgehäuse führen, sorgen dafür, daß es nicht zu dem Wärmestau im Reaktor kommt, der den beschriebenen „Größten Anzunehmenden Unfall“ (GAU) auslösen würde. Als GAU gilt der nach Stand

II. Sicherheitsprinzipien

der Erkenntnis größtmögliche Unfall einer Anlage, wenn sämtliche Sicherheitssysteme versagen. Er muß nach deutschem Recht prinzipiell noch so beherrschbar sein, daß die Auswirkungen auf das Reaktorgelände beschränkt, oder wie im Fall Harrisburg, sehr gering bleiben (minimale Radioaktivität im abgelassenen Dampf).

In der Öffentlichkeit wird der GAU dagegen oft fälschlich als ein Ereignis dargestellt, das die Auslegung eines Kraftwerks überschreitet und - wie im Fall Tschernobyl - zur Freisetzung einer großen Menge radioaktiver Stoffe führt. Deutsche Kernkraftwerke müssen so ausgelegt sein, daß ein Super-GAU, ein die Auslegung des Kraftwerks überschreitender Unfall, nach allen bisher denkbaren Störszenarien und Fehlsteuerungen ausgeschlossen bleibt.

II. Sicherheitsprinzipien

Mit dem Betrieb der Reaktoren (inzwischen sind es über 10.000 Reaktorbetriebsjahre aller Kernkraftwerke) sammeln sich immer mehr Erfahrungen an. Sie führen ständig zu weiteren Verbesserungen der Sicherheitstechnik oder, wenn diese nicht installierbar sein sollte, zur Stilllegung von Reaktoren, wie das in Fukushima kurz vor dem Tsunami bereits eingeleitet worden war. Darüber hinaus werden ständig neue, denkbare Störfälle simuliert und, wenn möglich, unter Laborbedingungen auch durchgespielt. Daraus ergeben sich neue sicherheitstechnische Anforderungen an die Auslegung kerntechnischer Anlagen.

In diesen Zusammenhang gehört auch die Überlegung zum sogenannten GAU. Früher ging man davon aus, daß der GAU dadurch eingeleitet würde, daß die größte Zu- bzw. Ableitung vom Reaktordruckgefäß abreißt. Dieser Fall wird, falls er bei der heutigen Kraftwerksauslegung aus unerfindlichem Grund doch noch auftreten würde, relativ leicht beherrscht.

Größere Schwierigkeiten bereiten heute eher kleinere Lecks im Primärkreislauf oder Brüche der Frischdampfleitung, wenn sie falsch erkannt werden und darauf falsch reagiert wird. Solche denkbaren Störfälle werden in Verbindung mit allerlei möglichen Einzelfehlern untersucht und durchgespielt.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse gehen in die Schulungsunterlagen des Personals der Kraftwerke, der Aufsichts- und Überwachungsbehörden und der Sachverständigen und ihre ständige Überwachungsarbeit und Sicherheitsprüfungen ein. Die nachträgliche Untersuchung von Reaktorunfällen, besonders der schwerwiegenden in Harrisburg, haben gezeigt, daß ihre Ursache vor allem in der Unkenntnis des Bedienungspersonals lag: Es war auf die eingetretenen Störfälle nicht vorbereitet, konnte sie nicht erkennen oder behandelten sie - wie in Tschernobyl auf ausdrücklichem Befehl - falsch.

Im Fall Harrisburg war der bei diesem Störfall aufgetretene Irrtum bereits 16 Monate vor dem Unfall erkannt und beschrieben worden. Die Information war jedoch in den Schreibtischen der Behörden stecken geblieben und nicht bis zum Wartungspersonal vorgedrungen. Auch der Betriebsversuch in Tschernobyl, der 1986 zu dem Unfall geführt hat, war nicht sorgfältig geplant gewesen und das Wartungspersonal nicht richtig eingewiesen worden. Der leitende Ingenieur scheint z.B. nicht gewusst zu haben, dass die Reaktivität beim Abkühlen des Reaktors wieder sprunghaft ansteigen kann, obwohl das in der Betriebsanleitung vermerkt und er vom Wartungspersonal (nach Aussagen eines deutschen Ingenieurs, der bei der Schadensbehebung mithalf) darauf hingewiesen worden war. Die Steuerstäbe wurden nach dem Abschalten zu schnell aus dem Reaktor herausgefahren worden.

Inzwischen werden die Erfahrungen in allen Kernkraftwerken der Welt zusammengetragen und ausgewertet. Darauf achtet unter anderem die Betreibergewerkschaft, die World Association of Nuclear Operators (WANO). Die daraus gewonnenen Erkenntnisse gehen ein in die Schulungs- und Trainingsunterlagen der Kraftwerksbetreiber, ihres Wartungspersonals, der Aufsichts-, Überwachungsbehörden und der Sachverständigen und ihre ständige Überwachungsarbeit und Sicherheitsprüfungen. Sie werden außerdem für die ständige Nachrüstung und Verbesserung der Anlagen ausgewertet.

Neben dieser „Sicherheitskultur“ der für Betrieb, Wartung, Kontrolle und Verbesserung der kerntechnischen Anlagen zuständigen Personen ist auch in der Technik der Anlagen eine besondere Stufe der Sicherheit angelegt. Sie läßt sich durch folgende Begriffe umreißen:

II. Sicherheitsprinzipien

1. Redundanz. D.h. alle wesentlichen Sicherheitssysteme müssen mehrfach vorhanden sein. Wenn zwei Notsysteme versagen und nicht ansprechen, muß noch ein drittes vorhanden sein, um in diesem Fall das aufgetretene Problem zu lösen.
2. Autarkie. D.h. die einzelnen Systeme müssen unabhängig voneinander funktionieren und dürfen nicht auf einander angewiesen sein, so daß z.B. für jede Pumpe ein eigener Wasservorrat bereitgehalten werden muß.
3. Die redundanten Systeme müssen auch räumlich von einander getrennt und gegeneinander abzuschotten sein, so daß sie nicht durch ein Störereignis - z.B. einen Brand am gleichen Ort - beeinträchtigt sind. Das gilt auch für ihre Stromversorgung und andere Leitungssysteme.
4. Diversität. Die redundanten Sicherheitssysteme müssen nach unterschiedlichen technischen Methoden arbeiten, d.h. nach unterschiedlichen physikalischen Prinzipien die Störung erkennen, sich unterschiedlich ein- und ausschalten lassen, mit unterschiedlichen Ventilkonstruktionen arbeiten, u.dgl.
5. Automatisierung. Man geht davon aus, daß der Mensch der automatischen Regelung erst nach 30 Minuten durch Überlegung und mit dem Rat bereitgestellter Informationsquellen überlegen ist. Automatische Sperren oder Regelabläufe verhindern bzw. kontrollieren Fehleingriffe aus Hektik und Unbedachtsamkeit. Diese Vorkehrungen schützen auch gegen mutwillige und böswillige Einwirkungen möglicherweise eingeschleuster terroristischer „Schläfer“.
6. Schließlich wird anhand von Wahrscheinlichkeiten nachgerechnet, ob und inwieweit auftretende Störmeldungen andere Störbereiche überdecken können, damit nicht ein gemeldeter geringerer Störfall von einem wichtigeren, aber nicht angezeigten Störfall ablenkt. Zur Vorbereitung entsprechender Rechnerprogramme dienen neben den Betriebserfahrungen Wahrscheinlichkeitsüberlegungen über das Zusammentreffen einzelner Vorgänge. Aus solchen Analysen werden oft auch Hinweise auf mögliche Schwachstellen gewonnen, die dann noch vor Eintreten eines Störfalls beseitigt werden können.

III. Vergrößerung der Sicherheitsrisiken durch die Politik

Nimmt man alle diese Sicherheitsvorkehrungen und Sicherheitsüberlegungen zusammen, wird man schwerlich zu dem Eindruck kommen, der Betrieb kerntechnischer Anlagen sei aus Sicherheitsgründen nicht zu verantworten.

Für diese Annahme gibt es sogar Beweise: Der Hochtemperaturreaktor und der mit flüssigem Metall gekühlte Schnelle Brüter waren Reaktorlinien, bei denen aufgrund physikalischer Gesetze zusätzliche schadensbegrenzende Maßnahmen hätten entbehrlich sein können. Jeder irgendwie denkbare Schadensfall ließ sich ohne eigene Sicherheitsvorkehrungen so eingrenzen, dass seine Auswirkungen innerhalb der Anlage abgefangen und Schadenswirkungen nicht über die Anlage hinaus gelangen konnten.

Daß entsprechende Anlagen trotz erheblicher Investitionen nicht in Betrieb genommen bzw. kurz nach Inbetriebnahme stillgelegt wurden und ihre Entwicklung in Deutschland nicht weiter verfolgt wird, läßt sich durch Sicherheitsbedenken nicht mehr begründen.

Unschwer ist einzusehen, daß der Ausstieg aus der Kerntechnik selbst den weiteren Betrieb und den Rückbau vorhandener Anlagen aus vielen Gründen wesentlich unsicherer macht - vor allem wegen des fehlenden Nachwuchses, der die erforderliche aufwendige Ausbildung auf sich nimmt. Konsequenter wäre der sofortige und unbedingte Ausstieg aus der Kernenergienutzung gewesen, wenn man von ihrer Unbeherrschbarkeit überzeugt gewesen wäre, was offensichtlich nicht der Fall war. Der gewählte kostensparende Weg war der denkbar unsicherste, und dies und die einseitige Medienpropaganda legt nahe, daß „Sicherheitsbedenken“ nur vorgeschobene Gründe für ganz andere wirtschaftliche und gesellschaftspolitische Absichten sind.

Teil 5: Wann ist Radioaktivität gefährlich?

- I. Was macht die Radioaktivität gefährlich?
 - II. „Erst die Dosis macht das Gift“
 - III. Natürliche und zusätzliche Radioaktivität
 - IV. Übertriebene Angst vor Strahlung
-

III. Vergrößerung der Sicherheitsrisiken durch die Politik

Wenn Atomkerne sich umwandeln oder zerfallen, wird Strahlung freigesetzt. Daß diese Strahlung gefährlich sein kann, wurde der Welt auf schreckliche Weise durch die Atombomben demonstriert, die auf Hiroshima und Nagasaki abgeworfen wurden. Deshalb sind alle modernen Kernkraftwerke so konzipiert, daß die Bevölkerung keiner gefährlichen Strahlung ausgesetzt wird.

Bei der Kernspaltung wird der Zerfall der Atomkerne gezielt eingeleitet, in der Natur erfolgt er bei schweren Kernen spontan. Zu Beginn der Existenz der chemischen Elemente vor 4,6 Mrd. Jahren waren die Kerne so gut wie aller Elemente instabil. Sie haben sich dann ständig umgruppiert und dabei Strahlung abgegeben, bis sie die heutige, weitgehend stabile Form gefunden haben.

Offenbar hängt die Stabilität von bestimmten Verhältnissen zwischen Neutronen und Protonen im Kern ab. Nur ein Viertel aller chemischen Elemente sind Reinelemente, haben also keine Isotope; alle anderen Elemente sind Isotopengemische. Isotope sind Kerne mit gleicher Protonenzahl und daher gleichem chemischen Verhalten, aber unterschiedlicher Masse. Durch die abweichende Anzahl der Neutronen im Kern sind diese weniger stabil. Bei der Kernspaltung werden Isotope erzeugt, die wie zur Entstehungszeit der chemischen Elemente instabil sind und ihren stabilsten Zustand erst finden müssen.

Es gibt vier verschiedene Umgruppierungsprozesse im Kern. Beim alpha-Zerfall stabilisiert sich der Kern, indem er ein alpha-Teilchen - bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen - ausstößt. Der beta-Zerfall ist auf dreifache Weise möglich: Der Kern kann ein Elektron oder ein Positron (positives Elektron) abstoßen oder ein Elektron aus der Elektronenhülle einfangen. Der Grund dafür ist häufig, daß sich ein Neutron in ein Proton umwandelt oder umgekehrt. Solche Umwandlungsprozesse regen in der Regel den Kern an, der die Anregungsenergie in Form von gamma-Strahlung abführt. Außerdem können bei einem Kernzerfall auch einzelne Neutronen oder Protonen weggeschossen werden.

Jeder Kernumwandlungsprozeß geht mit einer ganz bestimmten, für ihn typischen Energieabgabe einher. Eine Art, die Radioaktivität zu messen, ist, die Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeiteinheit festzustellen. Ein **Kernzerfall pro Sekunde entspricht einem Becquerel (Bq)**. Die dabei

Ehrlich streiten über Kernenergie

übertragene Energie mißt man in Gray (Gy). 1 Gy entspricht der Strahlung von 1 Joule pro Kilogramm bestrahlter Substanz.

Belebte Substanzen reagieren unterschiedlich auf die Strahlungsenergie der verschiedenen Strahlungsarten. Deshalb wird der Energie-Betrag mit einem in unzähligen Versuchen ermittelten Faktor multipliziert - der „relativen biologischen Wirksamkeit“. Man erhält dann als Äquivalentdosiswert 1 Sievert (Sv). Dies gibt die **Strahlungsintensität pro Zeit der Einwirkung an** - so mißt man die Jahresdosis in Millisievert (mSv/a)¹.

Man muß also grundsätzlich unterscheiden zwischen der akuten Strahlung in Bq, der übertragenen Energie in Gy und der (vom Menschen) aufgenommenen Strahlungsmenge in einer bestimmten Zeit in Sv. Die konkreten Schäden werden in Sievert (Sv) gemessen. **Für die Gefahren an einem aktuellen Ort sind die Bq und Gy das richtige Maß.**

Da ein Atom eines Stoffes nur einmal zerfallen kann, führt hohe Radioaktivität zu kürzerer Halbwertszeit und umgekehrt. Die Halbwertszeit ist die Zeit, in der die ursprüngliche Strahlungsintensität einer radioaktiven Substanz auf die Hälfte abgeklungen ist, weil bereits die Hälfte ihrer Kerne umgewandelt ist.

Die extrem kurze Halbwertszeit einiger extrem stark strahlender Stoffe führt dazu, daß die Radioaktivität des Reaktorinventars z.B. schon in den ersten Sekunden nach Abschaltung auf 4% der ursprünglichen Strahlung absinkt und nach 5 Stunden nur noch mit 1% der ursprünglichen Leistung strahlt. Es gibt schwachstrahlende Elemente mit extrem langen Halbwertszeiten - das Schwerelement Wismut z.B. hat eine Halbwertszeit von 2,5 Mrd. Jahren - , so daß man sich darüber streiten kann, ob es schon zu den instabilen Strahlern oder noch zu den stabilen Elementen zu rechnen ist.

I. Was macht die Radioaktivität gefährlich?

Radioaktivität bewirkt für die einzelnen Atome in der Materie, auf die sie trifft, entweder eine

¹ ein Sv entspr. 100 rem = den früheren Roentgen Equivalent Man. Die Jahresdosis mass man früher in Millirem per anno (mrem/a)

I. Was macht die Radioaktivität gefährlich?

- Ionisierung, diese verändert die Ladung des Atoms zu:
 - einem Elektronenüberschuß oder
 - einem Elektronenmangel

oder sie bewirkt

- eine Anregung, dabei bleibt die Ladung gleich, aber die Elektronen verändern ihren Energiezustand

In beiden Fällen sind die biochemischen Wirkungen gleich.

Lebende Körper bestehen aus höchst komplizierten Molekülen. Sie reagieren mitunter sehr empfindlich auf kleinste Veränderungen in der Anordnung einzelner Atome in diesen Molekülen. In den Genen sollen solche Anordnungen die Entwicklung und Eigenschaften der Zellen und der Körper beeinflussen oder gar bestimmen. Werden nun einzelne Atome in solchen empfindlichen Molekülketten ionisiert, können sie die Kette reißen lassen und die Anordnung der Atome im Molekül verändern. Aus lebenswichtigen Molekülen können so vielleicht sogar Giftstoffe werden. Auch Mutationen im Erbgut, die zu Mißbildung in der Nachkommenschaft führen, sind möglich, und es können Wucherungen ausgelöst werden, die zu Tumor- und Krebsbildung führen.

Solche Schäden sind bei den 80.000 stark verstrahlten Überlebenden der beiden Atombombenabwürfe in Japan aufgetreten und sehr intensiv untersucht worden. Diese Personen hatten über längere Zeiträume sehr hohe Strahlendosen von 1 bis 6 Sv erlitten. Auch an den Opfern früherer medizinischer Behandlungsmethoden ließen sich Strahlungsschäden beobachten. So hatte man vor 1952 Menschen, die an Rückenmark-Tuberkulose erkrankt waren, Radium gespritzt, das einzelne Knochen einer Strahlenexposition von 9 Sv aussetzte. In anderen untersuchten Fällen wurde zu Diagnosezwecken Thorium verabreicht, das die Leber mit über 10 Sv belastete. Nach dem leichtfertig verursachten Unfall in Tschernobyl am 26. April 1986 starben laut IAEA 47 Menschen (Rettungs- und Hilfskräfte) direkt und für weitere 4.000 Personen (lt. WHO) wurde in den kommenden Jahren ein verfrühter Tod aufgrund der Strahlenschäden erwartet. Die für ihre Konjunktiv-Terrorisierung der Bevölkerung bekannte Organisation Greenpeace spricht dagegen von 270.000 Geschädigten, von denen 97.000 durch Krebs früher sterben würden, der BUND von „Zehn-

Ehrlich streiten über Kernenergie

tausenden Toten“. Verlässliche Zahlen sind, wenn man den Behörden grundsätzlich misstraut, nicht bekannt. Die Wahrheit wird wohl irgendwo dazwischen liegen. Mit den Verletzten und Toten des Autoverkehrs (damals 5.000 bis 10.000 p.a. in Deutschland) sind dies vergleichbare Zahlen.

Aus diesen und vielen anderen Fällen gewann man statistische Werte über die Wirkung zu hoher Strahlendosen. Man baute einen deutlichen Sicherheitsfaktor ein und erhielt die Richtwerte der *Tabelle 1*: Es sind extrem hohe Dosiswerte

Tabelle 1: Auswirkung hoher Strahlenexposition

Sievert	Auswirkung
über 50	schwerste Erkrankung mit Tod innerhalb weniger Wochen
10	Erbrechen und Übelkeit in ein bis zwei Stunden, Tod innerhalb mehrerer Wochen wahrscheinlich
5,5 - 7,7	Erbrechen und Übelkeit in 4 Stunden, geringe Chance, sechs Monate zu überleben
4 - 5	etwa 50 % Überlebenschance
2,7 - 3,3	Überlebenschance bei 80%
1,8 - 2,6	verschiedene Symptome der Strahlenkrankheit (verändertes Blutbild, Veränderungen an Haut, Augen, höheres Krebsrisiko)
bis zu 2,6	einzelne Todesfälle möglich, aber Symptome der Strahlenkrankheit
unter 0,5	keine nachweisbaren Wirkungen

Heute mißt man dagegen in mSv - also in Tausendstel Sievert. Bei der „Reaktorkatastrophe“ in Harrisburg wurde die Umgebung z.B. durch 0,0012 mSv zusätzlich belastet.

Um selbst bei geringer Strahlung ein Gefährdungspotential anzugeben, wird die empirisch ermittelte Erkrankungswahrscheinlichkeit hoher Dosen rein rechnerisch auf niedrige umgeschlagen. Gäbe es z.B. bei einer Dosis von 10 mSv eine höhere Krebswahrscheinlichkeit von n Krebsfällen pro 10.000 Betroffenen, würde man bei 1 mSv mit einer Krebswahrscheinlichkeit von n/10 pro 10.000 Betroffenen rechnen. Auf diese Weise

II. „Erst die Dosis macht das Gift“

wurden z.B. die hohen Opferzahlen beim Reaktorunfall Tschernobyl errechnet, die tatsächlich aber nicht eingetreten sind.

II. „Erst die Dosis macht das Gift“

Dieses formale Hochrechnen von Opfern führt zu grotesken Übertreibungen, die noch heute durch die Medien und die Literatur der Kernkraftgegner geistern. Neben den Schäden bemerkte man jedoch schon bald nach Entdeckung der Röntgen- und Gamma-Strahlen *gesundheitsfördernde* Wirkungen der ionisierenden Strahlung im relativ niedrigen Energiebereich! Auch in den Atombombentestgebieten entdeckte man, daß zwar im Inneren des Testgebietes alles Leben weitgehend durch Strahlung zerstört worden war, sich aber etwas weiter entfernt nach einiger Zeit ein sogenannter Grüngürtel bildete: Hier wucherten Vegetation und Tierleben üppiger als sonst, so als wäre hier zusätzlich gedüngt worden.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden diese Erscheinungen an Pflanzen, Tieren und an betroffenen Menschen sehr intensiv studiert und die Ergebnisse in unzähligen Aufsätzen veröffentlicht. Es stellte sich heraus, daß eine um mehrere mSv (ca. 5-10 mSv) erhöhte Strahlendisposition Wachstumsprozesse anregt und den Stoffwechselprozeß der Zellen und die Photosynthese der Pflanzen verstärkt. Die Zellen werden sogar befähigt, ihre DNA- und RNA-Struktur sowie ihre Membrane zu reparieren. Seit Jahrhunderten ist die heilende Wirkung des Gasteiner Radonwassers bekannt und seit dem letzten Krieg die verstärkte Heilwirkung des Gasteiner Heilstollens in Österreich.

Eine leicht erhöhte Strahlung regt aber auch die Arbeit der T-Zellen an und stärkt so das Immunsystem. Sie beschleunigt Wundheilungen, macht widerstandsfähiger gegen Infektionen und vermindert deutlich das Auftreten von Herzkreislaufkrankheiten und sogar zahlreicher Formen von Krebs, darunter auch Leukämie, ohne daß dafür andere Schädigungen beobachtet werden konnten.

Wie ist dies zu erklären? Wohl damit, daß die natürliche Radioaktivität, als das Leben auf der Erde begann, im Durchschnitt noch zehnfach größer war als heute. Die ersten primitiven Zellen, die ihre Lebensenergie aus dem chemischen Stoffwechsel beziehen konnten, entwickelten sich

Ehrlich streiten über Kernenergie

also unter einer zehnmal höheren Strahlenexposition, als sie heute im Durchschnitt herrscht.

Ähnlich wie im Fall der Sonnenstrahlung führt erst ein Zuviel an Strahlung zu Schäden. Wie bei den meisten das Leben betreffenden Prozessen, kommt es auch bei der Strahlung auf die Dosis an. Erst eine hohe Dosis ionisierender Strahlung überfordert die Organismen, während geringe Dosen die meisten Organismen und Zellsysteme zu mehr Wachstum und Erneuerung anregen.

Diese Erkenntnis, bezogen auf die Wirkung von Giften, reicht bis in die Zeit des assyrischen Königs Sargon II. im 8. Jahrhundert v.Chr. zurück und wurde von Paracelsus im 16. Jh. verallgemeinert: In der Natur sei nichts giftig, meinte er: „Erst die Dosis macht das Gift.“

III. Natürliche und zusätzliche Radioaktivität

Im Hinblick auf die ionisierende Strahlung (Radioaktivität) wollen manche Menschen diese Einsicht nicht gelten lassen, weil sie angeblich „unnatürlich“ sei. Das Konzept des Strahlenschutzes geht deshalb - sicherheitshalber - davon aus, daß jegliche Strahlung schadet.

Dabei ist radioaktive Strahlung auf unserer Erde allgegenwärtig. Luft, Wasser, Boden, Pflanzen, Tiere, Menschen, unsere Nahrung, Gebäude und Werkzeuge - alles ist „von Natur aus“ radioaktiv. Die Ursache hierfür sind radioaktive Stoffe mit langen Halbwertszeiten im Erdboden, wie zum Beispiel Thorium und Uran und deren Spaltprodukte. Die durchschnittliche Strahlenexposition aus Boden und Gestein liegt bei 0,45 mSv.

Andererseits prasseln aus dem Weltall ständig schnelle, freie Atomkerne, einzelne Neutronen und Gamma-Strahlung auf unsere Atmosphäre. Sie zerschlagen Atome der Gasmoleküle, auf die sie treffen. Die Atomtrümmer schlagen dann wieder auf andere Atome und Moleküle, so daß sich bis zur Erdoberfläche ganze Kaskaden radioaktiver Isotope wie z.B. Kohlenstoff 14 oder Tritium (Wasserstoffkerne mit zwei zusätzlichen Neutronen) bilden.

Die Intensität dieser Höhenstrahlung nimmt mit zunehmender Höhe zu, sie verdoppelt sich alle 2000 m über Normalhöhe. Piloten, Vielflieger

III. Natürliche und zusätzliche Radioaktivität

und Bergsteiger erhalten dadurch eine beträchtlich höhere Strahlendosis als die Bewohner des tiefliegenden Flachlands. Die durchschnittliche Exposition durch die kosmische Strahlung liegt bei 0,3 mSv. Schließlich enthält auch unser Körper radioaktive Stoffe wie C_{14} und Kalium₄₀ mit 0,25 mSv.

Tabelle 2: Beispiele natürlicher Radioaktivität

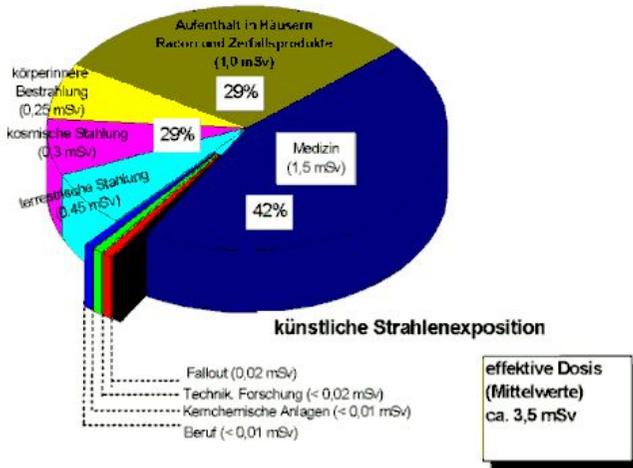
Strahler	in Becquerel (Bq)	Zur natürlichen Hintergrundstrahlung
1m ³ Luft im Freien	14	
1m ³ Luft in Gebäuden	50	
Trinkwasser	0,6 bis 4 /l (pro Liter)	
Heilwasser	bis 37.000 /l	
Fleisch, Gemüse, Brot, Milch	ca. 40 /kg (im Mittel)	
1 kg Gestein	1 300 (im Mittel)	
1 kg Kalidünger	14 000	

der eine Person ausgesetzt ist, kommt eine künstliche Strahlendisposition aus unterschiedlichen Quellen hinzu. Aus dem Baumaterial unserer Häuser erhalten wir etwa 1,0 mSv, durch medizinische und sonstige Behandlung, Fernsehen und ähnliches weitere 1,5 mSv.

Dem gegenüber fällt die zusätzliche Exposition durch kerntechnische Ereignisse - vom radioaktiven Niederschlag früherer Bombenversuche bis zur Auswirkung der Kernforschung und der Kernkraftwerke mit 0,07 mSv - für den Bundesbürger im Durchschnitt minimal aus. Physikalisch läßt sich ein Unterschied in der Wirkung zwischen natürlicher und künstlicher Radioaktivität weder feststellen noch denken.

Ehrlich streiten über Kernenergie

natürliche Strahlenexposition



Herkunft der durchschnittlichen Strahlen-Exposition in Deutschland

Die natürliche Radioaktivität auf der Erde ist nicht gleichmäßig verteilt. Die Energie der durchschnittlichen „natürlichen“ Bestrahlung (ohne den biologischen Wirkungsfaktor) liegt in unseren Breiten bei 1-3 mGy, doch lassen sich weltweit Schwankungen bis zum Hundertfachen feststellen (siehe *Tabelle 3*).

Die Menschen in den stark strahlenden Gebieten wurden ebenso wie Piloten oder Arbeiter in kerntechnischen Betrieben sehr intensiv untersucht. Dies ergab die oben erwähnten Hinweise auf die **lebensfördernde** Wirkung einer leicht erhöhten Strahlung.

Man sieht, daß die natürliche Strahlungsenergie in vielen bewohnten Gebieten teils sehr hohe Werte hat. Auch ist zu sehen, daß zum Beispiel wir in Europa durchaus zu wenig Strahlungsenergie aufnehmen, wenn man es mit dem Optimum von 100 mGy/a vergleicht.

Wenn man die über ein Jahr aufsummierte Strahlung betrachtet, stellt sich heraus, daß diese selbst bei besonders exponierten Personen deut-

III. Natürliche und zusätzliche Radioaktivität

Tabelle 3: Energiegehalt der natürlichen Hintergrundstrahlung

Region	mGy
China (niedrigste Bereiche)	1,3
USA (Durchschnitt)	2,0
Mitteleuropa (Durchschnitt)	3,3
Nil-Delta	3,5
Tschernobyl (an der Evakuierungsgrenze)	5,0
Kerala, Indien	4-23
Guarapara, Brasilien	10-18
Gerais, Brasilien	23
Araxi, Brasilien	35
Ramasar, Iran	243
Guarapara Strand	263

Die folgende Tabelle 4 zeigt die gleiche Hintergrundstrahlung in ihrer Wirkung auf ein Jahr hochgerechnet.

Tabelle 4: kumulierter Energiegehalt der Strahlung pro Jahr bei nicht stetiger Exposition

Expositionsfall	mGy/a
Vielflieger und Piloten	6-8/a
Arbeiter in kerntechnischen Betrieben	3,5/a
zulässiger Grenzwert für Nukleararbeiter	26/a
ermitteltes biologisches Optimum	100/a

lich unter dem biologischen Optimum liegt. Hier müsste eigentlich für zusätzliche Strahlungsenergie gesorgt werden, um das Optimum zu erreichen.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Die folgenden Darstellungen sollen die Wirkung der Belastung mit Strahlendosen beleuchten, denen wir von Natur aus und mit menschlichem Zutun ausgesetzt sind.

Die Werte der Tabellen gelten entweder für die tatsächliche Dosis oder für eine umgerechnete äquivalente Dosis. In den meisten Fällen wird die Jahresdosis in mSv angegeben. Bei einer Exposition, die nur selten oder einmalig auftritt, wird als Zeitraum die Dauer der jeweiligen Exposition angegeben. So sind bei den Atom-Bomben, -Versuchen oder -Unfällen die Expositionen auf das Jahr gerechnet zwar relativ niedrig, aber im kurzzeitigen Schadensfall oft weit höher als zulässig.

Zunächst sind in Tabelle 5 aktuell gültige Grenzwerte angegeben, die nicht überschritten werden dürfen und im Vergleich dazu Werte, bei denen wirklich bekannte Schäden eintreten.

Tabelle 5: Grenzwerte für ionisierende Strahlung

Bezugsfall	mSv/Jahr
neuer Grenzwert für Bevölkerung	1
nachweisbar höhere Krebsrate	500 in 3 Tagen
LD ₅₀ (tödliche Dosis, siehe Glossar)	5.000
Tödliche Dosis (10 Sv/a)	10.000

Tabelle 6 zeigt die typischen Jahres-Expositionen in Milli-Sievert für ausgewählte Gegenden unserer Erde. Es handelt sich dabei um im Sprachgebrauch als „natürlich“ bezeichnete Strahlung. Das bedeutet, daß die Strahlen nicht durch menschliche Handlungen ausgelöst sind.

Man sieht, daß Deutschland in einer besonders niedrigen Expositionszone unter 2 mSv pro Jahr liegt. Das für die meisten europäischen Länder. In anderen Ländern der Erde gibt es dagegen eine vielfach höhere Belastung. Aber selbst dort wird bisher nicht von besonderen Schäden berichtet.

Tabelle 6: Mittlere und maximale Expositions-dosis pro Jahr

III. Natürliche und zusätzliche Radioaktivität

Gebiet	Mittlere effektive Dosis in mSv/Jahr	Maximale Ortsdosis im Freien in mSv/Jahr
Deutschland	0,4	5
Indien Kerala, Madras	4	50
Brasilien Espirito Santo	6	800
Iran Ramsar	6	850

Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe

Tabelle 7: Ursachen und Wirkungen der Strahlung

Ursache	Effektive Dosis - Werte in mSv/Jahr	
	Mittelwert Bevölkerung	Wertebereich für Einzelpersonen
Medizinische Bestrahlungen	2,0	0,01-30
Körpereigene Strahlung	1,7	0,5-8
Terrestrische Strahlung	0,4	0,2-3
Kosmische Strahlung	0,3	0,3-0,5
Industrielle Tätigkeit	0,01	0,1 - 2
Tschernobyl Unfall	0,01	0,1-2
Kernwaffentests	0,005	0,005-0,04
Flugreisen	0,005	0,01-5
Fossile Energieträger	0,002	0,001-0,01
Kernkraftwerke	0,001	0,001-0,01
Industrieprodukte	0,001	0,1-30

Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe

In der Tabelle 7 sind die wichtigsten Verursacher der Strahlung mit ihrer Wirkung in Milli-Sievert aufgeführt. Dabei ist einmal der durchschnittliche Wert für die gesamte Bevölkerung gezeigt und daneben die Spanne von – bis, die auf einzelne Personen wirken kann.

Besonders deutlich wird hier, daß die vom bekannten großen Atomunfall in Tschernobyl ausgehende Strahlung bei uns im Jahreswert weit unter den ständig wirkenden Naturstrahlungen lag. Allerdings haben die einzelnen Menschen dort im engen Gebiet in der Ukraine und Weißrußland

Ehrlich streiten über Kernenergie

um den Unfallort eine viel stärkere Strahlung erlitten. Diese hat auch trotz ihrer kurzen Zeitdauer zu den bekannten Schäden geführt.

Selbst das Öko-Institut Freiburg schrieb dazu im Januar 2006:

Der mittlere Dosiswert der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland im Jahr 2003 beträgt 2,1 Millisievert (mSv) pro Jahr. Der mittlere Dosiswert der so genannten zivilisatorisch bedingten Strahlenexposition, zu denen auch die Auswirkungen von Tschernobyl gezählt werden, beträgt etwa zwei mSv pro Jahr, davon jedoch nur etwa 0,01 mSv durch den Unfall in Tschernobyl. Damit entspricht die Strahlenexposition durch den Reaktorunfall etwa 0,5 Prozent der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland im Jahr 2003.

Die folgende Tabelle 8 zeigt weitere Belastungsdosen in Milli-Sievert, die uns im täglichen Leben begleiten. Sie werden kritiklos hingegenommen. Es ist sogar wahrscheinlich, daß ihr Wegfall uns direkt schädigen würde. Und oft bewirkt eine Erhöhung schon eine bessere Gesundheit – wie seit 800 Jahren in Gastein, Österreich.

Dabei ist die durch den eigenen Körper verursachte Strahlung die weitaus höchste natürliche Strahlungs-Ursache. Ob die Gefahrengrenze nun bei 3 oder eher 15 mSv liegt, kann hier kaum abgeschätzt werden. Sie kann sogar noch höher liegen,

Tabelle 8: Natürliche Strahlenexposition in mSv pro Jahr

Im Einzelfall je Person in Deutschland	1,5 bis 12 je nach Ort
Mittlere Exposition je Person in Deutschland,	2,4
davon:	
kosmische Strahlung in Meereshöhe	0,3
Terrestische Strahlung von außen	0,4
Natürl. Radioaktive Stoffe in Nahrung und Körper	0,3

und wird nur von medizinischen Anwendungen übertroffen. Die meisten Menschen akzeptieren diese ohne Angst. Auch die behandelnden Ärzte haben aufgrund ihres Berufs-Ethos offenbar keine Bedenken, diese Strahlenexpositionen anzuwenden.

III. Natürliche und zusätzliche Radioaktivität

In den folgenden drei Tabellen sind nun die zusätzlichen Strahlungen aufgeführt, die von Menschen verursacht werden. Man muß sie auf die natürlichen oben drauf rechnen. Die Summe ergibt dann die gesamte Strahlen-Dosis, die dem Einzelmenschen quasi „verabreicht“ wird. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dauernden Einwirkungen wie zum Beispiel durch Fernsehen oder Rauchen oder aber einmaligen Einwirkungen, die zum Beispiel durch Urlaub oder Mahlzeiten entstehen. Schließlich sind - wie gesagt - die ärztlichen Handlungen zu sehen, die teils erhebliche Strahlendosen auslösen.

Bis auf diese beiden letzten Fälle kann man leicht sehen, daß die natürliche und die menschgemachte Strahlung **zusammen deutlich niedriger sind, als die Schadensgrenze.**

Man sieht, daß viele normale tägliche oder auch einmalige Entscheidungen des Menschen zu einer jährlichen Zusatzbelastung mit Strahlen führen, die im allgemeinen von den Menschen ohne Widerspruch akzeptiert sind.

Tabelle 9: Mensch-gemachte zusätzliche Strahlenexposition	in mSv pro Jahr
Leben in 0 bis 3 km Abstand von Kernkraftwerk in Deutschland	<0,0001
wenn man täglich 2 Stunden Fernsehen schaut	0,01
Erhöhung durch Umzug von Hamburg nach Garmisch-Partenkirchen.	0,2
für das Personal im KFZ Karlsruhe (Mittelwert im Jahre 1990)	0,22
für Bewohner in München durch Tschernobyl-Unfall (im Jahr 1987)	0,2 bis 0,5
tatsächliche Exposition der Mitarbeiter im Labor	1 bis 5
Umzug von Hamburg nach Bayer. Wald (Mittelwert 3 mSv/a)	1 bis 6
fliegendes Personal	bis 6
täglich 20 Zigaretten Rauchen bestrahlt die Lunge im Jahr mit	8

Das gilt auch für die meisten der Anlässe in Tabelle 10, die Ereignisse aufzählt, bei denen Menschen einmalig bestimmten Strahlendosen ausgesetzt sind. Viele dieser Anlässe sind im täglichen Leben vollständig akzeptiert und man spricht nicht über die damit verbundene Strahlen-Belastung. Sie wird oftmals überhaupt nicht wahrgenommen oder als völlig unwichtig übergangen.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Jemand der seinen Wohnort wechselt oder zum Urlaub ins Gebirge oder sogar ins Ausland fliegt, denkt nicht an einen Verzicht, auch wenn er über die Bestrahlung nachdenkt. Weil viele Menschen dies über Jahrzehnt folgenlos praktiziert haben, fühlt man sich sicher, daß eventuelle Schäden zu vernachlässigen sind.

Zwar ist eine **genaue** Grenze schon deswegen nicht zu definieren, weil die Bestrahlungs-Muster unendlich vielfältig sind. Die unteren Tabelleneinträge zeigen daher solche Fälle, die mit Sicherheit hoch gefährlich sind, aber fast nie vorkommen.

Nur die letzten zwei Einträge zeigen wirklich schädliche Belastungssituationen. Man sieht, daß selbst die Bewohner der geringer verstrahlten Gebiete um Tschernobyl nicht evakuiert wurden, weil man 160 mSV in 70 Jahren als unschädlich ansieht.

Die medizinische Versorgung erfordert heute in zunehmendem Umfang den Einsatz strahlender Isotope wie zum Beispiel Technetium (Tc99). Damit werden die Verläufe von Medikamenten in den Organen nach aussen sichtbar gemacht. Der Arzt kann so verfolgen, welchen Weg die Medikamente nehmen und wo sie sich in den Gefäßen oder Organen konzentrieren. Damit kann eine eventuelle Strahlentherapie gezielt auf Krankheitsherde, wie zum Beispiel Krebs, ausgerichtet werden.

Auch hier ist die Strahlendosis während der Behandlung wichtig. Ihr evtl. Schaden darf natürlich nicht höher sein, als die Krankheit selbst

<i>Tabelle 10: Mensch-gemachte zusätzliche Strahlenexposition über die gesamte Dauer des jeweiligen Ereignisses</i>	in mSv pro Fall
Besichtigung des KKW Gundremmingen	0,006
Verzehr von 100g Pilzen mit 4000 Bq/kg (Cäsium -137)	0,007
Urlauber aus Hamburg: 4 Wochen im Gebirge (2000 m)	0,02
1 Stunde in 2 Meter Abstand vom beladenen CASTOR	0,005 bis 0,040
Hin- und Rückflug Hamburg - New York	0,06
Urlauber aus Hamburg: 4 Wochen im Gebirge (3000 m)	0,07

IV. Übertriebene Angst vor Strahlung

Verzehr von 100g Paranüssen	0,07
Bergsteiger-Urlaub Nepal 4 Wochen	0,2
Wohnhaft in München von 1987 bis 2037 (kumuliert in 50 Jahren)	0,7 bis 2,5
3 wöchige Radonkur in Bad Gastein	8 je Kur
Summierte Exposition über 70 Jahre in den kontaminierten Gebieten der Ukraine / Weißrußlands, die nicht evakuiert wurden (lt. IAEA 1990)	80 bis 160
Nachweis einer erhöhten Krebsrate unter den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki (Kurzzeitbestrahlung während ca. 3 Tagen)	über 300
letale Dosis LD ₅₀ (Erklärung siehe unten im Glossar)	3.000 bis 5.000

<i>Tabelle 11:</i> Medizinische Strahlenanwendungen	
Behandlung	Organdosis während der Behandlung in mSv
Zahnaufnahme	0,01
Knochendichtemessungen	0,02
Schädelaufnahme	0,1
Mammographie	0,5
Brustkorbaufnahme	0,1
Schilddrüsen-Diagnostik durch Szintigramm	4
Computer Tomogramm Wirbelsäule	10
CT Brustkorb	20
CT Bauchraum	27
Organdosis bei Krebstherapie	30.000 bis 50.000

IV. Übertriebene Angst vor Strahlung

Die Unsichtbarkeit der Radioaktivität beunruhigt natürlich, doch diese Unsicherheit wurde durch die Medien ins Maßlose gesteigert. Sie versäumen keine Gelegenheit, durch reißerische Berichterstattung entsprechende Ängste in der Bevölkerung und Misstrauen in die zuständigen Überwachungsbehörden zu schüren. Die Erkenntnisse über die lebensfördernde Wirkung der Strahlung und die Barrieren, durch die sich auch die stärkste Strahlung abhalten läßt, kommen in der veröffentlichten Meinung kaum vor.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Die Journalisten sind dabei vielleicht selbst Opfer einer planvollen Kampagne, die in den 70er Jahren eingeleitet worden ist. Als einer ihrer Ursprünge läßt sich Ralph Nader in den USA ausmachen, der damals eine Organisation namens „Kritische Masse“ gründete, um die friedliche Nutzung der Kernenergie zu hintertreiben. Auf der Gründungsveranstaltung sprach die damals weltbekannte - inzwischen wegen Betrugs und Datenfälschung berüchtigte - Anthropologin Margret Mead darüber, wie man am wirkungsvollsten vorgehen könne.

Man solle, meinte sie, nicht nur mögliche tödliche Gefahren der Kernenergie beschwören, weil die Menschen einen plötzlichen Tod weitaus weniger fürchten als ein langsames Dahinsiechen. Mit der Drohung, bei niedriger Strahlendosis verschlechtere sich die Gesundheit allmählich und langwierig, ließe sich die Angst, die zum Widerstand gegen die friedliche Nutzung der Kernenergie führen kann, viel mehr und viel nachhaltiger entfachen. Man müsse „den Menschen das Gefühl vermitteln, mit der Kernenergie stehe alles auf dem Spiel, was ihnen in der Welt etwas bedeutet“. (Bericht über die Veranstaltung und Meads Rede siehe *Nuclear Light and Power* vom 24.3.1975)

I. Unnatürlich?

Teil 6: Das sogenannte Abfall-Problem

I. Unnatürlich?

II. Abfall?

III. Abfälle und Abfallmengen

VI. Vorbereitung zur Endlagerung

V. Endlager

Viele sagen: „Kernkraft dürfen wir nicht nutzen, weil das Abfallproblem nicht gelöst ist.“ Dieses Müllproblem hat drei Aspekte.

Zum einen ist in dem „Atom Müll“ Plutonium enthalten. Es ist als radioaktives Schwermetall giftig - wie auch das nicht radioaktive Blei - und sollte deshalb nicht in den Körper gelangen, auch wenn seine Giftigkeit in der Regel maßlos übertrieben wird. Zudem kann es zur Herstellung von Atomwaffen verwendet werden, weshalb es nach international geltendem Recht auch in Endlagern ständig bewacht werden muß.

Ein weiterer Grund zur Sorge ist, daß in den Abfällen radioaktives Material mit extrem langen Halbwertszeiten enthalten ist. Vor der ionisierenden Strahlung dieses Materials müsse die Biosphäre jahrtausendlang geschützt werden, und daß das auch wirklich geschieht, könne niemand vollständig garantieren, wird argumentiert.

Schließlich erfaßt viele Menschen ein Grauen, weil diese Stoffe angeblich so nicht in der Natur vorkommen, weshalb sie für manche geradezu die „Unnatürlichkeit“ der menschlichen Zivilisation verkörpern.

I. Unnatürlich?

Ehe wir die nuklearen Abfälle im einzelnen betrachten, wollen wir uns mit dem eher ideologischen Ablehnungsgrund der Unnatürlichkeit befassen. Die im Reaktor entstehenden Abfälle und selbst das Plutonium sind nämlich gar nicht so „unnatürlich“, wie mit entsprechender Sorgenfalte immer wieder behauptet wird.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Oklo liegt im afrikanischen Staat Gabun und weist eine unverhältnismäßig hohe „natürliche“ Hintergrundstrahlung auf. Schuld daran ist das Vorhandensein von Uranerz mit hoher Konzentration. Man schaute sich um und stieß in der Umgebung von Oklo auf sechs linsenförmige Uranerztafeln von je 10 bis 20 m Ausdehnung und einem Meter Dicke. Sie wiesen eine ungewöhnlich hohe Urankonzentration von 60% auf.

Zur Enttäuschung ihrer Entdecker - der französischen Kolonialherren - stellte sich aber bald heraus, daß dieses Uranerz nur halb so viel spaltbares Uran₂₃₅ - nämlich nur 0,35% - enthielt wie gewöhnliches Uranerz (meist Uran₂₃₈). Natürlich wollte man wissen, wie es dazu kam, da der Anteil von Uran₂₃₅ im natürlichen Uranerz keiner Willkür, sondern dem Naturgesetz der Halbwertszeit beim Zerfall radioaktiver Kerne unterliegt.

In den Urantafeln stieß man bald auf Spaltprodukte, die wegen ihrer Zusammensetzung und nach den Zerfallsgesetzen für radioaktive Kerne vor etwa 1,8 Mrd. Jahren entstanden sein mußten. Uran₂₃₅ zerfällt schneller als Uran₂₃₈. Man rechnete nach und stellte fest, daß das Uran vor 1,8 Mrd. Jahren wenigstens 3% Uran₂₃₅ enthalten haben mußte. Wenn damals, was offensichtlich der Fall war, genug Wasser in der Umgebung der Lagerstätten vorhanden war, dann waren die Bedingungen für „natürliche“ Kettenreaktionen und Kernspaltungen gegeben. Vor 1,8 Mrd. Jahren gab es an dieser Stelle offenbar einen „natürlichen“ Kernreaktor, der etwa 100.000 Jahre lang in Betrieb war. Der Beweis dafür liegt in Form des stabilen Elements Ruthenium₉₉ vor, das sich allmählich aus dem radioaktiven Spaltprodukt Technetium₉₉ gebildet hat.

Ob die Tatsache, daß es in der Natur tatsächlich „natürliche“ Kernreaktoren gab, die Sache für die Kernkraftgegner erträglicher macht, ist fraglich. Daß auch in anderen Gegenden mit extrem hoher natürlicher Hintergrundstrahlung ähnliche Prozesse abgelaufen sein könnten, hilft da vermutlich ebenso wenig wie das allgemeine Wissen, daß die Erdwärme, die in alternativen Geothermie-Kraftwerken genutzt werden soll, zum großen Teil aus dem natürlichen Zerfall natürlich vorkommender radioaktiver Isotope wie Kalium, Uran oder Thorium im Erdinneren stammt. Auch die Sonne, der riesige Fusionsreaktor am Himmel, hat die friedliche Nutzung der Kernenergie für Kernkraftgegner nicht „natürlicher“ oder akzeptabler gemacht.

II. Abfall?

Für die Forscher hatte diese Entdeckung einen weitergehenden Reiz. Sie konnten nämlich vor Ort untersuchen, was geschieht, wenn man radioaktive Spaltprodukte völlig ungeschützt im Boden vergraben würde. Mutter Natur hatte hier ja ein „Langzeitexperiment“ zur Lagerung des Atom­mülls durchgeführt. Tatsächlich wurden die nichtflüchtigen Spaltprodukte nicht durch den Sandsteinboden von Oklo hindurch ins Grundwasser geschwemmt, und sie haben sich auch nicht weiter verbreitet. Sie liegen noch immer dort, wo sie vor 1,8 Mrd. Jahren entstanden waren. Doch das soll kein Argument dafür sein, feste, radioaktive Spaltprodukte einfach vor Ort zu vergraben.

II. Abfall?

Ungelöst ist das „Entsorgungsproblem“ keineswegs. Aber schon der Begriff Abfall ist unzutreffend und tendenziös. Abfall ist etwas, das nicht mehr gebraucht wird. Radioaktive Strahler werden aber in unzähligen industriellen und medizinischen Anwendungen (Nuklearmedizin) gebraucht. Zur Zeit werden jährlich 5 Tonnen (t) des nicht radioaktiven Elements Kobalt₅₉ in Kernkraftwerken zum radioaktiven Kobalt₆₀ gebrütet, weil man es unter anderem in der Medizintechnik benötigt. Man könnte statt dessen ebensogut auf Cäsium₁₃₇ oder Technetium₉₉ und anderes aus dem sogenannten Abfall zurückgreifen, wenn man diesen aufbereiten wollte.

Man entdeckt heute ständig neue nützliche Einsatzmöglichkeiten ionisierender Strahlen und dementsprechend auch für radioaktives Material. In Deutschland wird z.B. noch immer der Klärschlamm verbrannt und dabei viel Energie verschwendet, um die darin enthaltenen gefährlichen Krankheitserreger und sonstige Mikroben abzutöten. Daß so etwas sehr wichtig ist, wurde nicht erst durch den BSE-Skandal allgemein bewußt. Bisher wird nur in München der Klärschlamm mit Radionukliden aus „radioaktivem Abfall“ mit Erfolg sterilisiert. Das spart nicht nur Energie, sondern macht den Schlamm, nachdem zuvor unerwünschte Schwermetalle abge­sondert wurden, zu einem guten Düngemittel und Bodenverbesserer. In 36 Nationen werden luftdichtverpackte Nahrungsmittel mit ionisierenden Strahlen haltbar gemacht, statt sie - wie in Deutschland - mit oft bedenklichen chemischen Zusätzen zu konservieren. Aus dem nuklearen Abfall lassen sich sogar langlebige elektrische Batterien herstellen, die z.B.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Menschen zur Stromversorgung ihrer Herzschrittmacher eingepflanzt werden.

Es gibt also tausend und drei Verwendungsmöglichkeiten für solche „Abfälle“. Im „Atommüll“ sind wertvolle Rohstoffe enthalten - für denjenigen, der sie zu nutzen weiß. Die Sorge der Kernkraftgegner scheint jedoch dahin zu zielen, die „Abfälle“ möglichst so wegzustecken, daß diese Nutzungsmöglichkeiten für alle Zeiten unterbunden bleiben.

III. Abfälle und Abfallmengen

Man sollte sich diese Abfälle also näher ansehen. Zunächst fallen zwei sehr verschiedene Arten nuklearer Abfälle an. Man unterscheidet die Betriebsabfälle und die abgebrannten Brennstäbe. Zu den Betriebsabfällen gehören alle Dinge, die mit ionisierender Strahlung in Berührung kamen und dabei „kontaminiert“ wurden. Dazu gehören Putzlumpen, Arbeitskleidung, aber auch ausgewechselte Rohrleitungen und dergleichen. Des weiteren gehören Filtrerrückstände aus dem Kühlmittelkreislauf und ähnliches dazu.

In einem Kraftwerk vom Typ Biblis (mit 1.300 MW Leistung) fallen pro Jahr etwa 330 m³ solcher Betriebsabfälle an. Sie werden, so weit sie nicht schadlos wiederverwendet werden können, zuerst getrocknet und verbrannt, dann mit Zement vermischt in Fässer abgefüllt und in unterirdische Kavernen abgestellt. Es handelt sich um schwach- bis mittelaktive Abfälle, die keine Eigenwärme entwickeln. Sie bilden etwa 95% aller nuklearen Abfälle mit einem Aktivitätsanteil von etwa 1% am gesamten Nuklearabfall.

Nur 5% der Abfallmenge entfallen auf die Brennelemente. Sie sind hochradioaktiv und entwickeln selbst Abwärme. Sie stellen 99% der Radioaktivität.

Weltweit werden pro Jahr in Kernkraftwerken etwa 340 Gigawatt (GW) elektrische Leistung erzeugt. Dabei entstehen aus dem Abbrand jährlich etwa 9.000 t hochradioaktiver Abfälle, vor deren Strahlung Lebewesen

III. Abfälle und Abfallmengen

geschützt werden müssen.² Weil nicht genügend Wiederaufbereitungsanlagen vorhanden sind, wird etwa nur die Hälfte des Brennstoffs wieder aufbereitet. Auf diese Weise haben sich bis zum Jahr 2.000 etwa 200.000 t hochradioaktiver Abfälle angesammelt³. Hinzu kommen als Folge der Abrüstung etwa 250 t Waffenplutonium und etwa 1.000t hochangereichertes Waffenuran, falls man es nicht in Kernkraftwerken „verbrennt“. Man kann sich eine Vorstellung über die Menge machen, wenn man bedenkt, daß in Gorleben ein Endlager für eine Million Kubikmeter Abfall vorgesehen war - eine Menge, die sich aus der Stromerzeugung von 2.500 GW-Jahren ergibt. Die im folgenden genannten Abfallmengen beziehen sich auf die Jahresproduktion eines Reaktors vom Typ Biblis B. Jährlich fallen hier 33 t abgebrannter Brennstäbe an, das sind rund 5m³ hochradioaktiver Abfälle.

Der größte Teil der abgebrannten Brennstäbe besteht allerdings noch immer aus Kernbrennstoff, der bei geeigneter Wiederaufbereitung weiter verheizt werden könnte. Von dem Uran₂₃₅, dem eigentlichen Brennstoff, ist in den abgebrannten Brennelementen noch etwa ein Viertel der ursprünglichen Menge vorhanden - 31 t sind wieder als Brennstoff verwendbares Uranoxid. Potentieller Nuklearbrennstoff sind auch die 301kg Plutonium, die aus Uran₂₃₈ gebrütet wurden. 1,35t Abfall stammt aus dem Strukturmaterial der Hüllrohre und ist weniger problematisch.

Das gilt nicht für die 39 kg sonstiger Transurane (das sind Kerne, die schwerer sind als Uran und durch Neutronen-

Einfang entstehen) und Spaltprodukte, die zum Teil sehr starke Strahler sind, dafür aber nur eine verhältnismäßig kurze Halbwertszeit haben. Ihre Strahlung verklingt also in relativ kurzer Zeit.

² H. Lengeler: Nuclear Waste Transmutation using High-Intensity Proton Linear Accelerators, Report CERN AT/93 DI Genf 1993.

³ N. Candelli et al.: PAGIS-Performance, Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste, Report EUR 11775 EN, 1988.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Zielsetzung der Wiederaufarbeitung: Spaltstoffrückführung

- Ein frisches Brennelement (LWR) enthält ca. 500 kg Uran

Nach Bestrahlung*:



Grobe Aufteilung der Bestandteile eines abgebrannten Brennelements

Unter den „Abfällen“ befinden sich aber auch Spaltprodukte und Transurane⁴ mit einer mitunter sehr langen Halbwertszeit - die dafür allerdings auch schwächer strahlen. Diese (je nach Einstellung) „Wertstoffe“ oder „Abfälle“ bilden den Haupteinwand gegen die friedliche Nutzung der Kernenergie.⁵

In der Tabelle 12 ist die Jahresproduktion der langlebigen Spaltprodukte einschließlich des Plutoniums bei einem Reaktor vom Typ Biblis B aufgeführt. Es entstehen dort dreizehn

Tabelle 12: Isotopen - Jahresproduktion eines Reaktors			
Element	Isotop	Halbwertszeit in Jahren	Masse in kg
Jod	J-129	$1,57 \times 10^7$	5,9

⁴ K. Kugeler, P. W. Philippen: *Energietechnik*, Springer-Verlag Berlin, 1992.

⁵ Siehe Anm. 2

III. Abfälle und Abfallmengen

Neptunium	Np-237	2,14 x 10 ⁶	14,3
Plutonium	Pu-242	3,76 x 10 ⁵	15
Technetium	Tc-99	2,10 x 10 ⁵	26,7
Plutonium 239	Pu-239	24.110	176
Americium 243	Am-243	7.370	1,4
Plutonium 240	Pu-240	6.550	73
Americium	Am-241	433	17,3
Plutonium ₂₃₈	Pu- ₂₃₈	87,8	4,7
Cäsium 137	CS-137	30,2	
Strontium 90	Sr-90	28,8	
Curium	Cm-244	18,1	0,3
Plutonium 241	Pu-241	14,4	27

verschiedene Elemente bzw. Isotope, die eine Halbwertszeit von über 14 Jahren haben. Das bedeutet, daß ihre Strahlung erst nach dieser Zeit auf die Hälfte vermindert ist. Einige davon bleiben sogar viele Zehntausende Jahre radioaktiv, bevor sie sich quasi zur Hälfte „verbraucht“ haben. Für diese Stoffe sucht man nach geeigneten Lagerstellen, um sie unschädlich aufzubewahren.

Der Rest der verschiedenen Isotope zerfällt rascher und stellt daher kein Endlagerproblem dar.

Manche dieser Stoffe sind aber kein Abfall sondern höchst wertvolle Rohstoffe.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß eine säuberliche Trennung zwischen den wieder verwendbaren Brennstoffen, den langlebigen und den rasch zerfallenden Strahlern die Abfallmenge für die lange Endlagerung beträchtlich vermindern würde. Bei der Wiederaufbereitung, bei der die

Ehrlich streiten über Kernenergie

Trennung vorgenommen wird, entstehen jedoch erneut niederaktive Abfälle ohne eigene Wärmeerzeugung - nach dem derzeitigen Stand etwa das Sechzigfache der zu trennenden hochradioaktiven Abfälle.

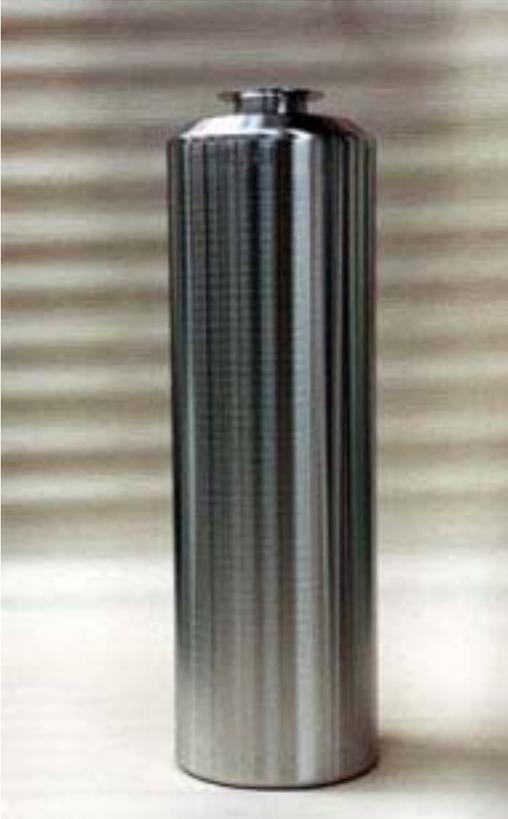
VI. Vorbereitung zur Endlagerung

Die niederaktiven Sekundärabfälle werden, wie gesagt, verbrannt, eingedickt oder sonstwie verdichtet und dann in Fässer einzementiert. Bis sich das Zementgebände aufgelöst hat, ist ihre Radioaktivität verklungen.

Die hochradioaktiven Abfälle werden zunächst über zehn Jahre in sogenannten Abklingbecken gehalten, in denen sie ihre Wärme an das Wasser der Becken abgeben. In dieser Zeit büßen sie bereits einen Großteil der Radioaktivität aus Spaltprodukten mit kurzer Halbwertszeit ein. Nach dieser Zeit werden sie im günstigsten Fall wiederaufbereitet. Dazu werden sie mechanisch zerkleinert und dann in Säure aufgelöst, wobei die verwendbaren Kernbrennstoffe von den Abfällen getrennt und zusammen mit dem Plutonium wieder zu sogenannten Mischoxyd-Brennelementen (MOX) verarbeitet werden.

Einem zu diesem Zweck in Hanau für 2 Mrd. DM (rund 1 Mrd. Euro) errichteten Werk versagten die politisch Verantwortlichen nach der Fertigstellung nicht nur die Betriebsgenehmigung sondern auch den Verkauf an ausländische Interessenten. Die ungenutzten Abfälle werden nun ebenfalls konzentriert und dann entweder zu Glas verschmolzen oder zu speziellen, sehr haltbaren Keramiken verbacken. In dieser Form sind die hochradioaktiven Spaltprodukte kaum mehr zurückzugewinnen.

VI. Vorbereitung zur Endlagerung



Kokille verglaster radioaktiver Abfälle

In den Glas- oder Keramikblöcken entwickelt sich weiter Wärme, die in oberirdischen Lagern weitere zehn bis zwanzig Jahre kontrolliert luftgekühlt abklingen darf. Dann erst erhalten die Kokillen einen dichten Mantel aus Edelstahl und werden ins Endlager verbracht. Wegen der Abklingdauer gab es bisher keine Eile, das Endlagerproblem „zu lösen“. Aber diese Tatsache dient manchen als Vorwand, auf die „Unverantwortlichkeit“ der Kernkraftnutzer zu schimpfen.

Wer - aus welchen Gründen auch immer - auf die Wiederaufbereitung verzichten will, tritt für die „direkte Endlagerung“ ein. Hierzu sind aus offensichtlichen Gründen wesentlich größere Lagerkapazitäten erforderlich. Im Fall der direkten Endlagerung werden die Brennelemente - nach-

Ehrlich streiten über Kernenergie

dem sie den Abklingbecken und dann dem Zwischenlager entnommen wurden, in denen ihre Wärmeentwicklung auf ein erträgliches Maß zurückgegangen ist - in dickwandige, aus einem Stück gefertigten Stahlbehälter (Kastoren) verpackt und ins Endlager verbracht.

Die „direkte Endlagerung“ erweist sich bei den gegebenen, niedrigen Rohstoffpreisen als halb so teuer wie die Wiederaufbereitung. Dabei wird jedoch der Nutzen sonstiger verwendbarer Spaltprodukte und vor allem der größere Bedarf an Lagerraum über unabsehbar lange Zeiträume nicht berücksichtigt. Auch die geringere „Sicherheit“ dieser Lösung scheint keine Rolle zu spielen. Das hierin enthaltene Plutonium muß in diesem Fall nach internationalem Recht ständig bewacht werden.

V. Endlager

Über die beste Form des Endlagers gibt es unterschiedliche Grundannahmen. Man streitet sich, ob es besser sei, das Endlager kaum erreichbar tief unten im Boden oder noch in erreichbarer Nähe weiter oben anzulegen. Bei der oberflächennahen Ablagerung fürchtet man, daß das Lager mit der Zeit vergessen und durch Erosion einmal freigelegt werden könnte. Im Wesentlichen sind es wohl „psychologische“ Gründe, die für ein tiefgelegenes Endlager sprechen.

Auch welche Umgebung die bessere sei, ist umstritten. Die einen meinen, Urgestein (Granit oder Gneis) sei der beste Einschluß. Dem halten andere entgegen, daß diese Felsen durch Spalten, durch die Wasser dringen kann, zerklüftet seien. Sie bevorzugen dagegen Ton oder Schiefer, weil sie relativ wasserdicht und verformbar sind und den Geschiebedruck aufnehmen können. Im Hinblick auf Erdgeschiebe ist auch Steinsalz plastisch. Es hat dazu noch den Vorteil, daß sich Steinsalz nur dort halten kann, wo es nicht durch Grundwasser aufgelöst wird. Diesem Vorteil widersprechen andere. Sie verweisen nicht nur auf die raschere Korrosion der Behälter im Salz, sondern auf die Subrosion (Abtrag des Salzes) hin, die nach heutiger Kenntnis bei 0,04 mm im Jahr liegt. Schließlich befürchten sie einen massiven Laugenangriff. In geologischen Zeiträumen sei nicht auszuschließen, daß es zu Wassereinbrüchen kommt, die den Salzstock, auch wenn er sich bisher schon über Jahrtausende gehalten hatte, schließlich auflösen und dabei das Lagergut freilegen.

In Zukunft Kernfusion

Würde dieser Laugenangriff sofort eintreten, nachdem das Lager gefüllt und verschlossen wurde, würde es immer noch Jahrtausende dauern, bis die Stahlbehälter zerfressen sind, das verglaste radioaktive Material würde aber auch dann kaum ins Grundwasser geraten. Man hat aufgrund vielfältiger ungünstiger Annahmen die sich aus einem solchen Unfall ergebende maximale effektive Strahlenbelastung des Grundwasser errechnet. Es würde im kritischen Fall etwa ein Hundertstel bis ein Tausendstel der mittleren natürlichen Dosisbelastung von etwa 2,4mSv/a aufnehmen.

Endlager halten auch bei gewaltigen äußeren Einwirkungen das radioaktive Material ausreichend lange fest, daß keine nennenswerte zusätzliche Dosisbelastung auftritt. Die Herstellung der Endlager und ihre Überwachung ist bekannte und vielfach erprobte Bergbautechnik. Der Einlagevorgang ist ebenfalls einfach und wird vielfach schon gehandhabt. Im Fall des „Naturrektors“ von Oklo blieben die radioaktiven Stoffe auch ohne künstliche Behältnisse und Schutzvorrichtungen 1,8 Mrd. Jahre sicher an Ort und Stelle. Trotzdem stoßen die Endlager auf große Vorbehalte, weil sie wegen der langen Zeiträume scheinbar unzumutbare Unwägbarkeiten bergen könnten.

Daher ist mit dem Endlager noch nicht das letzte Wort über die Nuklearabfälle gesprochen. Eine weitergehende Antwort auf das Abfallproblem wäre die Transmutation, auf die wir in einem späteren Beitrag noch eingehen.

Teil 7: Fusion

In Zukunft Kernfusion

Eine endgültige Lösung des Energieproblems wird wohl erst die Kernfusion mit ihren vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten bringen. Ein Liter Meerwasser enthält theoretisch Fusionsbrennstoff mit einem Energiegehalt von 7000 Tonnen Steinkohleeinheiten, eine nahezu grenzenlose Menge. Zur Nutzbarmachung dieser Energie dienen sogenannte Fusionsreaktoren, in denen die Fusion leichter Atomkerne kontrolliert ablaufen soll. Kernfusion hat gegenüber der Kernspaltung den Vorteil eines nahe-

Ehrlich streiten über Kernenergie

zu unbegrenzten Brennstoffvorrats, höherer Anlagensicherheit (keine Nachwärme bei Abschaltung) und weniger radioaktiver Abfälle mit nur kurzen Halbwertszeiten. In der Hoffnung, den künftigen Energiebedarf mittels der Kernfusion decken zu können, arbeiten die größeren Industrieländer seit den 1960ern an der Entwicklung der erforderlichen Technologien. Hierbei ergeben sich sehr große Schwierigkeiten

Bei der **Kernfusion** werden zwei negativ geladene Atomkerne zu einem neuen Kern „verschmolzen“. Bekanntlich setzen sich Atomkerne aus Neutronen und Protonen zusammen, die in den einzelnen Elementen unterschiedlich stark aneinandergebunden sind. Bei einer Vergrößerung der Kerne (Fusion) beziehungsweise Verkleinerung (Spaltung) kommt es zur Umordnung der Kernbestandteile und dabei wird bei der Verschmelzung kleiner Kerne bis zur Massenzahl 56 (Eisen) Energie frei. Das gleiche geschieht umgekehrt bei der Spaltung größerer Kerne bis zu diesem Minimum.

Damit es zur Verschmelzung von Kernen kommen kann, müssen sich die beiden positiv geladenen Ausgangskerne aufeinander zubewegen. Da sich gleiche Ladungen abstoßen und die Abstoßung mit zunehmender Nähe zunimmt, stellt diese elektrostatische Coloumb-Barriere ein schwierig zu überwindendes Hindernis der Fusion dar. Erst wenn sich die Kerne auf etwa 10^{-13} cm, den Durchmesser eines Protons, einander angenähert haben, sorgt die „Starke Kernbindungskraft“ für die Verschmelzung der Kerne. Sollen die Kerne die Coloumb-Barriere quasi aus eigener Kraft überwinden, müssen sie mit hoher Geschwindigkeit direkt aufeinanderprallen. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie mit dieser Geschwindigkeit genau aufeinandertreffen hängt von ihrer hohen Wärmebewegung (von über 100 Mio. Kelvin) und einer relativ hohen Dichte (hohem Druck) ab. Allerdings führt auch dann nur etwa eine von tausend Teilchenstößen zu einer Fusionsreaktion, da der elastische Streuquerschnitt um mehrere Größenordnungen über dem Fusionsquerschnitt liegt. Bei dem sehr hohen Innendruck der Sonne (von etwa 100 Mrd. Atmosphären) genügt schon eine kinetische Energie der Teilchen von 15 Mio. Kelvin um Fusionen auszulösen.

In Zukunft Kernfusion

Nach den Gesetzen der Mechanik würden selbst Druck und Temperatur im Innern der Sonne nicht ausreichen, um die Coulomb-Barriere zu überwinden.⁶ Dass die Sonne wie andere Sterne trotzdem einen großen Teil ihrer Energie aus der Fusion leichter Kerne bezieht, wird durch ein quantenmechanisches Phänomen möglich, das Tunneleffekt genannt wird und zu einem gewissen Grad das Unterlaufen der Coulomb-Barriere möglich macht. Mit der Zündung der ersten Wasserstoffbombe Ivy Mike im Eniwetok-Atoll am 1. November 1952 wurde der Beweis dafür erbracht, dass auf der Erde durch Kernfusion große Energiemengen freigesetzt werden können.

Die Teilchen, die nach den Berechnungen der Physiker sowohl den geringsten Widerstand gegen ihre Fusion als auch die größte Energieausbeute bieten, sind Deuterium und Tritium. Das Fusionsergebnis wäre ein Heliumkern mit der kinetischen Energie von 3,5 MeV und ein Neutron mit 14 MeV Eigenenergie. Beide Fusionsprodukte sind nicht radioaktiv. Deuterium, ein Wasserstoffkern aus einem Proton und einem Neutron, ist zu etwa 0,015 % im natürlichen Wasser enthalten. Tritium, ein Wasserstoff-Isotop aus einem Proton und zwei Neutronen, ist ein instabiler (radioaktiver) Kern mit der Halbwertszeit von etwa 12,3 Jahren und kommt daher in der Natur fast nicht vor. Es entsteht in Kernspaltreaktoren, die mit Schwerem Wasser (Deuterium) moderiert werden oder es kann aus Lithium erbrütet werden.

Die Kernfusionstechnologie arbeitet daran, die hohen Temperaturen und Drücke zu erreichen, die ein Fusionsfeuer ermöglichen. Ist dieses entzündet, hofft man, dass die freiwerdende Fusionsenergie, z.B. des Helium-Kerns, das Fusionsfeuer aufrecht erhält, während das schnelle Neutron die Entnahme von Nutzenergie ermöglicht. Das Problem der Kernfusion ist die Erzeugung und Handhabung der zur Fusion erforderlichen extrem hohen Zündtemperaturen bei einer ausreichenden Dichte des heißen Gases. Kein Kesselmaterial würde einer solch hohen Temperatur standhalten, außerdem würden heiße Atome, wenn sie mit dem Material einer Kesselwand in Berührung kommen, sofort abgebremst werden, also ab-

⁶ Wolschin, G.: Thermonuclear Processes in Stars and Stellar Neutrinos, in: Castell, L.; Ischebeck, O. (Hrsg.): Time, Quantum and Information, Part II, pp. 115-134. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2003.

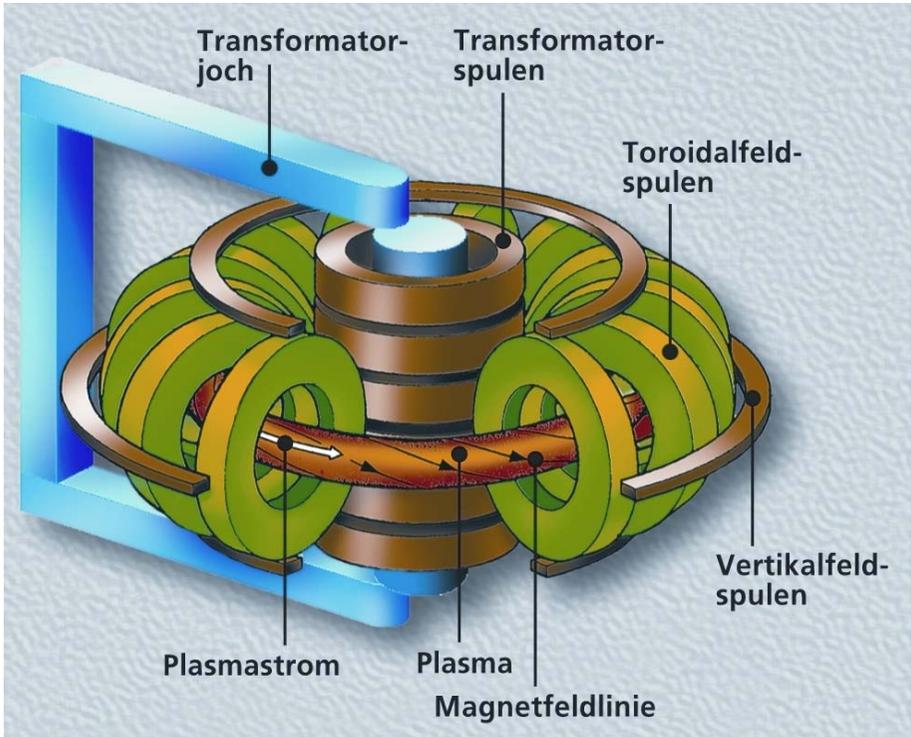
Ehrlich streiten über Kernenergie

kühlen. Die Lösung bietet ein Naturgesetz. Bei Temperaturen bis zu 10.000 °C nimmt die kinetische Energie der Kerne so zu, dass sie sich von ihren Elektronen lösen. Es entsteht ein sogenanntes Plasma. Da die Kerne ohne ihre Elektronen elektrisch geladen sind, lassen sie sich durch starke elektromagnetische Felder einschließen und von dem Material der Außenwände fernhalten. Eine Kettenreaktion, ein „Durchgehen“ des Fusionsreaktors ist daher nicht möglich, weil das Fusionsfeuer beim Abschalten der Magnete sofort erlischt. Es wäre auch deshalb nicht möglich, da die Endprodukte selbst die Fusion nicht in Gang setzen. Dazu müssen bei aufrecht erhaltenem Druck und der entsprechenden Temperatur stets Verunreinigungen und Fusionskerne entfernt und neuer Brennstoff zugeführt werden.

Zur Nutzung der Fusionsenergie wurden unterschiedlichste **Reaktorkonzepte** entwickelt. Die internationale Zusammenarbeit hat sich auf zwei verwandte Reaktortypen geeinigt, nämlich auf Reaktoren nach dem Tokamak- und dem Stellarator-Prinzip. In beiden Fällen wird das Plasma durch Magnete um eine ringförmige Kammer (Torus) zusammengepresst und durch verschiedene Systeme von außen zusätzlich aufgeheizt.

Beim **Tokamak** wird wie bei einem Transformator im Plasma eine starke elektrische Strömung induziert. Dieser zwingt die Bewegung der geladenen Kerne auf die im Inneren des Torus verlaufenden Magnetlinien und kann sie bis auf maximal 15 Mio Kelvin beschleunigen. Ab dieser Temperatur sinkt der elektrische Widerstand des Plasmas gegen Null, so dass durch einen stärkeren Stromfluss keine weitere Aufheizung erfolgen kann. Der Nachteil des Tokamak-Prinzips besteht darin, dass sich die erforderlichen hohen Ströme im Plasma aufgrund der Eigenschaften der Magnete des Transformators nur in kurzen Pulsen induzieren lassen, was einem stetigen Dauerbetrieb zunächst widerspricht.

In Zukunft Kernfusion

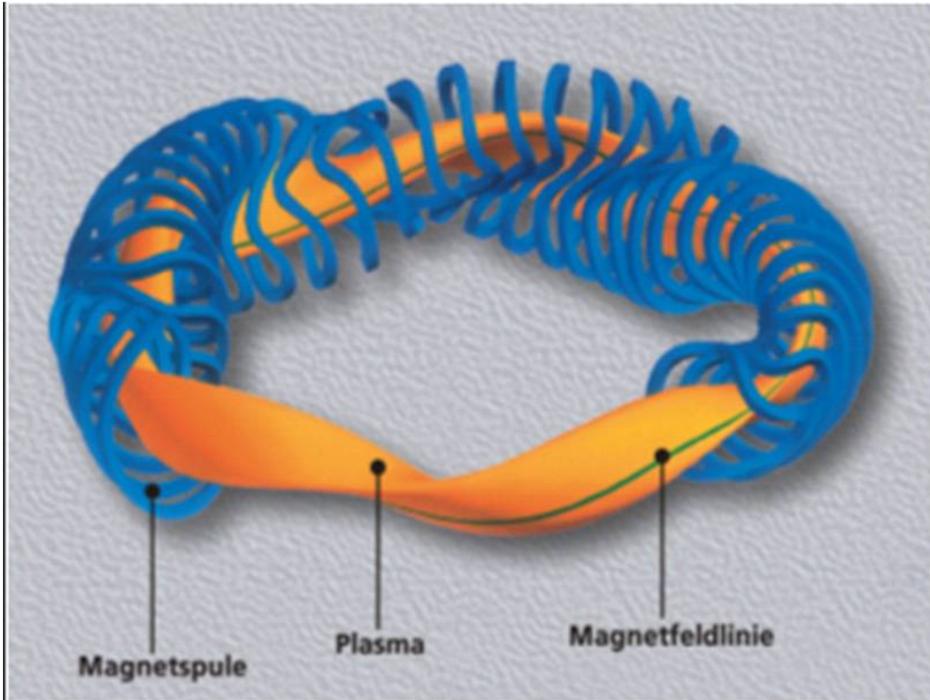


Tokamak-Schema

Beim **Stellarator** verzichtet man deshalb auf den im Plasma induzierten Strom. Um das Plasma stabil einschließen zu können, ist dafür eine wesentlich komplexere Anordnung der Einschlussmagnete erforderlich.

Die Schwierigkeit das Plasma trotz gewaltiger supraleitender Magneten von der Gefäßwand fernzuhalten zwang zu immer größer dimensionierten Anlagen. Den Nachweis, ein Kraftwerk nach dem Tokamak-Prinzip betreiben zu können, will die größte Tokamak Anlage, die zur Zeit von vielen Staaten gemeinsam als ITER in Südfrankreich gebaut wird, erbringen.

Ehrlich streiten über Kernenergie

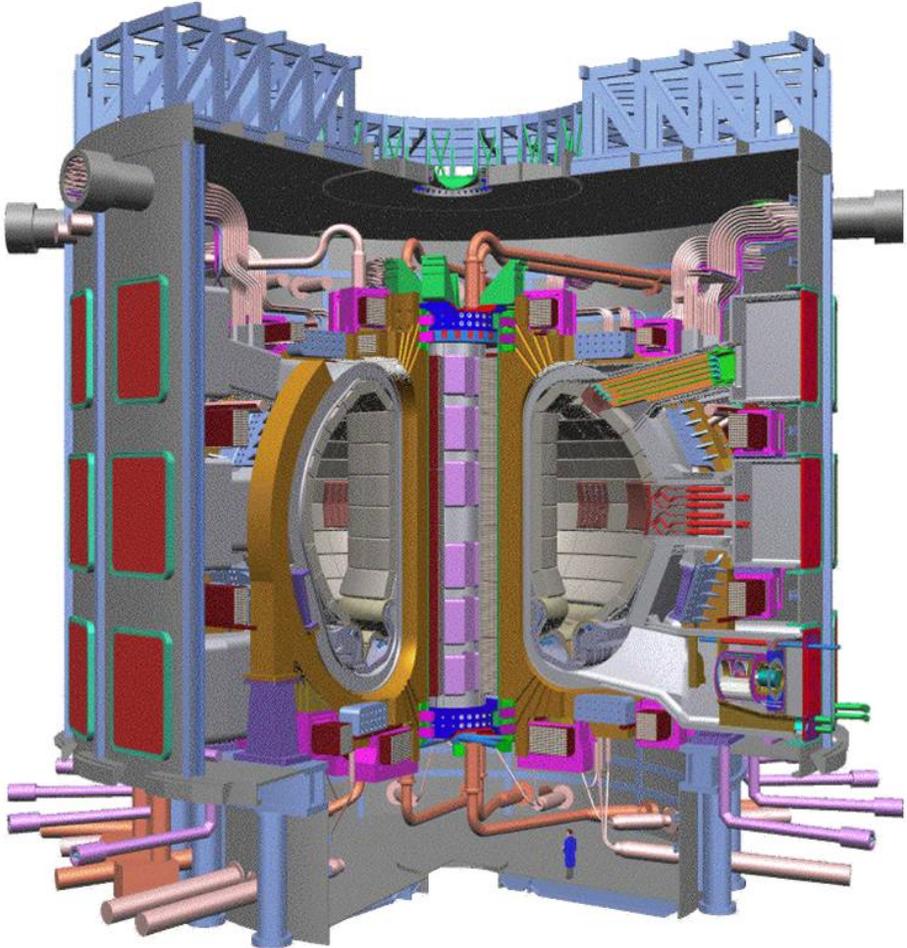


Stellarator (beide Grafiken IPP)

Die zur Zeit leistungsfähigste Stellarator-Anlage entsteht zur Zeit als Wendelstein 7-X in Greifswald. Die Entwicklungsarbeiten erstrecken sich auf verschiedene Methoden der Plasma-Heizung, auf Möglichkeiten einer stabileren Plasmaführung, auf stärkere und geeignetere supraleitende Magnete, die Ausscheidung von Verunreinigungen, den Brennstoffkreislauf, die Energieumwandlung im Blanket und die Erarbeitung geeigneter Werkstoffe. Die Größendimension, die nötig zu sein scheint, um das Plasma lange genug stabil einschließen zu können, ist gewaltige, wie das Modell des ITER unten erkennen lässt.

Neben diesen beiden Reaktor-Konzepten wird an verschiedenen Stellen an der Kernfusion mittels Trägheitseinschluss, der sogenannten Trägheitsfusion, gearbeitet. Die Forschungen hierzu unterliegen aber weitgehend der Geheimhaltung,

In Zukunft Kernfusion



(Grafik: IPP Vgl. die Person in Blau unten)

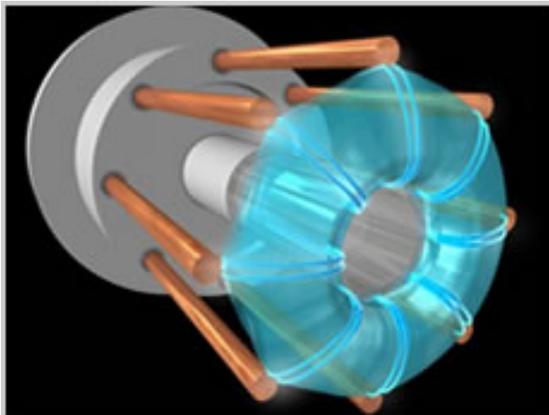
da viele Anwendungstechniken militärisch genutzt werden. Bei der Trägheitsfusion wird ein kleines Kügelchen aus tiefgefrorenem Deuterium und Tritium von vielen Seiten in extrem kurzen (Nanosekunden) Pulsen durch starke Laserstrahlen oder sehr stark beschleunigte Schwerionen beschossen und dabei so stark erhitzt, dass Kernfusionsreaktionen ablaufen, bevor das Material wegen der Hitzeentwicklung auseinander geflogen ist. Bei der Trägheitsfusion handelt es sich also um eine Aufeinanderfolge einzelner Explosionen von Mikro-Wasserstoffbomben. Das macht ihren Betrieb als Fusionskraftwerk schwierig.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Entsprechende Arbeit an den National Laboratories Lawrence Livermore, Argonne und Brookhaven und in den Hughes Industries Labs in den USA dient daher auch vornehmlich der Entwicklung kleiner Wasserstoffwaffen und nicht von Fusionskraftwerken.

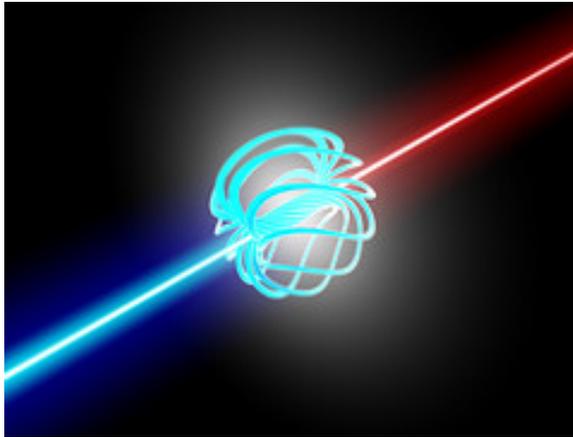
Dagegen arbeitet die 2009 in Kalifornien gegründete Fusion Power Corporation of Scotts Valley auf Grundlage der einschlägigen Patente eines Dr. Robert J. Burke an einem zivilen Fusionskraftwerk auf Basis des Schwerionenbeschusses. In seinem Vortrag auf einer Tagung der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt Anfang September 2010 stellte ihr Direktor Dr. Charles E. Helsley den Plan vor, auf privatindustrieller Basis bis 2020 in den USA ein Kraftwerk der Trägheitsfusion mit 20 bis 35 GW Leistung zu verwirklichen.

Eine grundsätzlich andere Herangehensweise wurde mit dem sogenannten „Dichten Plasmafokus“ eingeschlagen. Hierbei überlässt man es nicht der Eigenenergie der beteiligten Atomkerne die Fusion zustande zu bringen, noch schlägt man mit Laserstrahlen oder Schwerionen auf sie ein, sondern vertraut auf die Selbstformungskräfte eines Hochenergieplasmas im Lichtbogen bei einer starken elektrischen Entladung. Für die entsprechende elektrische Ladung im Bereich von 2 - 4 Mega-Amper sorgen Kondensator-Blocks. Um eine Anode werden im Kreis Kathoden angeordnet. Bei der Entladung bildet sich aus dem in der Umgebung vorhandenen Gasen ein schirmförmiger Plasmalichtbogen. Dieser wird durch die entstehenden Magnetfelder von den Elektroden abgetrennt und verknäult sich zu einem Plasmaball (Plasmoid). Dabei entstehen im Plasmoid hohe Temperaturen und gewaltige Drücke.



Lichtbogen einer Dichten Plasma
Fokus-Maschine

Diese lösen das Plasmoid in einen Strahl negativer Elektronen nach der einen Seite und positiver Atomkernen nach der anderen Seite auf. Dabei kommt es zu Fusionsreaktionen. Ein Reaktor, der auf Grundlage dieses Prinzips arbeitet, würde ebenfalls in einzelnen aufeinander folgenden Pulsen arbeiten.



Plamoid mit Elektronen und Kernstrahlung (Bilder LPP)

Die private Firma Lawrenceville Plasma Physics Inc. (LPP) in Berkeley Heights, NJ USA verfügt über einen Jahresetat ihrer Investoren von etwa 2. Mio USD. Unter ihrem Vordenker und Präsident Eric Lerner begnügt sie sich nicht mit Deuterium Tritium Fusionen, weil dabei sehr energiereiche Neutronen entstehen, sondern zielt auf eine Fusion bei gleichzeitiger Spaltung von Bor 11 mit Wasserstoff. Dabei entstehen drei α -Teilchen (Heliumkerne).

Diese stark geladenen Teilchen lassen sich unmittelbar durch einen Satz von Spulen hindurch auf eine Art Kondensator-Platte lenken und so unmittelbar - ohne Turbinen, Generatoren oder Wärmetauscher - mit hoher Effizienz (um 90%) in elektrischen Strom umwandeln. Das Problem ist die erforderliche Zündtemperatur, die für diese Reaktion bei dem Zehnfachen der D-T Reaktion, also bei rund 1 Mrd. Kelvin liegt. Lerner ist zuversichtlich mit einer stärkeren Fokus-Maschine dieses Ziel in Kürze erreichen zu können, so dass man sich an die Planung eines entsprechenden Kraftwerks machen könne. Die private Firma arbeitet dabei mit ähnlichen Forschungsunternehmen in Polen und China zusammen. Wa-

Ehrlich streiten über Kernenergie

rum die staatliche Fusionsforschung die intelligenter Linie des „Dense Plasma Focus“ nicht mehr verfolgt, ist unklar.

Die „heiße Fusion“ erlaubt, wenn sie auf industrieller Basis gelingt, nicht nur die direkte und damit hocheffiziente Umwandlung des Fusionsplasmas in elektrischen Strom, sondern als „Plasma-Fackel“ auch die endgültige Lösung aller Abfallprobleme. Im Plasmazustand lösen sich alle chemischen Verbindungen auf. Dadurch ließen sich in einer Plasmafackel alle Abfallstoffe in ihre Elemente (reinen Atome) zerlegen und an geeignet angeordneten Kondensator-Platten gesondert abfangen, um als Rohstoffe zu neuen, brauchbaren chemischen Verbindungen verknüpft zu werden.

Neben den Linien der „heißen Fusion“ werden schließlich noch Hoffnungen auf die sogenannte „**kalte Fusion**“ gesetzt. Es handelt sich um Kernfusionsprozesse bei Zimmertemperatur, die dadurch entstehen, dass elektrische Ladungen Ionen in Kristallgitter zum Beispiel von Palladium drücken und dabei Fusionsreaktionen auslösen. Vor rund 18 Jahren hatten die Wissenschaftler Stanley Pons und Martin Fleischmann bei elektrolytischen Versuchen eine durch Kernreaktionen erklärbare zusätzliche Wärmeentwicklung entdeckt. Die voreilige Veröffentlichung löste zunächst eine Goldgräberstimmung aus, die aber bald frustriert ins Gegenteil umschlug. Die zahlreichen Versuche, die Versuchsanordnung der beiden durchaus „anerkannten“ Experimentatoren aus dem Bereich der Kernchemie zu wiederholen, erbrachten nicht die erhofften Ergebnisse. Die Entdeckung wurde danach recht bald und auf breiter Linie als Spinnerei abgetan.

Inzwischen wird in den USA, in Japan und an verschiedenen Stellen wieder unauffällig an dem Konzept gearbeitet. Man stieß und stößt vermehrt auf diese und ähnliche wiederholbare Effekte und auf Substanzen, die den Ablauf von Kernprozessen bestätigen. Allerdings fehlt bis heute eine schlüssige Theorie der nur im Resultat erkennbaren Vorgänge, jedenfalls eine Theorie, die dem konsensualen naturwissenschaftlichen Vorverständnis entspräche. Statt von „kalter Fusion“ spricht man inzwischen lieber von Low Energy Nuclear Reactions oder Festkörper-Kernreaktionen.

Andrea Rossi und Sergio Focardi von der Universität Bologna haben am 14.1.2011 ein Gerät, einen Nickel-Wasserstoff-Reaktor, vorgestellt, mit

In Zukunft Kernfusion

dem sie bei Raumtemperatur mit einer Eingabe von nur 400 Watt eine Wärmeleistung von 12.400 Watt erzeugt und dabei die Umwandlung von Nickel in Kupfer festgestellt haben. Sie machen für den Energieertrag Fusionsprozesse verantwortlich.⁷ Die Kosten für die Energiegewinnung würden sich auf weniger als 1 Cent pro kWh belaufen, auch würden keine radioaktiven Stoffe erzeugt und freigesetzt. Ein entsprechendes Gerät soll zur Versorgung von Haushalten bereits Ende des Jahres in den Vertrieb gehen können. *"Was genau die Kalte Fusion auslöst, können wir nicht erklären. Die spätere Anwesenheit von Kupfer und die nachweisliche Energieabgabe sind jedoch Beweis dafür, dass es funktioniert"* gestanden die beiden Forscher. Ihr Projekt wird von Giuseppe Levi, Physiker am italienischen "Nationalen Institut für Kernphysik"(INFN) unterstützt.

Mit der bisherigen Beherrschung der Kernspaltung hat die Kerntechnik sich erst auf den Weg gemacht. Von Kerntechnik im eigentlichen Sinne und der sich daran anschließenden Isotopen-Chemie wird man erst reden können, wenn auch die Fusionsprozesse beherrscht werden. Es wäre für die Entwicklung der Menschheit verhängnisvoll, wenn nach der Beherrschung der molekularen Bindungskräfte im Bereich der Chemie, die Beherrschung der Kernbindungskräfte angesichts möglicher Gefahren auf halbem Weg abgebrochen würde.

Teil 8: Transmutation

I. Grundsätzliches

II. Die Neutronenquelle

Kommen wir noch einmal auf die viel diskutierten radioaktiven Abfälle zurück. Sie ließen sich - wie gezeigt - relativ sicher und lange in sogenannten Endlagern halten. Eine Alternative zur Endlagerung der nicht verwendbaren radioaktiven Stoffe ist die Stoffumwandlung oder *Transmutation*. Diesen Traum der ersten Alchemisten, der Goldmacher, könnte die moderne Kerntechnik heute verwirklichen.

⁷ <http://www.journal-of-nuclear-physics.com/?p=360>.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Als Ursache der Radioaktivität erkannten wir die Instabilität der Atomkerne bestimmter Elemente und ihrer Isotopen. Diese Instabilität entsteht, wenn die Kerne eine bestimmte Grenzgröße überschritten haben (Transurane) oder in ihnen ein ungünstiges Verhältnis zwischen Protonen und Neutronen besteht. In diese Kernzustände greift die Transmutationstechnik ein, indem sie günstige kernphysikalische Wechselwirkungen auslöst. Werkzeuge hierzu sind geladene Teilchen, Protonen und Deuteronen, und vor allem Neutronen. Durch sie werden überschwere Kerne gespalten und instabile leichte Kerne stabil „gebrütet“ oder in noch schneller zerfallende Kerne (mit kürzerer Halbwertszeit) umgewandelt.

Mit Hilfe der Transmutation läßt sich die „gefährliche Asche“ der Atommeiler so umwandeln, daß ihr Endlager in überschaubaren Zeiträumen nicht stärker strahlt als das Rohstofflager, dem man das Uran zur Erzeugung der Kernkraft entnommen hatte. Um die Abklingzeit des gesamten Abbrands innerhalb von 700 Jahren auf das Gefährdungspotential der ursprünglichen Lagerstätten zu senken, müssen die darin enthaltenen Elemente Uran, Neptunium und Curium bis auf einen Rest von 1% umgewandelt werden, Plutonium und Americium sogar bis auf 0,1%.

I. Grundsätzliches

Man unterscheidet Neutronen nach ihrer Geschwindigkeit und spricht von schnellen und von thermischen (langsamen) Neutronen. Um bei den Kernen bestimmter Elemente und Isotope bestimmte Reaktionen auszulösen, sind jeweils ganz bestimmte Neutronengeschwindigkeiten nötig - etwa, um die Kerne zu zertrümmern oder sich spalten zu lassen, um Alphateilchen abzugeben, ihre Ladung zu ändern oder Neutronen zu absorbieren. Für die meisten bei der Kernenergienutzung anfallenden Stoffe ist sehr genau bekannt, wie sie auf Neutronen unterschiedlicher Geschwindigkeit reagieren. Die Transmutation radioaktiver Substanzen zerfällt daher in zwei Aufgaben.

I. Grundsätzliches

Transmutation ist für Teilchen innerhalb der Atomkerne das, was die Chemie für die Elemente innerhalb der verschiedenen Stoffe ist. Die Transmutationstechnik ist seit den 50er Jahren bekannt *), wurde der Öffentlichkeit aber bisher kaum zur Kenntnis gebracht oder von ihr wahrgenommen.

Transmutationstechnik beseitigt nicht nur die Langlebigkeit der Radionuklide (strahlende Stoffe), sie liefert eine zusätzliche Energieausbeute aus den eingesetzten Brennstoffen. Sie ermöglicht es, die bisherigen nuklearen Brennstoffe besser auszunutzen und auch andere Brennstoffe (z.B. Thorium) nuklear zu verbrennen, was die Energiereserven in unüberschaubarer Größenordnung vermehrt. Außerdem erlauben es die angebotenen Verfahren der Transmutationstechnik, Kernreaktoren noch sicherer zu betreiben, weil in ihnen die Kettenreaktion durch Neutronen, die von außen kontrolliert zugeführt werden, aufrechterhalten wird und ihre Quelle jederzeit abgeschaltet werden kann.

*) Vgl. M. Steinberg, G. Wotzak, B. Manowitz: *Neutron Burning of Long-Lived Fission Products for Waste Disposal*, Brookhaven National Laboratory, BNL-8558 Upton, NY USA 1958.

Zum einen müssen die verschiedenen Stoffe aus dem nuklearen Aschegemisch sauber herausgetrennt werden, damit sie den Neutronen optimal ausgesetzt werden können. Diese Aufgabe heißt in der Fachsprache *Partitioning* (Aufteilung) und umfaßt weitgehend das, was im Bereich der Wiederaufbereitung geschieht.

Zum anderen muß das Geschwindigkeitsprofil des Neutronenflusses im Reaktor möglichst genau beherrscht werden. Diese Aufgabe gehört zum Bereich der sicheren Reaktorsteuerung. Transmutation ist daher ein Betrieb, der die Arbeit des Reaktors und die Wiederaufbereitung zusammenfaßt. Dabei lassen sich wechselseitige Vorteile (sogenannte Synergieeffekte) nutzen.

Schon im herkömmlichen Reaktor findet Transmutation durch Neutronen statt. Im nuklearen Brennstoff sammeln sich allmählich Spaltprodukte an und absorbieren so viele Neutronen, daß sich die Kettenreaktion nicht

Ehrlich streiten über Kernenergie

mehr aufrechterhalten läßt und die Brennelemente ausgetauscht werden müssen, obwohl erst ein geringer Teil des Brennstoffes tatsächlich verbrannt ist. Zur besseren Nutzung der Neutronen aus den Spaltvorgängen wurde daher der sogenannte Schnelle Brutreaktor entwickelt, der auf Moderatoren verzichtet. „Schnell“ heißt er, weil die Neutronen hier schneller sind als im thermischen Reaktor. Die schnellen Neutronen werden durch die beigefügten Brutstoffe - nicht spaltbares Uran, Thorium oder Plutonium - absorbiert und sollen vorwiegend neue Kernbrennstoffe brüten. Dabei bleiben Neutronen übrig, die allein durch nichtabsorbierende Zusammenstöße mit den anderen Kernen so weit abgebremst werden, daß sie die Kettenreaktion aufrechterhalten.

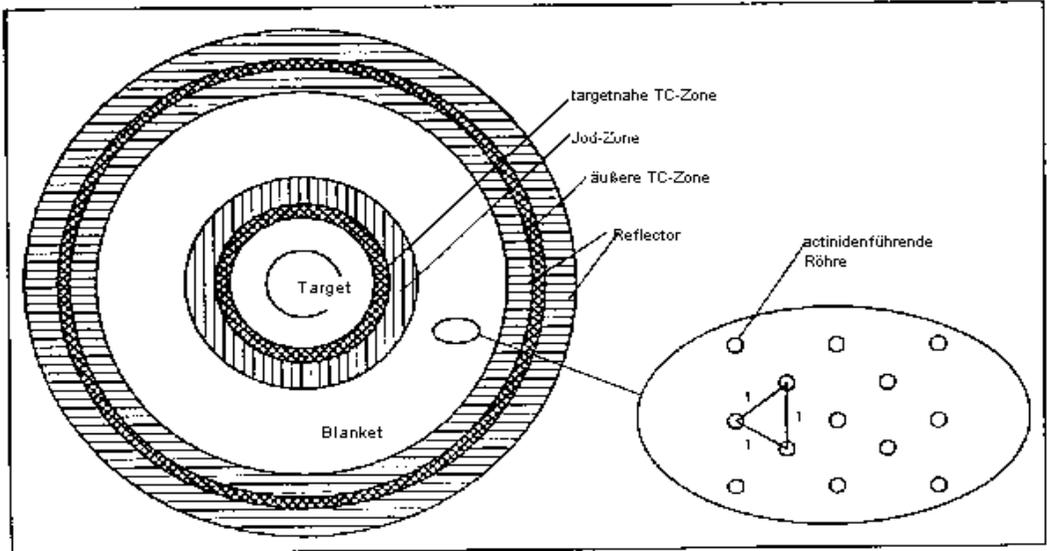
Auch im Schnellen Brüter sammeln sich allmählich Spaltprodukte an, und ihre Neutronenabsorption erzwingt den vorzeitigen Austausch der Brennelemente. Die in herkömmlichen Reaktoren freigesetzten Neutronen reichen also nicht aus, um den Brutvorgang, die Kettenreaktion und den Stabilisierungsvorgang der Spaltprodukte mit weiter reichendem Erfolg aufrecht zu erhalten.

Daher wird bei der Transmutation meistens eine zusätzliche Quelle für schnelle Neutronen eingesetzt. Das hat den Vorteil, daß ihre Reaktoren „unterkritisch“ arbeiten, d.h. in dem Augenblick, in dem die zusätzliche Neutronenquelle abgeschaltet wird, kommen die Spaltvorgänge im Reaktor zum Erliegen. Auf diese Weise wird der Reaktor also abgeschaltet, was die Betriebssicherheit erhöht.

Die äußere Neutronenquelle erlaubt es auch, Neutronen mit der Geschwindigkeit in den Reaktor zu schießen, die für den jeweiligen Prozeß am günstigsten ist. Sie überlagern die im Reaktor selbst erzeugten Neutronen. Je höher die Geschwindigkeit der eingebrachten Neutronen, desto größer die Bandbreite der Neutronengeschwindigkeiten nach unterschiedlichen Abbremsvorgängen. Zusätzlich kann man das Spektrum des Neutronenstroms im Reaktor durch die Anordnung der Stoffe und durch unterschiedliche Abstände von der Neutronenquelle besser ausnutzen, ohne durch die Bedingungen, die den Reaktor kritisch halten, eingeschränkt zu sein.

Herkömmliche Reaktoren werden mit festen Brennstoffen, die in besonderen Stahlröhren eingeschweißt sind, beschickt. Werden Brenn- und Spaltstoffe jedoch flüssig durch festmontierte Röhren gepumpt, dann läßt

I. Grundsätzliches



Querschnitt einer charakteristischen Target/Blanket Einheit

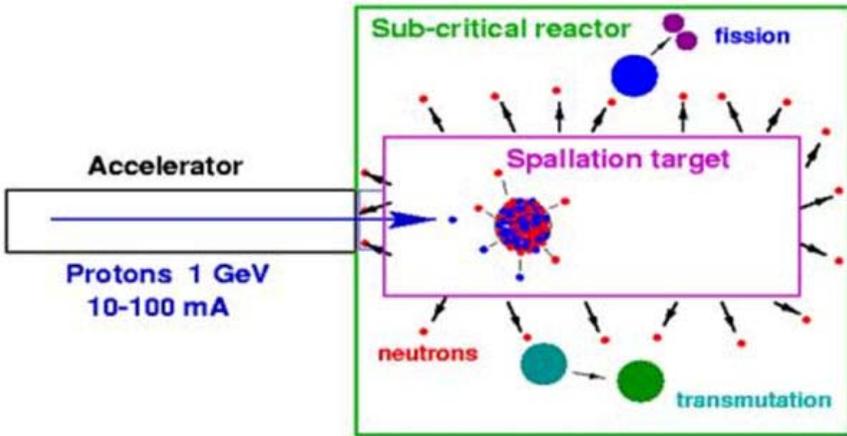
sich die jeweilige Zusammensetzung durch entsprechende Zumischung und Absonderung entsprechend der im Reaktor gewünschten Bedingungen ändern und so der Abbrand, das Brüten und Stabilisieren der Einsatzstoffe besser aufeinander abstimmen

Das oben beschriebene Partitioning ist also für den laufenden Betrieb nicht unbedingt nötig. Wichtig ist dagegen die genaue Kenntnis der jeweiligen Zusammensetzung der Spaltstofflösung, um sie dem Neutronengeschehen im Reaktor anzupassen. Sinnvoll ist auch sein, Brenn- und Brutstofflösungen getrennt durch den Transmutationsreaktor zu führen und die Durchleitung dem sich einstellenden Neutronenprofil entsprechend optimal anzuordnen. Schließlich ist denkbar, daß die Brennstoff- und Spaltstoffströme zusätzlich als Kühlmittel dienen. Sie könnten über eigene Wärmetauscher Reaktorwärme nach außen abgeben. Eine Transmutationsanlage gibt es bisher nicht. Bei der Beschreibung beziehen wir uns auf das in Jülich erarbeitete Anlagenkonzept.

Ehrlich streiten über Kernenergie

II. Die Neutronenquelle

Wie werden die Neutronen in die Transmutationsanlage eingebracht? Neutronen sind ihrem Wesen nach neutral und lassen sich nicht über ihre elektrische Ladung beeinflussen und daher auch nicht beschleunigen oder transportieren. Sie müssen dort, wo man sie braucht, erzeugt werden. Dies geschieht durch die sogenannte *Spallation*.



Schema der Spallation mit Hilfe eines Teilchenbeschleunigers

Dabei werden Ziele (targets) aus Schwermetall (Blei, Wismut) mit geladenen Teilchen (Protonen) beschossen, die in leistungsfähigen Beschleunigern auf eine hohe Energie (ca. 1,5 GeV) gebracht wurden.

Die energiereichen Protonen dringen in das Metall ein und setzen pro Proton je nach mitgeführter Energie 20 bis 50 schnelle Neutronen frei. Diese treten durch eine Trennwand in den Reaktorraum aus. Hier, im sogenannten *Blanket*, finden die gewünschten kernphysikalischen Wechselwirkungen statt.

Dabei kann jedes Neutron selbst wieder Spaltungsvorgänge auslösen. Wenn für die Kettenreaktion ein Multiplikationsfaktor von 0,95 eingestellt ist, d.h. wenn jede Spaltung in 0,95 Fällen wieder zur Spaltung führt, kann jedes Spallationsneutron 19 weitere Spaltungsneutronen erzeugen. Über den Multiplikationsfaktor, der beim unterkritischen Reaktor

II. Die Neutronenquelle

immer unter 1 liegt, läßt sich der gesamte Neutronenfluß im Blanket regeln.⁸

Die Neutronen werden im *Target* erzeugt. Im Grunde eignen sich fast alle Metalle als *Target*, doch bieten Schwermetalle wie Wolfram, Tantal und Wismut eine besonders günstige Neutronenausbeute. Blei wird wegen seines niedrigen Dampfdrucks bevorzugt - und weil es selbst wenig Neutronen absorbiert. Es kann in fester und in flüssiger Form eingesetzt werden. In fester Form kann man durch die Zusammensetzung unterschiedlich dicker Platten die Streuung der Neutronen beeinflussen. Allerdings muß man dann das *Target* kühlen und dabei das Kühlmittel dem Neutronenstrahl aussetzen. Flüssige *Targets* kühlen sich selbst. Die Wärmebewegung (Konvektion) im flüssigen Metall gibt dabei die Wärme an einen Wärmetauscher ab.⁹

Um das *Target* liegt das *Blanket*, die eigentliche Reaktorzone. Hier wird mit flüssigem Blei gekühlt. Die Stoffe werden dem Neutronenfluss ausgesetzt und entsprechend umgewandelt. Die Neutronengeschwindigkeit ist in der targetnahen Zone am höchsten und wird zum Rand hin langsamer.

In Jülich schlägt man z.B. vor, in die unmittelbar um das *Target* liegende Zone das langlebige Spaltprodukt Technetium Tc_{99} einzubringen. Um diese herum wird auch Jod $_{129}$ in festen Brennstäben (als Natriumjodid) angeordnet - weil es in flüssiger Form sehr korrosionsfähig ist, darum herum Xenon-Isotope usw. Um die unterschiedlichen Neutronengeschwindigkeiten besser zu nutzen, wird das Blanket in Zonen unterteilt, die jeweils mit unterschiedlichen Brenn- und Spaltstoffgemischen beschickt werden. In der schnellen Zone zwischen dem *Target* und der Tc-Zone ließe sich auch eine Zone für die Transmutation von Americium (Am) und Curium (Cm) einrichten. Dies ist deshalb zu empfehlen, weil diese beiden Schwermetalle bei der Transmutation von Plutonium in den thermischen Zonen des Reaktors neu entstehen.

⁸ H. Lengeler: Nuclear Waste Transmutation using High-Intensity Proton Linear Accelerators, Report CERN AT/93 DI Genf 1993.

⁹ G. Russel et al.: Introduction to Spallation Target Requirements, Proceedings of the Intern. Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Las Vegas, July 1994.

Ehrlich streiten über Kernenergie

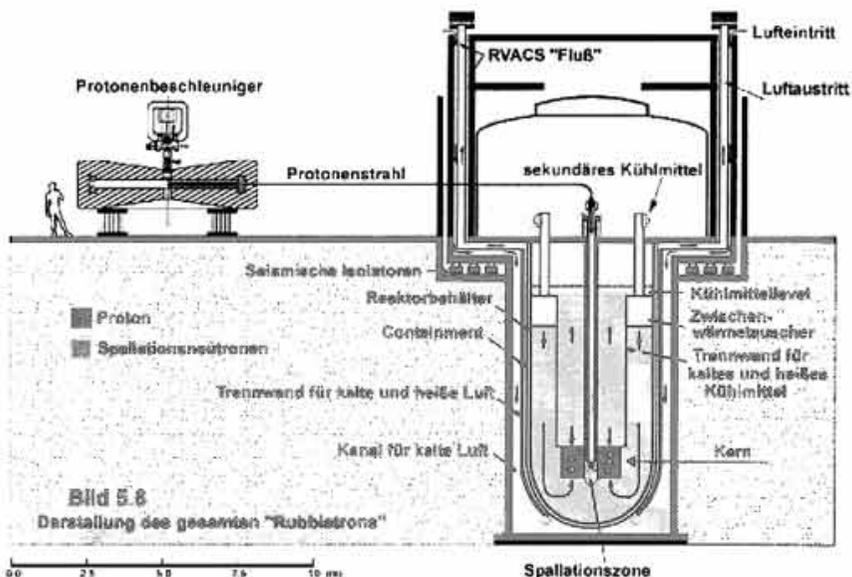
In den äußeren Zonen werden Transurane - vor allem Plutonium - gespalten. Sie werden zusammen mit anderen Brennstoffen, zum Beispiel Thorium, als flüssiges Gemisch durch parallel angeordnete Rohre gepumpt. Das Brennstoffgemisch kann je nach Auslegungsschwerpunkt der Anlage in kleinen Keramikpartikeln in flüssiges Metall eingelagert (ein Blei-Wismut-Gemisch schmilzt bereits bei $+140^{\circ}\text{C}$) oder als Salzschnmelze aufgelöst werden. Flüssiges Blei eignet sich als Brennstoffträger, weil ihn langsamere, thermische Neutronen leichter durchdringen können und Blei sehr strahlenbeständig ist. Außerdem kann das Blei selbst pro Volumeneinheit eine große Wärmemenge abtransportieren¹⁰. Das Blanket umschließt ein Reflektor, der die Neutronen zurück in das Blanket wirft. Der Reaktor steckt, wie bei herkömmlichen Reaktoren, in einem nach sicherheitstechnischen Gesichtspunkten ausgelegten Reaktorgefäß.

Ein solcher Reaktor ließe sich quasikontinuierlich betreiben. Werden, wie im Jülicher Modell, die langlebigen Spaltprodukte nicht in flüssiger, sondern zum Teil in Stabform eingesetzt, müssen diese alle vier Jahre entnommen werden. Etwa vier Jahre halten auch die Graphitmoderatoren im Reflektor den Neutronen stand. Sie können also zusammen mit den Spaltproduktstäben ausgetauscht werden.

Das flüssige Gemisch aus Brennstoff und -Transuranen- läßt sich in bestimmten Zyklen so durch den Reaktor führen, daß nach jedem Zyklus ein Teil des Brennstoffs ersetzt wird. Die dabei abgesonderten Spaltprodukte werden zwischengelagert, wobei kurzlebige Spaltprodukte und Aktinide (zum Beispiel Curium₂₄₂ und Plutonium₂₃₈) weiter zerfallen. Die inzwischen stabilisierten Spaltprodukte werden abgesondert und entsorgt, die nicht stabilisierten wieder in die entsprechenden Transmutationszonen zurückgebracht. Auf diese Weise läßt sich die gewünschte Zusammensetzung des Brennstoffgemischs einstellen und festlegen, wie lange ein Volumenelement davon dem Neutronenfluß ausgesetzt wird, um optimale Spalt- und Transmutationsraten zu erzielen.

¹⁰ F. Lybsch: Aspekte des Einsatzes von Systemen zur Transmutation radioaktiver Stoffe - Neutronik, Technik, Sicherheitsverhalten, Jülich 3181, Januar 1996

II. Die Neutronenquelle



Schema des unterkritischen Transmutationsreaktors

Die Kette der Zerfalls- und Spaltabläufe der verschiedenen Stoffe wandelt im Jülicher Modell pro Jahr etwa 52,5 kg an Transuranen um. Das entspricht dem Abfall von 1,3 Druckwasserreaktoren des Biblistyps. Vom Technetium werden pro Jahr 50 kg umgewandelt und vom Jod 6,8 kg. Das ist das 1,7- bzw. auch 1,3-fache des Abfalls, der jährlich im Siedewasserreaktor anfällt. Ein Transmutationsreaktor mit der umrissenen Auslegung erwirtschaftet einen Leistungsüberschuß von 454 MW elektrisch, der an das Stromnetz abgegeben wird.

In vielen Ländern wird an ähnlichen Konzepten wie in Jülich mit unterschiedlichen Zielsetzungen gearbeitet. Eine funktionstüchtige Transmutationsanlage existiert bisher nicht, doch konnte einer ihrer frühesten Verfechter, Prof. Carlo Rubbia aus Genf, die EU-Behörden 1996 von seiner Idee der mit Beschleunigern betriebenen Transmutationsanlage (Accelerator Driven Systems, ADS) überzeugen. Inzwischen arbeiten in Europa 10 Forschungsinstitute an Plänen für den Prototyp nach Rubbias Vorgaben. Nach Plänen der EU soll dieser Prototyp im Jahr 2015 in Betrieb

Ehrlich streiten über Kernenergie

genommen werden. Neben Europa arbeiten auch Japan und die USA an ähnlichen Konzepten.

Teil 9: Der inhärent sichere Kern-Reaktor

I. Der Kugelbettreaktor

II. Vor- und Nachteile niedriger Leistungsdichte

III. Brennelemente

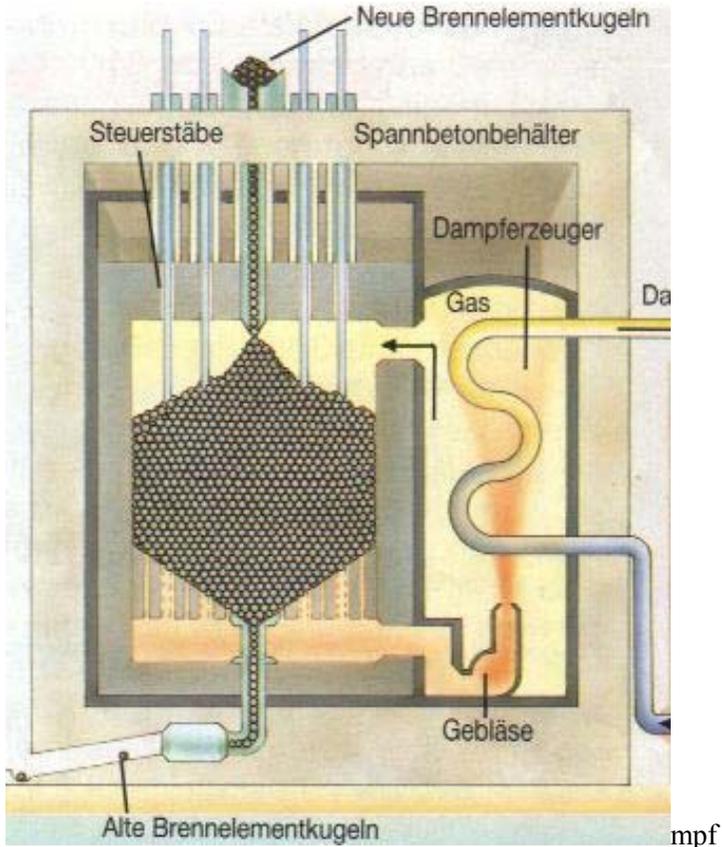
IV. Besondere Vorteile

Die Transmutation löst das sogenannte Entsorgungsproblem, aber sie ist aufwendig und komplex. Unberührt läßt sie ein anderes „Problem“ der Kernenergienutzung, das man zwar „technisch weitgehend im Griff“ hat, bei dem aber ein größerer Schadensfall und ein Restrisiko nicht ganz auszuschließen ist: das „Nachwärmeproblem“ mit der bedrohlichen Überhitzung des Reaktorinventars beim üblichen Leichtwasserreaktors. Dieses Problem vermeidet der Thorium-Hochtemperatur oder Kugelhaufen-Reaktor (THTR), bei dem eine Überhitzung ausgeschlossen ist.

Die Lösung liegt beim Ofenprinzip. Es wurde ein Reaktor entwickelt, dem ständig frische Brennelemente zugeführt und die mit Spaltprodukten angereicherten Elemente entzogen werden können, ohne dass nukleares Material für Waffenentwicklung abgezweigt werden kann. Dieser viel einfachere und inhärent (d.h. aufgrund physikalischer Gesetze) sichere Hochtemperatur-Kugelbettreaktor (HTR) wurde Ende der 50er Jahre von Professor R. Schulten entwickelt und von 1966 bis 1988 im Forschungszentrum Jülich nach allen Regeln der Kunst getestet.

In ihn werden die Brennelemente als feste Kugeln von oben auf eine Schüttung eingebracht. Sie sacken während des Betriebs durch die Schüttung zum trichterförmigen Reaktorboden hinunter und werden dort abgelassen. Die abgebrannten Brennelemente sind so stabil, daß sie nach einer längeren Abklingzeit ohne weitere Bearbeitung in Fässer abgelegt und direkt ins Endlager gebracht werden können. Über das voneinander unabhängige Zuführen bzw. Ablassen der Brennelemente lassen sich die Spaltvorgänge im Reaktor allein schon weitgehend steuern.

I. Der Kugelbettreaktor



Schema des THTR

Ein besonderer Sicherheitsvorteil des HTR besteht darin, daß nur soviel Spaltmaterial im Reaktor enthalten ist, wie gebraucht wird, um die gewünschte Menge an Kernspaltungen pro Zeiteinheit aufrechtzuerhalten. Im Reaktor gibt es demnach keine „Überkritikalität“, der durch Einsatz von Neutronengiften entgegengesteuert werden müßte. Daher läßt sich

Ehrlich streiten über Kernenergie

die Steuerung des Reaktors sehr vereinfachen, eine konstante Reaktivität wird unschwer eingehalten und damit ein entsprechend gleich bleibendes Leistungsniveau. Da die entstandenen Spaltprodukte mit den abgebrannten Brennelementen ständig aus dem Reaktor entnommen werden, sammeln sie sich nicht im Reaktor an, so daß die beim Abschalten des Reaktors entstehende Nachwärme immer die gleiche - und zwar eine relativ geringe - ist.

Auch für diesen Reaktor gilt der sogenannte negative Temperaturkoeffizient, auf den wir im Zusammenhang mit dem Leichtwasserreaktor schon aufmerksam gemacht hatten. Nimmt die Reaktorleistung zu, weil zum Beispiel mehr Brennelemente zugeschüttet als abgelassen wurden, dann steigt im Reaktor naturgemäß die Temperatur. Bei steigender Temperatur werden die Neutronen schneller und verlieren ihre Fähigkeit, Spaltprozesse auszulösen. Dementsprechend nehmen die Kernspaltungen ab. Wenn wegen der relativ geringeren Nachwärme die Temperatur wieder sinkt, nehmen die Spaltvorgänge wieder zu.

Wird der Reaktor mit Wasserdampf (anstelle von Heliumgas), der durch den Kugelbett strömt, „gekühlt“, wird dieser Effekt noch ausgeprägter. Wasser ist nämlich neben dem hier eingesetzten Graphit ein Moderator, d.h. er hilft mit, die Neutronengeschwindigkeit auf die für Kernspaltungen erforderliche Geschwindigkeit abzubremesen. Heißerer Dampf ist weniger dicht und bremst daher die Neutronen weniger ab. Auf diese Weise läßt sich der Reaktor so auslegen, daß er sich nahezu selbst regelt und ein großer Teil der aufwendigen Regeltechnik überflüssig wird.

Wenn trotz vollem Reaktorbetrieb sämtliche Kühlsysteme vollständig abgeschaltet werden, bleibt die Temperatur in der heißesten Zone des Reaktorkerns unter der kritischen Temperatur von 1600°C. Der Grund dafür ist, daß die Zerfallswärme von der Bausubstanz des Reaktors aufgenommen und durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und natürliche Luftzirkulation nach außen abgegeben werden kann. Die Temperatur erhöht sich an der heißesten Stelle zwischen den Brennelementen nur um 10°C. Die Temperatur des Kesselsystems bleibt bei diesem „Unfall“ unter 500°C. Es baut sich dabei, im Falle der Heliumkühlung, kein zusätzlicher Gasdruck auf.

Tatsächlich wurden am Versuchsreaktor in Jülich 1988 mehrere Versuche durchgeführt, bei denen das Kühlsystem während des Vollbetriebs ganz

II. Vor- und Nachteile niedriger Leistungsdichte

abgeschaltet wurde. Die innere Selbstregelung des Reaktors verlief so, wie es theoretisch berechnet worden war. Reaktorbehälter und Inventar nahmen unter dieser Exposition keinen Schaden, auch kam es nicht zur Freisetzung von Spaltprodukten aus den Brennelementen. Der Reaktor konnte nach dem Versuch problemlos weiterbetrieben werden.

II. Vor- und Nachteile niedriger Leistungsdichte

Diese Sicherheit hat einen Preis, der reine Techniker nicht erfreut: Sie wird durch die relativ niedrige Leistungsdichte im HTR erkauft. Im Unterschied zum Leichtwasserreaktor mit einer Leistungsdichte von 90 MWth/m^3 werden im HTR nur 3 MWth/m^3 erreicht. Pro Rauminhalt muß also wesentlich weniger Wärme abgeführt werden, was wiederum die Voraussetzung dafür ist, daß Gas (Helium oder Wasserdampf) als Kühlmittel ausreicht. Andererseits fallen dadurch Reaktorkessel und das dazugehörige Gebäude im Verhältnis zur Nutzleistung recht groß aus.

Die Gaskühlung bedeutet allerdings auch einen Vorteil. Die Kühlgase - das extrem stabile Edelmetall Helium, aber auch der Wasserdampf - nehmen aus einem Grund, den wir weiter unten erläutern, keine Radioaktivität und keine radioaktiven Teilchen auf. Sie können daher unmittelbar genutzt werden und brauchen nicht in aufwendigen Wärmetauschern ihre Nutzenergie an einen Sekundär- oder gar Tertiärkreislauf weiterzugeben.

Die Kühlgase können bei einem Druck von 60 bar unmittelbar über eine Gasturbine elektrische Energie erzeugen oder bei einer geplanten Austrittstemperatur von bis zu 950°C im Falle von Helium und 650°C im Falle von Wasserdampf Prozesswärme für industrielle Anwendungen zur Verfügung stellen. Dadurch, daß aufwendige und energieverlustreiche Wärmetauschprozesse vermieden werden, läßt sich bei diesem Hochtemperaturreaktor eine für Kernkraftwerke sehr hohe Leistungsausbeute von über 48% erzielen.

Die geringe Leistungsdichte und daher relative Größe des Reaktors und der dazugehörigen Gebäude verteuern den Reaktor. Dem stehen aber die verbilligenden Faktoren entgegen. Der Wegfall von Wärmetauschern, die Vereinfachung der Regelung, mögliche Einsparungen an mehrfach vorhandenen Sicherheitssystemen (Redundanz) senken die Investitionskosten.

Ehrlich streiten über Kernenergie

ten für diesen Reaktor erheblich – und ebenso die Wartung und die Schadensrisiken.

Ein weiterer günstiger Kostenfaktor liegt in dem Reaktorgefäß, das infolge der geringeren Leistungsdichte auch wesentlich einfacher gehalten werden kann. Statt einem Reaktordruckgefäß aus Edelstahl wie beim Leichtwasserreaktor reicht in diesem Fall auch ein gröberer Spannbetonbehälter, der innen mit hitzebeständigem Graphit ausgekleidet wird.

Damals lag die optimale Betriebsgröße des Kugelbettreaktors bei etwa 100 bis 300 MWe. Neuere Konzepte lassen aber auch sinnvolle Größen von weit über 1.000 MWe erwarten. Moderne Leichtwasserreaktoren sind auf 1.300 MWe ausgelegt. Die weite Spanne an sinnvollen Betriebsgrößen macht den Reaktor für die Stromversorgungsunternehmen einerseits in dichtbesiedelten Industriegebieten interessant. Interessant ist er aber in kleinen Auslegungen auch wegen seines Angebots von Prozeßwärme für industrielle Anwendungen und zum Einsatz in entlegeneren Gebieten ohne Verbundnetz und relativ geringem Grundlast-Energiebedarf. Das macht den Reaktor, wegen seiner sicheren Handhabung, vor allem für einzelne Unternehmen und für Entwicklungsländer interessant.

III. Brennelemente

Die entscheidenden Vorzüge des Kugelbett-Reaktors werden durch seine besonderen Brennelemente möglich. Es handelt sich um harte Kugeln mit einem Durchmesser von 6 cm. Diese Kugeln bestehen weitgehend aus dem Moderatormaterial Kohlenstoff. In ihn werden die eigentlichen Brennstoffpartikel eingearbeitet. Das sind wiederum kleine Körner mit einem Durchmesser von etwa 1 mm, sogenannte TRISO-Elemente. Sie enthalten das spaltbare Material in Form von Uran- oder Thoriumoxid. Dieses wird von einer dünnen Schicht Kohlenstoff umgeben. Diese sind von einer Schicht Siliziumkarbid (SiC) eingehüllt. Zum Schluß wird die Brennstoffkugel insgesamt von mehreren voneinander unabhängigen, jeweils 100 \AA (Ångström) dicken SiC-Schichten umgeben. Sie stabilisieren die Brennstoffkugel.

Die problemlose Entnahme und Zugabe der Brennstoffkugeln stellt sicher, dass der in ihnen enthaltene nukleare Brennstoff weitestgehend

III. Brennelemente

ausgenutzt wird (beim Leichtwasserreaktor nur zu 5%, weil die Spaltprodukte den Spaltvorgang „vergiften“).

Die Einhüllung sowohl der Partikel als auch der Kugeln mit SiC bietet einen entscheidenden Vorteil. Die Verbindung der beiden eng verwandten Elemente Kohlenstoff und Silizium ist chemisch extrem fest. Das macht SiC sehr hitzebeständig und außerordentlich widerstandsfähig gegen jede Form von Korrosion oder mechanischem Abrieb. Siliziumkarbid wird bereits wegen seiner Härte als Schleifmittel und auf Werkzeugen zur Bearbeitung von Hartstählen und Hartmetall, Glas etc. verwendet. Das Entweichen flüchtiger Spaltprodukte, wie es beim Leichtwasserreaktor vorkommt, ist somit ausgeschlossen.

Man hat SiC auch an vielen Stellen der Erde im Erdreich gefunden. Dort war es Hunderte von Millionen Jahren allen denkbaren chemischen Einflüssen ausgesetzt, ohne sich zu verändern. Es veränderte sich auch nicht, als man es bei Laborversuchen längere Zeit mit extrem harten Neutronen bestrahlte. Die in Siliziumkarbid eingeschlossenen Spaltprodukte, aber auch die nuklearen Brennstoffe, können aus dieser Hülle nicht mehr entweichen. Eine Wiederaufbereitung dieser Brennstoffe ist daher nicht mehr möglich.

Die Kugeln sind dadurch allerdings bereits fertig für das Endlager „konditioniert“: Sie können nach einer gewissen Abklingzeit - vorgesehen sind 100 Jahre - so wie sie sind, ins nukleare Endlager verbracht werden. Es ist unmöglich, daß aus ihnen radioaktive Stoffe heraus und ins Grundwasser gelangen könnten.

Beim 300 MW THTR in Hamm Uentrop unterlief allerdings ein Konstruktionsfehler. Statt für den Verlauf der Abschaltstäbe spezielle Röhren vorzusehen, wurden diese direkt in den Kugelhafen gestoßen. Dadurch wurden Brennstoffkugeln zertrümmert, was zum Vorwand wurde, dass sich das rot-grün indoktrinierte Deutschland von dieser Reaktorlinie verabschiedete.

IV. Besondere Vorteile

Der besondere Vorteil des HTR liegt darin, daß das Kühlmittel den Reaktor mit einer sehr hohen Temperatur verläßt, die vielfältige Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. So ist im Falle der Stromerzeugung die Restwärme nach der Gasturbine so hoch (120°C bis 250°C), daß in diesem Fall die Kraftwärmekopplung nicht auf Kosten der Stromerzeugung ins Gewicht fällt.

Die Erzeugung von überhitztem Wasserdampf im HTR findet zahlreiche Einsatzmöglichkeiten in der Industrie, wenn man bedenkt, daß in der deutschen Industrie noch in den 90er Jahren jährlich Dampf mit einem Energiegehalt von 30.000 bis 40.000 MW/a eingesetzt wurde. Dieser wurde durch Verbrennung von Kohlenwasserstoffen erzeugt. Der HTR kann neben der üblichen Stromerzeugung daher auch industrielle Großfeuerungsanlagen ersetzen.

Ein Anwendungsbereich, für den der HTR ursprünglich eigentlich entwickelt worden ist, war die hydrierende Kohlevergasung. Bei der vom HTR gelieferten hohen Temperatur reagieren Kohle und Wasserdampf in einem Wirbelbett miteinander. Dabei entsteht ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, das in einem nachgeschalteten Prozeß in Methan umgewandelt werden kann.

Interessanter und inzwischen sehr aktuell ist die Methanisierung von Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) zu Methan oder höherwertigen Kohlenwasserstoffketten. Auf diese Weise ließen sich die Verbrennungsgase der Kohlenwasserstoffe (CO_2 und H_2O) im Kreis führen (recyclen) und unter Einsatz der Kernenergie des HTR wieder in Kohlenwasserstoffe zurückverwandeln. Es ist erstaunlich, daß die gleichen Leute, die uns mit einer angeblichen Klimakatastrophe erschrecken wollen, die Voraussetzung für ein Recycling des CO_2 in Deutschland verhindert haben.

Der überhitzte Dampf aus dem HTR hat noch weitere Nutzungsmöglichkeiten, die der Verknappung der Ölreserven entgegenwirken könnte. Mit Hilfe dieser Reaktorwärme würde es nämlich wirtschaftlich möglich, die Ölreserven in den riesigen Teersand- oder Ölschieferlagergebieten abzubauen, die vor allem in Kanada und China, aber auch in anderen Weltgegenden, vorkommen.

IV. Besondere Vorteile

Der erste funktionstüchtige 300-MWe-Kugelbett-HTR wurde daher in Hamm-Uentrop im Ruhrgebiet gebaut und nach zwei Betriebsjahren, in denen er über eine Milliarde kWh erzeugte, stillgelegt. Nach zahlreichen mehr oder weniger willkürlichen Verschärfungen der ursprünglichen Auflagen, verabredeten fünf Ministerpräsidenten der SPD, darunter auch Johannes Rau und Gerhard Schröder, den Ausstieg aus der Kernenergie. Die erste gemeinsame Tat war der Widerruf der Betriebsgenehmigung für den HTR-300, als die Industrie nicht mehr bereit war, die ständig zusätzlich erhobenen finanziellen Belastungen alleine zu tragen.

Das in Deutschland angesammelte Wissen wurde - wie im Falle anderer Technologien vom Fax bis zum Transrapid - vom Ausland verwertet, in diesem Falle von China und Südafrika. China verfügt über große Teersandgebiete, Südafrika über große Lager an Kohle, die mit Hilfe des HTR veredelt werden können.

China betreibt seit März 2001 einen 10-MW-Versuchsreaktor nach dem Kugelbettprinzip und baut nun zwei 250 MW Reaktoren in Modulbauweise. In Südafrika haben die Bauarbeiten für ein solches Modul von 100 MW bereits begonnen, liegen aber derzeit aus finanziellen Gründen auf Eis. An dem Projekt beteiligen sich neben dem südafrikanischen Versorgungsunternehmen Eskom die Firmen British Nuclear Fuels und die US-Firma Exelon, die 40 bis 50 dieser Reaktoren in Nordamerika einsetzen will. Die Regierung in Pretoria hat dem Projekt, nach dem mehrere unabhängige Studien jeden Zweifel an der Machbarkeit beseitigen konnten und dem Reaktor bescheinigt haben, daß er katastrophensicher ist, inzwischen die Zustimmung erteilt.

Teil 10: Ist der Ausstieg aus der Kernenergie moralisch vertretbar?

- I. Praktische Gerechtigkeit
 - II. Friedenssicherung
 - III. Umweltschutz
-

Ehrlich streiten über Kernenergie

1999 schrieb Prof. Dr. Ing. D. Schwarz aus seinem Privatvermögen für denjenigen einen Preis von 100.000 DM aus, der den Nachweis erbringen kann, daß der Ausstieg aus der Kernenergie ethisch zu fordern oder auch nur zu verantworten sei. In seinem Schreiben an zahlreiche bekannte Kernkraftgegner erläuterte er sein Vorhaben: „Es gibt viele Atomkraftgegner, darunter auch viele, die ihre Haltung für ethisch gerechtfertigt halten. Die meisten weigern sich aber, diese Auffassung gegen begründete Kritik zu verteidigen.“ Bis zu seinem kürzlichen Unfalltod hat sich bei Prof. Schwarz niemand um das nach eindeutigen Kriterien ausgeschriebene Preisgeld beworben.

In Erinnerung an Prof. Schwarz soll hier der Nachweis der ethischen Vertretbarkeit oder Nichtvertretbarkeit der Kernenergie auf drei Ebenen erörtert werden. Als erster ethischer Maßstab wäre die *praktische Gerechtigkeit* zu nennen, nämlich die Forderung, allen Menschen einer Generation, aber auch den folgenden Generationen, auf Dauer die Voraussetzungen einer menschenwürdigen Existenz zu sichern. Dazu gehören die Versorgung mit Gütern, aber auch die Wahrung des Friedens, wenn wachsender Streit um die knapper werdenden Nahrungsmittel und Süßwasservorräte droht. Die zweite Ebene betrifft den Schutz der Natur vor Mißbrauch und die *Förderung und Besserung der Biosphäre*, in der die Menschen leben. Die dritte Ebene hat etwas mit der *Kultur des Menschen* zu tun und ließe sich als Schaffung menschenwürdiger Arbeitsplätze und Betätigungsmöglichkeiten der Menschen verstehen, durch die sie ihrem Leben Inhalt, Sinn und Wert verleihen können. Der Maßstab wäre die Frage, ob man durch den Ausstieg aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie den angesprochenen Zielen näher kommt oder sich vielmehr von ihnen entfernt.

I. Praktische Gerechtigkeit

Vor langer Zeit, nämlich auf ihrem Parteitag 1956 in München, forderte die SPD die rasche Entwicklung der friedlichen Nutzung der Kernenergie als objektive Voraussetzung für die Überwindung von Not und Elend besonders in den unterentwickelten Ländern.

Der Zusammenhang von Entwicklung und Energieverbrauch ist nicht zu leugnen. So berichtete die *Financial Times Deutschland* am 22. Januar 2003, daß China auf der Suche nach neuen Lieferquellen für den wach-

I. Praktische Gerechtigkeit

senden Rohölbedarf des Landes zunehmend Rückschläge erlebt. Das Land war bis 1990 autark und muß als Folge seines Aufbauprogramms, das seiner riesigen Bevölkerung eine bisher nur geringfügig bessere Grundversorgung sichern half, inzwischen ein Drittel seines Rohölbedarfs importieren.

Die steigende Nachfrage nach Öl, Kohle und Gas treibt zweifellos die Ölpreise auf den Weltmärkten hoch. Steigende Rohölpreise machen vor allem armen Ländern zu schaffen, die auf Erdölimporte angewiesen sind. In diesen Ländern ist schon heute das Überlebensrisiko der Bevölkerung um Größenordnungen höher als das Risiko, das von Kernkraftwerken einfacher Bauart mit geringem Sicherheitsstandard ausgeht. Nach Angaben der UNO leiden 800 Millionen Arme in der Welt Hunger. Rund 200 Millionen Kinder haben infolge der Unterernährung und Unterversorgung bleibende, geistige und körperliche Schäden erlitten, und jährlich sterben etwa 30 Millionen Menschen vorzeitig an den Folgen der Not - die Hälfte von ihnen bereits im Kindesalter. Auf rund eine Milliarde schätzt die UNO die Zahl der Menschen, die als Folge der Not und sich verschlechternder Umweltbedingungen umsiedeln müssen.

Das Fehlen oder die Unerschwinglichkeit von Energie ist zwar nur ein Grund neben anderen für die wachsende Not, aber es ist auch offensichtlich, daß die zur Behebung der Not erforderlichen Versorgungsgüter bei allen anderen günstigen Reformen nicht ohne Energie hergestellt werden können.

Wird der Energiepreis angehoben oder sein Anstieg in Kauf genommen, dann werden diese Völker „unter Lebensbedingungen gestellt, die geeignet sind, deren körperliche Zerstörung ganz oder teilweise herbeizuführen“. Genau so definiert unser Strafgesetzbuch (Par. 220a, Ziffer 3) Völkermord. Natürlich bilden die Energiekosten neben Auflagen des IWF und gezielter Spekulationsoperationen nur einen Faktor bei der Verelendung der Völker. Die Anhebung der Energiekosten durch den Ausstieg aus der Kernenergie ist aber mindestens eine - ebenfalls strafbare - „Beihilfe zum Völkermord“. In vielen entwicklungspolitischen Studien wird vor allem auf die Knappheit von sauberem Trinkwasser verwiesen. Ein Blick auf die Erdkarte zeigt, dass es auf der Erde keineswegs an Wasser fehlt, wohl aber an Energie, um das reichlich vorhandene Wasser in einen

Ehrlich streiten über Kernenergie

für den Menschen und seine Landwirtschaft verwendbaren Zustand zu bringen.

II. Friedenssicherung

Der Irakkrieg war sicherlich nicht nur ein Raubkrieg um das knapper werdende Erdöl. Vielmehr spielt die Kontrolle der Energiereserven eine wichtige Rolle im Bestreben, die Macht über die Welt auszuweiten und diese Kontrolle zu verfestigen. Energie ist für eine Gesellschaft das, was die Nahrung für den einzelnen Menschen ist. Wer die entsprechende Versorgung kontrolliert, kann den einzelnen oder Gesellschaften auch ein bestimmtes, scheinbar freiwilliges Verhalten abpressen. Was aber ist Machtausübung anderes als die Nötigung, sich so zu verhalten, wie es der Machtausübende wünscht? Der Ausstieg aus der Kernenergie wird diese Art der Machtausübung und Erpreßbarkeit national wie auch international deutlich verstärken.

Die Rolle der Kernenergie ist in diesem Zusammenhang sogar besonders wichtig. Die hohe Energiedichte in den nuklearen Brennstoffen und der relativ geringe Anteil der direkten Brennstoffkosten bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie ermöglicht es - anders als im Fall von Öl, Kohle und Gas - auch kleineren Nationen wie Deutschland, sich auf engem Raum relativ große Energievorräte anzulegen und sich so gegen derartige Erpressungsversuche zu schützen. Im Fall der Kernfusion gäbe es überhaupt keine Möglichkeit mehr, anderen die Verwertung von Kernbrennstoffen vorzuenthalten. Der Ausstieg aus der Kernenergie erschwert nicht nur die wissenschaftlich-technische Realisierung der Kernfusion, er verknüpft nicht nur die verfügbaren Energiereserven mit entsprechendem Preisanstieg, sondern macht als Folge der Knappheit auch Verteilungskämpfe um die Ressourcen wahrscheinlicher.

Das gilt neben dem schon erwähnten Wasser auch für alle anderen Arten von Rohstoffen: In einem Kubikkilometer normalen Erdreichs sind alle Rohstoffe und Materialien enthalten, welche die Menschheit benötigt. Die noch vorherrschende Energieknappheit ist der einzige Grund, weshalb immer noch nach Lagerstätten Ausschau gehalten wird, in denen einzelne Stoffe in besonders hoher Konzentration vorhanden sind. Ein systematisches Rohstoffmanagement, dem eine sehr hohe Energiedichte zur Verfügung stünde, könnte mit höherer Energieeffizienz die Rohstoff-

III. Umweltschutz

beschaffung aus normalem Oberflächengestein bewältigen. Die dafür benötigte Energiequelle steht spätestens mit der Beherrschung der *Kernfusion* zur Verfügung. In der „Fusionsfackel“ ließe sich nämlich dieses Gestein in Plasma umwandeln, und die von den Elektronen befreiten Kerne könnten sich an spezifisch angereicherten Platten nach den Elementen getrennt niederschlagen. Dabei würde wie in einer Batterie nahezu verlustfrei elektrische Energie gewonnen.

III. Umweltschutz

Der Ausstieg aus der Kernenergie verhindert auch einen wirksamen, wirklichen Umweltschutz und ein entsprechendes, möglichst vollständiges Recycling aller Abfallstoffe. Der Grund, warum das so ist, ließe sich zwar leicht einsehen, wird aber von den wenigsten Kernkraftgegnern durchdacht.

Alle Umweltprobleme gehen im Grunde auf zwei Problemarten zurück: Zum einen entstehen durch menschliche Eingriffe im Zuge der Energieerzeugung, Güterproduktion oder ihrer Verwendung chemische Verbindungen (Abfälle), die sich nicht weiter verwenden lassen. Die entsprechenden Moleküle sammeln sich in der Umwelt an, bis sie aufgrund von Verteilungsproblemen an bestimmten Orten einen schädlichen Dosiswert erreichen oder überschreiten.

Wenn man nun bedenkt, daß alle Stoffe dieser Erde aus molekularen Verbindungen der nur rund 90 verschiedenen Elemente bestehen, dann wird deutlich, daß sich alle lästigen oder gefährlichen chemischen Verbindungen in ihre Bestandteile - nämlich diese Elemente - zerlegen lassen. Sie können im Gegenzug dann wieder zu den gewünschten Verbindungen zusammengebracht werden, die als Werkstoffe einen hohen Gebrauchswert haben. Hinzu kommt die Einsicht, daß stofflich gesehen die Erde ein weitgehend geschlossenes System ist. Das heißt, Stoffe können im nennenswerten Umfang weder von außen hinzukommen noch nach außen abgegeben werden.

Der Schlüssel, um beide mögliche Mißstände - die Ansammlung gefährlicher Stoffe oder das Verschwinden benötigter Stoffe an bestimmten Stellen der Erdoberfläche - zu beheben, ist die Verfügbarkeit über Energie. Die Spaltung der Moleküle in ihre Elemente, um daraus nützliche

Ehrlich streiten über Kernenergie

chemische Verbindungen zu machen, ist jedoch erst wirtschaftlich machbar und sinnvoll, wenn eine andere, wesentlich dichtere Energiequelle als die der chemischen Bindungskräfte zur Verfügung steht. Nur weil diese nicht in geeigneter Menge und zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten zur Verfügung steht, bleiben Abfälle liegen. Erst die millionenfach dichteren Kernbindungskräfte machen es sinnvoll, damit die entsprechend weniger festen molekularen Verbindungen aufzubrechen und deren Bestandteile neu zu verfügen. Etwas Ähnliches mit den molekularen Bindungskräften versuchen zu wollen, gleicht dem Versuch, den Teufel durch Bezebeub austreiben zu wollen.

Die dazu benötigte hohe Energiedichte läßt erkennen, warum der oft vorgetragene Hinweis auf der Erde reichlich vorhandene, sogn. „Alternative Energie“ keinen Ausweg aus der Energieknappheit bietet. Diese Energieform hat den Nachteil, daß sie nur unregelmäßig zur Verfügung steht und nur in geringer Dichte anfällt. Der eigentliche Aufwand ihrer Nutzung besteht nämlich darin, diese Energie einzusammeln und zu verdichten. Das gleiche, was für Walderdbeeren gilt, trifft auch auf die Sonnenenergie zu. Obwohl diese im Wald kostenlos zur Verfügung stehen, erzielen sie auf dem Wochenmarkt hohe Preise und niemand käme freiwillig auf die Idee, die Nahrungsversorgung der Menschen wieder (wie im Paläolithikum) auf die „von Natur“ kostenlos angebotenen Waldfrüchte zu gründen.

Warum versucht man Ähnliches im Bereich der erneuerbaren Energie? Die eigentlichen Kosten der Sonnenenergie entstehen beim Sammeln und Verdichten dieser Energieform. Diese Tätigkeit und die dazu erforderlichen Anlagen verschlingen mehr Energie, als mit ihnen an nutzbarer Energie schließlich gewonnen wird. In Geld ausgedrückt wird das klarer: Wer eine Energieanlage für hundert Euro kauft, um dann in Cent-Beträgen Energie zu erzeugen, und schließlich, wenn die Anlage verbraucht ist und verschrottet werden muß, gerade 80 Euro zurückgewonnen hat, der hat ein schlechtes Geschäft gemacht. Höhere Energiepreise mildern dieses Mißverhältnis nicht, sondern verschärfen es noch. Müßten die Solaranlagen schließlich selbst mit Hilfe der Solarenergie hergestellt werden, wird der trügerische Charakter der Hoffnung auf diese Energiequelle vollends offensichtlich: Die Erweiterung des Produktionsapparates ließe sich nur noch durch drastische Senkung der Versorgung erzielen. Hinter der Propaganda erneuerbarer Energien versteckt sich das politi-

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

sche Ziel, eine stationäre (statische) Gesellschaft mit einer streng begrenzten Anzahl von Menschen durchzusetzen.

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

In Deutschland

Deutschland hatte in den Jahren von 1960 bis 1990 eine sehr leistungsfähige Nuklearindustrie aufgebaut, die bis zu einem Drittel des Bedarfs an elektrischen Strom vorwiegend im Grundlastbereich decken konnte. In den 70er und 80er Jahren sind in Deutschland die damals modernsten Kernreaktoren und Nukleartechniken entwickelt worden, die auch für den Export vorgesehen waren. Glanzstück dieser Industrie war der inhärent sichere Hochtemperatur-Thoriumreaktor (HTHR). Neben elektrischem Strom wollte man mit diesem Reaktor aus CO₂, Kohle und Wasser erst Synthesegas und schließlich Wasserstoff, Benzin, Methanol oder Kunststoffe usw. herstellen und dazu noch Prozesswärme für beliebige industrielle Anwendungen liefern. Ein weiterer Hoffnungsträger war der Natrium-gekühlte Schnelle Brutreaktor (SNR 300). Mit diesem Reaktortyp wollte man die Energieausbeute von Uran um das Sechzigfache steigern und Thorium, das 10 Mal reichlicher als Uran in der Erdkruste vorkommt, in Kernbrennstoff umwandeln. Schließlich sind schnelle Brutreaktoren auch die Vorformen der sogenannten Transmutationsreaktoren, in denen Transurane, die über lange Zeiträume radioaktiv sind, gespalten und die instabilen Kerne der radioaktiven Spaltprodukte stabilisiert und neutralisiert werden können.

Die Entwicklung dieser Möglichkeiten wurde inzwischen vollständig aufgegeben. Im Jahr 2000 vereinbarten Bundesregierung und die vier großen Versorgungsunternehmen (Viag, Veba, RWE, EnBW) die "geordneten Beendigung der Nutzung der Kernenergie" und den Ausstieg bis zum Jahr 2021, wenn als letztes das Kernkraftwerk (KKW) Neckarwestheim 2 vom Netz gehen soll. Da sich die Umstellung auf sogenannte erneuerbare Energieträger als problematischer und kostspieliger als erwartet erwies, beschlossen Bundesregierung und Bundestag im Oktober 2010 für die noch arbeitenden KKWe eine bescheidene Laufzeitverlängerung. Die 7 vor 1980 gebauten Reaktoren sollten weitere 8 Jahre, die restlichen

Ehrlich streiten über Kernenergie

10 noch weitere 14 Jahre Strom ins Netz liefern dürfen. Damit wurde die Laufzeit der KKW von 32 auf rund 40 Jahre angehoben. Das betraf 17 Kernreaktoren an 12 Standorten in Deutschland mit einer jährlichen Stromproduktion von rund 140 Milliarden kWh. Doch bekräftigten bei dieser Gelegenheit Regierung und Parteien den Ausstiegsbeschluss und erklärten, dass sie in der Kerntechnologie nur noch eine „Brückentechnologie“ sehen wollen.

Dann ereigneten sich am 11.3.2011 das einzigartige Erdbeben (8.9 auf der Richterskala) und der anschließende Tsunami (mit einer 13 m hohen Flutwelle) in Japan. Über 10.000 Japaner wurden getötet, 300.000 wurden obdachlos. Es wurden auch einige Menschen durch eine Überdosis an Strahlung aus den Kernkraftwerken bei Fukushima gesundheitlich geschädigt. Dies dürfte aber eher dem mangelhaften Sicherheitstechnischen Zustand der Kraftwerke zuzuschreiben sein, die damals aus diesem Grunde abgeschaltet werden sollen. Schon ein sehr starkes 7.9-Erdbeben, wie es bisher in Japan öfters vorgekommen war und das nur etwa ein Dreißigsten der Energie eines 8.9 Erdbebens freisetzt, würde in Deutschlands Städten so verheerende Schäden anrichten und so viele Menschenleben kosten, dass die Rolle der Kernkraftwerke dabei überhaupt nicht von Belang wäre. In Deutschland sterben aber jährlich rund 4000 Menschen bei Verkehrsunfällen auf der Straße. Der ICE-Unfall von Eschede im Jahre 1998 kostete über hundert Menschenleben. Sollen deshalb der Verkehr auf der Straße und mit Hochgeschwindigkeitszügen eingestellt werden? Ähnliches gilt für die Luftfahrt mit zahlreichen Unfalltoten oder für den Schiffsverkehr nach dem Unfall der Titanic und mehrerer Fähren in jüngerer Zeit (z.B. September 1994 Untergang der Estonia mit 852 Opfern). Als der Banqiao Damm (für „alternative“ Energie) in Südchina 1975 brach, starben unmittelbar 26,000 Menschen und später 145.000 an der daraufhin ausbrechenden Seuche.

Die Medienberichterstattung sprengte in Deutschland wie auf Kommando alle Proportionen und alle Elitären von den Parteispitze bis zu den Top-Managern überschlugen sich in zur Schaustellung der Atomangst. Infolge dessen wurden 7 Kernkraftwerke sofort vom Netz genommen und an ihrer Stelle „Atom-Strom“ aus Frankreich importiert. Alle Maßgeblichen beteuern nun den „alternativlosen“ Ausstieg aus der Kernenergie und den Wunsch Deutschland zum Musterexperiment für die Energieversorgung durch alternative Energien zu machen.

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

Auch die Nuklear-Industrie und die großen Energieversorgungsunternehmen (EVU) hoffen nicht mehr auf eine Renaissance der Kernenergie in Deutschland. Allerdings erwarten sie eine solche im Ausland und bewerben sich darum, sich dort technisch und finanziell am Aus- und Neubau von KKWen beteiligen zu dürfen. Doch dürften ihre Chancen dazu wegen des Ausstiegsbeschlusses im eigenen Land deutlich sinken.

Die EVU versuchen sich durch die Beteiligung an europäischen Kernkraftprojekten auf diese für den Industriestandort Deutschland bedrohliche Situation einzustellen. RWE und E.on halten zur Zeit weltweit Anteile an 23 Kernreaktor-Blöcken. Zusätzlich versuchte die RWE sich am bulgarischen KKW Belene, in dem zwei neue Reaktorblöcke der III. Generation gebaut werden sollen, und am rumänischen KKW Cernavoda 3 und 4 zu beteiligen, scheitert damit aber, wie es scheint. Bei Neubauvorhaben in England sind RWE und E.ON noch im Gespräch. Jedenfalls haben die Unternehmen Anfang 2009 ein gemeinsames Unternehmen für den Bau neuer KKW in Großbritannien gegründet. Auch gelang es E.on, eine Rahmenvereinbarung über die Zusammenarbeit bei der Kernforschung und KKW-Entwicklung mit dem französischen Energie-Kommissariat abzuschließen.

Siemens hat sich Anfang 2009 aus seiner Beteiligung am französischen Atom-Konzern Areva zurückgezogen und im März 2009 mit dem russischen Konzern Rosatom auf ein Gemeinschaftsunternehmen geeinigt, um wenigstens mit nichtnukleare Komponenten, der Kraftwerksleittechnik, mit Dampfturbinen und Generatoren am weltweiten Ausbau der Kernenergie beteiligt zu sein. Siemens beteiligt sich auf diese Weise am Bau des neuen argentinischen Reaktors Atucha II und an der Modernisierung der beiden Kernkraftwerke St. Lucie und Turkey Point in Florida. Die Firma SGL Carbon Wiesbaden liefert die Graphitausstattung für den mit deutschen Lizenzen gebauten südafrikanischen Kugelhaufen-Hochtemperaturreaktor PBMR (dessen Weiterbau dort zur Zeit aus finanziellen Gründen gestoppt ist) und verhandelt in der gleichen Sache mit China, das ebenfalls den HTHR weiterentwickelt und bereits einen eigenen Prototyp betreibt und an zwei HTHRen baut. An der Entwicklung der Brennelemente für den südafrikanischen PBMR ist die Firma Nukem aus Hanau mit einem 40-köpfigen Team von Entwicklungsingenieuren beteiligt. Den Bereich der Nukem, der sich mit dem Rückbau kerntechnischer

Ehrlich streiten über Kernenergie

Anlagen befasst, hatte am 14.9.2009 die russische Firma Atomstroyexport übernommen.

Die Siempelkamp-Gruppe in Krefeld liefert maschinentechnische Ausrüstungen für KKWe, darunter Brennelemente, Lademaschinen, Spannvorrichtungen zum Öffnen des Reaktordeckels, Castor-Behälter, Sicherheitsschleusen und den "Core Catcher". Der Letztgenannte fängt bei einem GAU (Größter anzunehmender Unfall), wenn das Reaktordruckgefäß durchschmelzen sollte, das Material auf und verhindert seine Ausbreitung. Diese Lieferungen gehen zu 100% ins Ausland. Außerdem arbeitet dort eine Ingenieursgruppe mit besonderer Erfahrung bei Berechnungen „rund um das KKW“ für Staaten und Unternehmen, die sich in Kerntechnik engagieren wollen.

An der Realisierung eines europäischen Transmutationsreaktors zur Neutralisierung lange strahlender Nuklearabfälle beteiligen sich Mitarbeiter deutscher Forschungsinstitute (im FZK Karlsruhe und GSI Darmstadt). Dies ist nur deshalb noch politisch erlaubt, weil eine solche Anlage nicht als Kernkraftwerk, sondern politisch korrekt als Behandlungsmaschine für Nuklearabfälle eingestuft wird.

Die Anderen und die Kerntechnik, allgemein

In der übrigen Welt hat seit einigen Jahren ein Gesinnungswandel eingesetzt. Man spricht von einer Renaissance der Kernenergie. Sie zeigt sich u.a. am dramatischen Wertzuwachs der Kapitalisierung von Uranbergwerken und der Unternehmen, die Kernbrennstoff aufbereiten. Dies geschieht im Hinblick darauf, dass zur Zeit 47 Reaktorblöcke neu gebaut und 186 konkret geplant werden, von denen für 120 der Baubeginn in den kommenden 2 – 3 Jahren vorgesehen ist. 42 Nationen befassen sich mit längerfristigen Planungsarbeiten für den Einstieg in die Kerntechnik und 7 weitere Nationen stehen im Entscheidungsprozess, sich ebenfalls in Zukunft auf die friedliche Nutzung der Kernenergie vorbereiten zu wollen.

In Ländern mit einer umfangreichen Nuklearindustrie wie Frankreich, Südkorea, China, Indien und Russland wird der weitere Ausbau überwiegend staatlich geleitete und finanziert, in anderen, wie zum Beispiel England und den USA, werden Unternehmen staatlich unterstützt, die in den

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

Bau neuer KKW und deren Weiterentwicklung investieren wollen. 19 aufstrebende Nationen vor allem in Asien und im Nahen Osten haben mit Herstellern bereits Verträge über den Bau oder die Entwicklung eigener KKW abgeschlossen.

2001, ein Jahr nach dem deutschen Ausstiegsbeschluss, haben 9 Nationen das Gründungsdokument des „Internationalen Forums IV. Generation“ (GIF) unterschrieben, nämlich: Argentinien, Brasilien, Kanada, Frankreich, Japan, Republik Korea, Republik Südafrika, Großbritannien, USA. Dem Forum schlossen sich später noch die Schweiz, EURATOM und 2006 die VR China und Russland an. Ziel ist die Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Realisierung der nächsten Generation von KKWen, die dem Bedarf des 21. Jahrhunderts und den gestiegenen Sicherheitsbedürfnissen gerecht werden. Mit dem Bau der ersten solcher Kraftwerke rechnet man zwischen 2015 und 2030. Deutschland ist zwar Mitglied der EURATOM, beteiligt es sich offiziell aber nicht mehr an der Reaktor-Entwicklung. Staatliche Mittel werden allenfalls noch für die Sicherheitsforschung zur Verfügung gestellt. Aber selbst diese ist ohne Beteiligung an neuen Reaktorentwicklungen kaum noch sinnvoll.

An folgenden Reaktorkonzepten der IV Generation arbeitet die GIF-Gruppe, am:

GFR, einem mit Helium gekühlten Reaktor mit schnellen Neutronen, einer Betriebstemperatur von 850 °C und geschlossenem Brennstoffkreislauf,

VHTR, einem Graphit-moderierten, Helium-gekühlten „Sehr-hoch-Temperatur-Reaktor“ mit endlagerfähigen Brennelementen und einer Betriebstemperatur von 900 – 1000 °C, (nach dem Modell der stillgelegten, deutschen HTHRen in Jülich und Hamm-Uetrop),

SCWR, einem superkritischen, wassergekühlten Hochtemperatur- und Hochdruck-Reaktor, mit einer Betriebstemperatur von 510 – 625 °C,

SFR, einem Natrium-gekühlten, und am LFR, einem Blei-Wismut-gekühlten Reaktor (wie einmal in Kalkar gebaut und vor Inbetriebnahme stillgelegt) mit schnellen Neutronen und der Fähigkeit, Uran und Thorium in Kernbrennstoff umzuwandeln und schwere instabile Kerne (Transurane) zu spalten oder zusammen mit leichteren Spaltprodukten zu neut-

Ehrlich streiten über Kernenergie

realisieren. Seine Betriebstemperatur wird zwischen 480 und 800 °C liegen;

MSR, einem durch ein umlaufendes, flüssiges Fluoridsalz-Brennstoff-Gemisch mit schnellen Neutronen betriebener Transmutationsreaktor mit einer Betriebstemperatur zwischen 700 und 800 °C.

Neben der erhöhten Sicherheit sollen die Entwicklungen der GIF-Gruppe vor allem zum Brüten neuer Kernbrennstoffe und zur Transmutation strahlender Abfallprodukte beitragen. Mit ihren eigenen Worten heißt das: „Diese Systeme bieten signifikante Fortschritte in Nachhaltigkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit, Schutz gegen Weiterverbreitung und in physikalischem Schutz.“

Einstellung zur Kernenergie im übrigen Europa

Fünf europäische Länder hatten sich ausdrücklich für den Ausstieg aus der Kernenergie entschieden: Belgien, Deutschland, Italien, Österreich und Schweden. Über **Holland**, das den Ausbau seiner Kernenergie-Kapazität 1986 unterbrochen hatte, schrieb die European Energy Review am 13.1.2011, das Land wolle aus der Subventionierung der sogenannten erneuerbaren Energien (Sonne, Wind) auszusteigen und stattdessen wieder zur Kernenergie zurückkehren. Inzwischen hat das Land die Betriebsdauer ihres KKW's Borsele um weitere 20 Jahre bis 2033 verlängert. An der Technischen Hochschule Delft läuft die Planung neuer KKW's an.

Italien und Schweden haben inzwischen ihre Meinung geändert. Nach der italienischen Abgeordnetenkammer hat am 9.7.2009 auch der Senat den vor über 21 Jahren beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie rückgängig gemacht und den Weg zum Bau neuer KKW's in Italien frei gegeben. Der italienische Stromversorger Enel S.p.A. und das französische Staatsunternehmen Electricité de France (EDF) haben im August 2009 ein Gemeinschaftsunternehmen gegründet, um die Errichtung von mindestens 4 EPR-Reaktoren in Italien zu prüfen. Ein erster Block soll bis 2020 in Betrieb gehen. Bisher war die italienische Enel bereits zu 12,5% an dem ersten EPR-Reaktorblock Flamanville 3 in Frankreich beteiligt und hält Mehrheitsbeteiligung an der slowakischen Firma Slovenske Elektrarne, die das KKW Mochovce betreibt und liefert daher die

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

konventionellen Teile für die im Bau befindlichen Blöcke Mochovce 3 und 4.

Das **Schwedische Parlament** hat im Juni 2010 das seit 1984 geltende Verbot, neue KKW zu bauen, und das Gesetz zur Abwicklung von Kernenergie von 1997 aufgehoben. Es hat anerkannt, dass man unter Berücksichtigung der Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, des Klimaschutzes und der Umweltverträglichkeit auf Kernenergie nicht mehr verzichten könne. Die vorhandenen 10 KKWe sollen allmählich durch Neubauten ersetzt werden. Schon 2009 hat man sich in Abstimmung mit der Gemeinden für ein Endlager am Standort Forsmark entschieden. Der Vorstand von E.ON Sverige, Per Lindell, teilte mit, dass das Unternehmen statt des 473 MW Blocks in Oskarshamn I einen neuen Block mit einer 4-mal höheren Leistung plane.

Belgien konnte sich wie Deutschland bis vor kurzem nur zu einer Laufzeitverlängerung für die 3 ältesten KKWe Doel 1, Doel 2 und Tihange 1 um 10 Jahre durchringen.

In **Frankreich** war die Nutzung der Kernenergie seit dem Ölpreis-Schock von 1974 nie zum Problem geworden. Bei seinem Besuchs der Baustelle des Europäischen Druckwasser-Reaktor (EPR) in Flamanville sagte Staatspräsident Sarkozy am 6.2.2009: "Frankreich, das weder Erdöl noch Erdgas besitzt, wird mehr Strom exportieren und seinen EPR-Reaktor weltweit verkaufen. Ein EPR produziert rund 12 Mrd. kWh pro Jahr. Würden diese zu heutigen Preisen exportiert, könnte das Land jährlich Exporterlöse von rund 600 Mio. Euro erzielen. Darauf könne Frankreich nicht verzichten." Dabei stellte er den Bau eines zweiten EPR (in Penly) und den eines dritten in Aussicht. Am EPR in Flamanville wird seit Dezember 2007 gebaut. Der Baubeginn für den EPR in Penly ist für 2012 vorgesehen. An einem 100-MW Hochtemperatur-Forschungsreaktor wird seit 2007 in Cadarache gearbeitet, um Materialien für Reaktoren der IV Generation zu erproben. Mit Schnellen Brutreaktoren hat Frankreich bereits umfangreiche Erfahrungen gesammelt. Nun trägt es zusammen mit Italien und Spanien Vorarbeiten für das Transmutationskonzept von Carlo Rubbia. Dafür wurde im März 1997 eigens das Laboratorio del Amplificador de Energia in Zaragoza in Spanien eingerichtet. Im Februar kam es im spanischen Parlament auch zu einer positiven Neubewertung der Kernenergie. Frankreichs staatlicher Stromkonzern EDF betreibt zusam-

Ehrlich streiten über Kernenergie

men mit der französischen Firma Areva aggressiv und mit Erfolg die Kooperation mit anderen Staaten im Kerntechnischen Bereich und darüber den Verkauf seiner KKWe.

In **England** hatte noch die Labour-Regierung 2008 erkannt, dass der Anteil der nuklearen Stromerzeugung von 20 auf 40% angehoben werden und dazu mindesten 20 neue KKWe gebaut werden müssten. Dazu wurden Angebote eingeholt, die zur Zeit geprüft werden. Das britische Energieministerium hat am 9.11.2009 zehn mögliche Standorte für den Bau neuer KKWe genehmigt: Bradwell, Braystones, Hartlepool, Heysham, Hinkley Point, Kirksanton, Oldbury, Sizewell, Sellafield und Wylfa. Entsprechende Bauanträge für neue KKWe sollen innerhalb eines Jahres bewilligt werden. Die französische EDF möchte vier Reaktoren an zwei Standorten bauen. Die Firma Horizon Nuclear Power Ltd., ein Unternehmen der E.ON UK und der RWEnpower, plant, 2020 ihr erstes KKW in Wylfa in Wales ans Netz zu bringen und ein zweites in Oldbury an der Severn nördlich von Bristol zu bauen, jedes mit einer Kapazität von 3.000 MW. EDF und der britische Öl- und Gaskonzern Centrica plc wollen durch ihre gemeinsame Tochter Lake Acquisitions Ltd. die Firma British Energy BE übernehmen, die bisher schon acht KKWe betreibt und als ersten Schritt der Zusammenarbeit 4 neue KKW des Typs EPR in England errichten wird.

Die großen Anstrengungen der **Schweiz**, Strom aus Wind- und Sonnenenergie zu erzeugen, haben sich als unerheblich erwiesen und konnten kein herkömmliches Kraftwerk ersetzen. Daher hatte der Bundesrat schon im Februar 2007 festgestellt: Kernenergie erfülle die Anforderungen, die die Bundesverfassung an die Energieversorgung stelle. Sie liefere umweltfreundlich elektrische Energie in ausreichenden Mengen zu wirtschaftlich angemessenen Bedingungen und benötige dazu eine vergleichsweise geringe Landfläche. Daher will man in der Schweiz trotz ertragreicher Wasserkraftwerke die Reaktorblöcke Beznau 1 und 2 und Mühleberg durch neue KKWe ersetzen sowie die 2020 auslaufenden Stromlieferverträge mit Frankreich verlängern. Im Kanton Aargau wurde März 2010 das Planverfahren für das Ersatz-KKW Beznau mit einer Leistung von maximal 1.600 MW begonnen. Für zwei Ersatz-KKWe in Mühleberg und Gösgen wurden Anträge eingereicht. Das bisherige KKW Gösgen liefert inzwischen auch Prozesswärme an die Firmen Aarepapier AG und Cartaseta-Friedrich & Co im thermischen Gegenwert von 20.000

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

t Öl. Außerdem plant die Schweiz ein Endlager in einer wasserundurchlässigen Ton-Mergel-Schicht so, dass der eingelagerte Nuklearabbrand später problemlos wieder herausgeholt und gegebenenfalls weiterverarbeitet werden kann.

Finnland hatte den Mut, den ersten EPR-Reaktor überhaupt als Olkiluoto 3 zu bauen. Der Bau geriet in Verzug, doch der Reaktordruckbehälter ist bereits installiert. Anfang Juli 2010 hat das Parlament zwei Anträgen zum Bau von zwei weiteren EPR-Reaktoren zugestimmt. Einer soll als Olkiluoto 4 am gleichen Standort entstehen und der andere bei Simo oder Pyhäjoki. Seit Mai 2001 bereitet die finnische Regierung bei Olkiluoto ein geologisches Endlager für Nuklearabfälle vor. Man überprüft dort gerade in einem 420 Meter tiefen Stollen die geologischen Verhältnisse vor Ort. 2012 soll der Bauantrag für das grundsätzlich genehmigte Tiefenlager gestellt werden. Ob dort Wiederentnahme der radioaktiven Einlagerungen möglich sein wird, ist mir nicht bekannt.

Nachdem die EU **Litauen** gezwungen hatte, das technisch problematische KKW Ignalina Ende 2009 abzuschalten, muss es ein Drittel seines Strombedarfs importieren. Um das zu ändern, plant das Land zusammen mit seinen zwei baltischen Nachbarstaaten für 2015 ein neues KKW am Standort Visaginas im weißrussisch-lettisch-litauischen Dreiländereck. Es soll aus zwei Blöcken mit einer Gesamtleistung von bis zu 3.400 MW bestehen. Bundeskanzlerin Angela Merkel sagte am 5.9.2010 bei ihrem Besuch in Vilnius der litauischen Präsidentin Dalia Grybauskaitė ihre politische Unterstützung für das Projekt zu - ganz im Gegensatz zu ihrer Einstellung zu Nuklearvorhaben in Deutschland.

Das Öl-Land **Norwegen** verfügt über reichliche Thoriumreserven. Die Wirtschaftsverbände würden daher gerne kommerzielle Thorium-Reaktoren verwirklichen. Allerdings hat das Parlament ähnlich wie in Deutschland bereits zwei Mal entsprechende Pläne abgeschmettert. Man importiert weiterhin Nuklearstrom aus Schweden, denkt aber daran, Thorium als Kernbrennstoff zu exportieren.

Polen: Die französische EDF und die Polska Grupa Energetyczna haben im November 2009 die Zusammenarbeit im Bereich Kerntechnik vereinbart. Im Auftrag des polnischen Wirtschaftsministeriums werden 6 Standorten untersucht, ob sie sich für den Bau von KKWs eignen. An zwei Standorten sollen KKWs mit einer Leistung von je 3.000 MW gebaut

Ehrlich streiten über Kernenergie

werden. Der erste Block soll bereits Ende 2020 in Betrieb gehen. Nach Aussagen des polnischen Wirtschaftsministeriums hat man sich für die Zusammenarbeit mit Frankreich entschieden, weil das näherliegende Deutschland aus der Kernenergie aussteigen wolle.

Tschechien plant an dem von Österreich bekämpften Standort Temelin zwei weitere Blöcke. Außerdem werden die KKW-Blöcke bei Dukovany mit einer deutlichen Leistungssteigerung modernisiert. Die **Slowakische Republik** baut am Standort Bohunice einen neuen KKW-Block, nachdem als EU-Beitrittsbedingung die beiden älteren Reaktoren des KKW Bohunice Ende 2006 und Ende 2008 abgeschaltet werden mussten. Außerdem wurden Verträge über die Errichtung der zwei neuen Kernreaktoren Mochovce 3 und 4 geschlossen, die beide schon 2013 ans Netz gehen sollen. Auch die **slowenische Regierung** hatte im Januar 2010 dem Bau eines zweiten KKW-Blocks mit einer Leistung von 1 GW am Standort Krsko zugestimmt. Der erste Block war von Westinghouse gebaut worden und wird zusammen mit einem kroatischen EVU betrieben.

Die Leistung der vier Blöcke des KKW Paks in **Ungarn** aus den 1980er Jahren wurde durch Nachrüstung, dem das Parlament mit 94% der Stimmen zugestimmt hatte, auf 2.000 MW gesteigert. Sie liefern etwa 40% des Strombedarfs Ungarns. Die nukleare Kapazität soll weiter ausgebaut und dafür 2011 der Bau zweier neuer Blöcke ausgeschrieben werden.

In Cernavoda, **Rumänien**, konnte man die Fundamente und Reaktorgebäude für 4 CANDU-Blöcke besichtigen. Nach 1989 waren dort die Arbeiten an den Blöcken 2 bis 5 eingestellt worden. Doch beschloss man 2001, wenigstens einen weiteren Block fertigzustellen. Er ging im September 2007 ans Netz. Im Februar 2010 vereinbarte die rumänische Energo Nuclear SA mit der Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL) zwei weitere Blöcke fertig zu bauen. An der dazu gebildeten Projektgesellschaft halten der staatliche Betreiber SNN 51% und ENEL, RWE, CEZ, und GdF/SUEZ je 6,2% der Anteile mit einem entsprechenden Anrecht auf den dort erzeugten Strom.

Die **bulgarische Regierung** musste ihre KKW-Neubaupläne aus Geldmangel vorläufig stoppen, denn die RWE hatte sich im Oktober 2009 aus der vereinbarten Finanzierung zurückgezogen. Bei Belene und Kosloduj hatte man zwei KKW des russischen Bautyps AES-92 errichten wollen.

Großmächte und Kernenergie

Die USA (Die US-Regierung will die Bürgschaften für den KK-Neubau von 18,5 auf 55,5 Mrd. USD erhöhen, was die Finanzierung von 12 neuen KKW absichern würde. Die spannende Frage ist, ob die Betreiber angesichts der sinkenden Gaspreise in den USA und nach dem japanischen Shutdown-Desaster im Erdbebenfall die Investition noch vorantreiben. Southern Co (SO.N) und SCANA Corp (SCG.N) wollten den Bauantrag im 4. Q.2011 stellen

Die USA spielten eine Art Leitfunktion für den Westen. Nachdem man dort dreißig Jahre lang die friedliche Nutzung der Kernenergie behindert hatte, erklärte Präsident Obama Anfang 2010 in seiner Rede zur Lage der Nation: "Wir müssen eine neue Generation sicherer und sauberer Kernkraftwerke bauen" und begründete dies mit der Notwendigkeit, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und den Ausstoß von Treibhausgasen, insbesondere von CO₂, zu senken. Im Zuge dessen wurde bereits die Laufzeit von 61 der 104 KKW des Landes auf 60 Jahre verlängert. Gleichzeitig wurden der kerntechnischen Industrie Kreditgarantien im Wert von bis zu 55 Mrd. US-\$ eingeräumt. Mehrere Firmen verhandeln bereits mit dem US-Department of Energy (DoE) über die Vergabe dieser Gelder. Unabhängig davon gewährte der Präsident am 16.2.2010 Kreditbürgschaften in Höhe von 8,7 Mrd. US-\$ für den Neubau zweier KKW im Staat Georgia. Im März 2010 erhielt je ein Team der Firmen Westinghouse Electric Co. und General Atomics zur Entwicklung neuer Reaktorsysteme der IV. Generation, speziell des Helium-gekühlten Hochtemperaturreaktors 40 Mio. US-\$ zugesprochen. Das DoE hat außerdem mit den entsprechenden Behörden in Frankreich und Japan vereinbart, an der Entwicklung des Natrium-gekühlten Schnellen Brütters zusammenzuarbeiten.

In Georgia entstehen die ersten KKW-Neubauten der USA seit fast drei Jahrzehnten und sollen bis 2017 ans Netz gehen. Inzwischen wurden Anträge auf Baubewilligung für neue Reaktorblöcke an mehreren Standorten eingereicht, so zum Beispiel bei North Anna in Virginia, bei den Orten Matagorda und je zwei Blöcke bei Victoria und bei Bay City in Texas, einer bei Calvert Cliffs in Maryland und Bell Bend in Pennsylvania. Das Unternehmen Hyperion Power in Santa Fe entwickelt den in

Ehrlich streiten über Kernenergie

russischen U-Booten der Alpha-Klasse verwendeten kleinen Schnellen Brüter weiter, um daraus kombinierte Heizkraftwerke und Stromerzeuger für entlegene Gegenden zu schaffen. Ähnliches versucht die Firma Babcock&Wilcox und konnte für den geplanten 125 MW-Kleinreaktor bereits Verträge mit EVUen abschließen. Westinghouse Toshiba entwickelt für den gleichen Zweck einen inhärent sicheren, wartungsfreien Kleinreaktor im Bereich von 10 MW (el.) bis 50 MW (th.) und einen größeren, wassergekühlten 300 MW Reaktor mit Wartungsbedarf. Insbesondere für die wartungsfreien Kleinreaktoren erhofft man sich in den Entwicklungsländern einen großen Absatzmarkt.

Auch die kanadische Nuclear Safety Commission (CNSC) hat am 31.10.2009 die Betriebsgenehmigung der Candu-Reaktorblöcke des KKW Bruce A (Blöcke 1 bis 4) und Bruce B (Blöcke 5 bis 8) um weitere 5 Jahre verlängert; die Blöcke 1 und 2 werden zur Zeit modernisiert und auf eine Leistung von insgesamt 6.300 MW gebracht. In Alberta, der Schieferölregion, sollen weitere KKWe bei Whitemud errichtet werden. Die Ontario Power Generation (OPG) will in Darlington 4 CANDU-Blöcke mit je 878 MW Leistung umfassend modernisieren und die Lebensdauer um 30 Jahre verlängern. Auch die Betriebsdauer der 4 Blöcke bei Pickering B soll durch Investitionen um 10 Jahre verlängert werden. Die Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL) entwickelt zur Zeit einen neuen Advanced CANDU Reactor, den ACR-1000, und plant davon in den nächsten Jahren 12 Reaktoren (davon 4 in Kanada) bauen zu können.

Die BRIC-Staaten

Gegen die machtpolitische Arroganz „des Westens“ erhebt sich als neue wirtschaftspolitische Großmacht das Bündnis der großen, polyzentristisch orientierten Staaten Brasilien, Russland, Indien, China, die sogenannten BRIC Staaten. Unter ihnen ist Russland die älteste Nuklearmacht mit den umfassendsten kerntechnischen Erfahrungen, China die auf diesem Gebiet ambitionierteste, Indien die drittstärkste und Brasilien diejenige, die sich zuletzt aufgerafft hat, sich aus der wirtschaftlich depressiven, energiepolitischen Bevormundung zu befreien.

Am 15.4. 2009 hat die **russische Regierung** bei einer eingehenden Beratung in Udomlja über den Kurs, den das Land einschlagen soll, beschlossen, den Anteil der Kernenergie am Energiemix des Landes von derzeit 16% auf 25 bis 30% anzuheben. Dem entsprechend sollen bis 2030 26

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

neue KKW-Blöcken entstehen. Dafür ist zunächst der erdbebensichere Typ AES-2006 mit je 1.200 MW Leistung und zahlreichen ganz neuen Sicherungssystemen vorgesehen. Dieser Typ soll in Serie gefertigt und installiert werden. Die Staatsholding Rosatom soll dazu mit 50 Mrd. Rubel (1,13 Mrd. Euro) aus Steuergeldern unterstützt werden.

Am 21.1.2010 wurde schließlich ein Forschungsprogramm "Nukleare Energietechnologien der neuen Generation 2010 – 2015" mit drei Schwerpunkten beschlossen. Es fordert

1. die Weiterentwicklung der Schnellen Brutreaktoren, insbesondere die Verwendung metallischer Kühlmittel (Blei, Blei-Wismut, Natrium),
2. die Entwicklung neuer MOX Kernbrennstoffe.
3. die Wiederaufbereitung abgebrannter Brennstäbe.

Die russische Firma Techsnabexport (Tenex) unterhält mit drei amerikanischen Firmen Abkommen über die Lieferung von angereichertem Uran in die USA und wird damit zwischen 2014 und 2020 20 bis 25% des amerikanischen Bedarfs decken. Ähnliche Lieferverträge bestehen zu Firmen anderer Länder. Die Firma kontrolliert 40% der weltweiten Kapazitäten zur Urananreicherung und versorgt 74 KKW in 15 Ländern mit Brennstoff.

In Aktau am Kaspischen Meer ist bereits ein natriumgekühlter Schneller Brutreaktor (BN 350) mit 350 MW Leistung und in Belojarsk der weltgrößte BN 600 mit 600 MW zuverlässig in Betrieb. Am gleichen Standort wird seit 2006 am BN-800 gebaut, der 2012 den Betrieb aufnehmen soll.

In der Entwicklung befindet sich ein leistungsstarker BN-1800 (1.800 MW) und ein ganz neuer mit Blei gekühlter Schnelle Brüter BREST-300 und BREST-1200. Mit ihm will man aus Natur-Uran (U-238) Kernbrennstoff erbrüten und damit die Reichweite der Uranreserven um das 60-Fache erhöhen. Er ist auch als Transmutations-Reaktor ausgelegt, um in ihm langstrahlende Transurane (wie Americium, Curium, Neptunium und Plutonium) zu spalten und radioaktive Spaltprodukte wie (Cäsium-137, Cobalt-60, Strontium-90) zu stabilisieren.

In Russland werden auch kleine und mittlere KKW gebaut, die auf Barken montiert an der Küste oder über die großen Strömen transportiert, in entlegenen Gegenden am Ufer eingesandet werden können. Ein ähnliches

Ehrlich streiten über Kernenergie

Konzept war bereits in den siebziger Jahren von Thyssen Nord in Emden entwickelt worden, musste damals aber auf politischen Druck hin wieder aufgegeben werden. Am 30.6.2010 ist nun in St. Petersburg das erste solcher schwimmenden Kernkraftwerke von Stapel gelaufen. Es soll 2012 auf der Halbinsel Kamtschatka bei der Siedlung Viljuchinsk ans Netz gehen. Neben elektrischen Strom und Heizleistung dienen diese Anlagen auch zur Meerwasser-Entsalzung. Später ist der Export dieser in Serie gefertigten Anlagen nach Asien, Lateinamerika und Afrika vorgesehen.

An zahlreichen KKWen wird zur Zeit in Russland gebaut. Bei Rostow (Wolgograd) ging am 18.3.2010 der Block 2 ans Netz, an den Blöcken 3 und 4 wird gebaut. 2010 begannen die Bauarbeiten in Königsberg an den beiden Blöcke des KKW Baltiskaja mit je 1.250 MW Leistung. In der Nähe von St. Petersburg entstehen zwei Druckwasser-Reaktorblöcke der neuen Serie WWER-1200 und AES-2006. Insgesamt sind dort vier Blöcke geplant. Im Bau befindet sich auch noch das KKW Nowoworonesch II-1. Andere KKWe wie das in Kola werden modernisiert. Abgebrannter Kernbrennstäbe werden nicht endgelagert, sondern warten in Zwischenlagern darauf in einigen Jahrzehnten mit Schnellen Brütern weiterverarbeitet zu werden, um daraus neue Brennstoffe zu gewinnen und die Abfälle für die Endlagerung auf rund 10% ihres Umfangs zu verringern und in ihrer Radioaktivität stark zu dämpfen.

In **Weißrussland** will man in enger Kooperation mit Russland bereits bis 2020 30% des elektrischen Stroms nuklear erzeugen. Ende 2009 wurde mit russischer Finanzierung der Bau des ersten von zwei Reaktoren der russischen WWER-Serie bei Grodno begonnen. Für den Stromexport wird dort ein dritter Reaktor geplant.

Kasachstan erreichte 2009 mit einer Förderung von 14.000 t Uran den ersten Platz unter den Uranförderländern vor Kanada und Australien und besitzt einen 10%-igen Anteil an dem führenden Nuklearunternehmen der USA, Westinghouse Electric. Das Land wird seine eigene Kapazität an KKWen verdoppeln, die Uranfördermenge auf jährlich 18.000 t steigern und einen vollständigen Kernbrennstoffzyklus zustande bringen. In Angarsk besteht bereits ein "Internationales Zentrum für Urananreicherung" das zusammen mit Russland und der Ukraine betrieben wird. Ein Werk zur Herstellung von Brennelementen ist vorgesehen.

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

Die **ukrainisches** Parlament hatte am 15.1.2009 ein "Gesamtstaatliches Programm über die Stilllegung des KKW Tschernobyl und die Umwandlung des Objekts "Sarkophag" in ein ökologisch sicheres System beschlossen. Die Blöcke 1, 2 und 3 wurden bis Ende 2000 stillgelegt. Das Land erteilte am 9.6.2010 der russischen Firma Atomstroieexport den Auftrag bei der Fertigstellung der Blöcke 3 und 4 des KKW Kmelnitzki mit dem modernisierten Typ WWER 1000/V-392B mit zu wirken. Auch **Armenien** vereinbarte mit Russland August 2010 den Bau neue KKWe zunächst mit einem Auftragsvolumen von 5 Mrd. Dollar.

Nach der New York Times vom 24.3.2011 hat **Chinas** Legislative 3 Tage nach dem Reaktorunfall in Japan seinen 5 Jahresplan gebilligt, der den Bau eines Duzend neuer Kernkraftwerke vorsieht. Im Bau oder im fortgeschrittenen Projektierungsstadium sind derzeit 24 Reaktoren mit 25.400 MW Leistung in verschiedenen Landesteilen. Die Regierung will aber die Sicherheitsüberprüfung bei der Endzulassung neuer Reaktoren neu regeln. Bei den im Bau befindlichen Reaktoren handelt es sich nicht nur um chinesische Typen, sondern auch um fortgeschrittene ausländische Reaktoren, darunter zwei EPR-Reaktoren mit je 1650 MW, welche die französische Firma Areva in Taishan baut und die 2013 und 2015 ans Netz gehen sollen und die neuesten Reaktortypen aus Russland und den USA. Die importierten Reaktoren sollen die kerntechnischen Erfahrungen des Landes verbreitern. Geplant ist bis 2020 eine nukleare Gesamtleistung von 60.000 MW.

Am 4. Januar 2011 meldete die chinesische Nachrichtenagentur Yahoo News Erfolge bei der Herstellung neuer Brennelemente aus abgebrannten und wiederaufbereiteten Nuklearbrennstoffen. Bei der Entwicklung neuer eigener Reaktor-Typen genießt der Hochtemperatur-Reaktor HTR unter 16 nationalen Projekten, zu denen auch Schnelle Brutreaktoren gehören, höchste Priorität. China hat dazu deutsche Lizenzen erworben. Ein Kugelhaufen-Versuchsreaktor (10 MW th) arbeitet bereits in Changping auf dem Gelände des Institute of Nuclear and New Technology (INET) der Tsinghua-Universität. In Planung ist der HTR-10GT, bei dem eine Heliumturbine mit einem HTR-10-Reaktor gekoppelt wird. Der Bau eines gasgekühlten Demonstrationsreaktor High Temperature Pebble-Bed Module (HTR-PM) mit einer Leistung von 450 MW th begann 2009 nahe

Ehrlich streiten über Kernenergie

der Küstenstadt Rongcheng und soll 2013 abgeschlossen sein. 14 Tage vor dem Tsunami in Japan wurde die endgültige Genehmigung des HTR in Shidao erteilt. Bei Erfolg der beiden HTR-Demonstrationskraftwerke will man die HTR-Kapazität auf 4.000 MW (th), vorwiegend zur Lieferung industrieller Prozesswärme, ausbauen. Entsprechende Planungsarbeiten an einer 600 MW oder 1000 MW-Einheit, die aus mehreren Reaktormodulen besteht und mit superkritischen Dampf- und Helium-Turbinen arbeitet, sind angelaufen. Zur thermischen Wasserspaltung (Wasserstoffproduktion) wird ein HTR mit besonders hoher Betriebstemperatur entwickelt. Gleichzeitig wird eine Fabrik zur Herstellung von 280.000 HTR-Brennelementen im Jahr gebaut.

Taiwan betreibt 6 KKWe mit zusammen 5144 MW und nimmt demnächst zwei KKW-Blöcke mit je 1.350 MW Leistung in Lungmen 1 und 2 in Betrieb.

Die benachbarte **Mongolei** ist zwar politisch an der Unabhängigkeit von ihren starken Nachbarn interessiert, will aber aufgrund ihrer großen Uranvorkommen zunehmend enger mit Russland und China zusammenarbeiten. Aber auch Interessenten aus Frankreich, Kanada und Indien stehen diesbezüglich mit der Mongolischen Regierung in Verhandlungen. Beim Besuch des russischen Präsidenten wurde am 25.8. 2009 in Ulan-Bator ein Kooperationsabkommen zur gemeinsamen Uranförderung beschlossen. Der Rosatom-Chef Sergej Kirienko verhandelte bei dieser Gelegenheit über den Bau kleiner und mittlerer KKWe. Ob es dabei zu Verträgen kam, ist nicht bekannt. Jedenfalls wurden anlässlich des Besuchs des Ministerpräsident Chinas in Ulan-Bator am 2. Juni 2010 umfassende Kooperationsvereinbarung im kerntechnischen Bereich unterzeichnet. Der Staat hatte sich 2007 die Aufsicht über den Uranabbau und den Betrieb nuklearer Anlagen gesetzlich gesichert.

Im September 2009 erklärte **Indiens** Premierminister Manmohan Singh feierlich, dass sein Land künftig auf die Kernenergie setzen werde und zum größten Kernenergieproduzenten der Welt aufsteigen wolle. Bis zum Jahre 2050 sollen dafür KKWe mit 470.000 MW Gesamtleistung in Betrieb gehen. Der Kernenergieanteil an der Stromerzeugung, der heute noch bei 3% liegt, soll bis 2040 auf 40% gesteigert werden.

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

Das Land betreibt 19 KKW an 6 Standorten mit zusammen 4.340 MW Leistung. Zur Zeit wird an 5 Reaktorblöcken gebaut, 24 Blöcke befinden sich in Planung und vier weitere Projekte sind bereits bewilligt. Indien verfügt über eine eigene Reaktorlinien, den Schwerwasser-Reaktor PHWR (700 MW), von dem 12 Blöcke in Betrieb und zwei weitere in der Planung sind. Importiert und an eigene Bedürfnisse angepasst werden soll der moderne russische Druckwasser-Reaktor (WWER-1000 oder neu AES-92).

Langfristig sollen KKWe unterschiedlichen Typs mit 60.000 MW gebaut werden. Russland wird in Indien 12 KKWe bauen, 6 davon in den Jahren 2012 bis 2017. Dazu waren mit Russland im März 2010 Verträge über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Kerntechnik und die Lieferung von KKWen geschlossen worden. Die französische Areva hält ähnliche Verträge über den Bau von zwei EPR-Reaktoren an der indischen Westküste in Jaitapur. Es ist beabsichtigt dort später sechs Blöcke zu errichten. In den Bundesstaaten Gujarat und Andhra Pradesh wurde der Bau zweier neuer KKWe durch amerikanische Unternehmen bewilligt. Auch mit Kanada unterhält Indien seit Juni 2010 Verträge über den Import von Nukleartechnologie und Uran.

Das Indira-Gandhi-Kernforschungszentrum (IGCAR) betreibt bei Kalpakkam seit 1985 einen Schnellen Brüter (FBTR mit 13,5 MW) als Testreaktor und entwickelte einen entsprechenden Brutreaktor mit 500 MW weiter. Zwei Reaktoren dieses Typs arbeiten bereits am gleichen Standort, zwei weitere Blöcke sind in Planung. Wegen der großen Thorium-Vorkommen des Landes wird im Kernforschungszentrum Bhabha (BARC) seit 2007 an einem 300 MW Thoriumreaktor (als Advanced Heavy Water Reactor AHWR) gearbeitet. Er soll wie der in Deutschland verhinderte HTR, inhärent sicher sein, das heißt sich bei ansteigender Betriebstemperatur aufgrund physikalischer Eigenschaften selbst abschalten und selbst beim Ausfall aller Kühlsysteme einen noch handhabbaren Temperaturbereich nicht übersteigen.

Als viertes Land im Bunde der BRIC Staaten hat auch **Brasilien** beschlossen, wieder zur Kernenergie zurückzukehren. Bereits in den 30er Jahren waren dort große Uran- und Thorium(Monozit)-Vorkommen entdeckt worden und machten Brasilien zum wichtigen Lieferant dieser

Ehrlich streiten über Kernenergie

Rohstoffe in die USA. 1968 unterzeichnete Brasilien mit der amerikanischen Firma Westinghouse einen Vertrag über den Bau seines ersten Kernkraftwerkes, Angara I, im Bundesstaat Rio de Janeiro. Der Bau wurde unter allerlei Vorwänden bis zur Fertigstellung der Anlage im Jahr 1981 hinausgezögert. Die Erfahrung veranlasste Brasilien sich an Deutschland zu wenden. 1975 unterzeichneten beide Länder ein Abkommen über die intensive wissenschaftlich/technische Zusammenarbeit im Bereich Kerntechnik, dazu über den Bau von acht großen Kernkraftwerken, einer Fabrik zur Herstellung von Reaktorgeräten, einer Anreicherungsanlage für Atombrennstoffe und einer Pilotanlage zur Wiederaufbereitung abgebrannter Kernbrennstäbe. Außerdem wurde vereinbart, dass eine brasilianische Kerntechnische Industrie aufgebaut werde, die allmählich den Bau von KKWen selbst übernehmen würde.

Unter US-Präsident Carter wurde das deutsch-brasilianische Atomabkommen schließlich - auch mit Hilfe der Medien und politischer Kreise in Deutschland - zu Fall gebracht. Das Kraftwerk Angara II ging erst 2000, 23 Jahre nach Baubeginn ohne direkte deutsche Beteiligung ans Netz. 2006 traf die brasilianische Regierung die Entscheidung, sich selbstbewusster wieder der Kernenergie zuzuwenden, ihr nationale Priorität einzuräumen und ein drittes Kernkraftwerk zu bauen. Am 18.8.2008 wurde ein bis 2030 reichender nationaler Energieplan vorgelegt, der Fertigstellung von Angra 3 und den Bau von vier neuen KKW-Blöcken mit 4.000 MW Leistung vorsah. Damit will man auch der Energiekrise im benachbarten Argentinien Abhilfe schaffen, wo es derzeit fast täglich zu Stromausfällen kommt. Wieder wurde Deutschland zur Zusammenarbeit eingeladen, lehnte aber aus politischen und ideologischen Gründen ab.

In Nachbarland **Argentinien** wandte sich seit 2005 der damalige Staatspräsident Nestor Kirchner dem Ausbau der Kernenergie zu. Seit 25.11.2009 ist ein neues Kernenergiegesetz in Kraft. Es ermöglicht den Bau eines 4. KKWs mit 1.200 MW Leistung sowie die Laufzeitverlängerung des seit 1983 in Betrieb befindlichen KKW Embalse (PHWR, 600 MW) um weitere 30 Jahre und bereitet den Bau des Schwerwasser-Reaktors Carem, der in Zusammenarbeit mit Siemens (analog zum Reaktor des KKW Grafenrheinfeld) entwickelt worden war, in Atucha II (745 MW) am Rio Parana vor. Die Arbeiten an dem zu 80% fertiggestellten Reaktor waren 1990 auf politischen Druck eingestellt worden. Siemens

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

Argentinien ist am Ausbau wieder beteiligt, allerdings nur im nichtnuklearen Bereich.

In **Mexiko** existierte das KKW Laguna Verde mit zwei Siedewasser-Reaktoren. 2005 wurde aufgrund politischen Drucks ihre Stilllegung beschlossen, ohne dass man einen Termin festgelegt hatte. Schon zwei Jahre später beschloss man statt der Stilllegung ihre Leistung zu erhöhen. Im Mai 2010 legte die staatliche Organisation Comisión Federal de Electricidad einen Versorgungsplan für Mexiko vor, der den Bau von 10 KKWen vorsieht. Allerdings ist ihre Finanzierung noch nicht gesichert.

Vom Öl zur Kernenergie!

Auch der an Erdöl reiche, politisch stark umkämpfte **Nahe Osten** wendet sich verstärkt der Kernenergie zu. Bis vor kurzem war das undenkbar, weil es hierfür offensichtlich ein allerdings nicht öffentlich ausgesprochenes Verbot der USA gab. Darauf deuteten verschiedene Indizien hin, wie z.B. der im Juli 1981 von den USA unterstützte Angriff Israels auf den Reaktor Osirak im Irak und der inoffizielle Angriff auf die von Nordkorea in Tibni in Syrien (Vgl. FAZ.net vom 1.2.2009 „Israels Angriff auf Syrien“) errichtete Nuklearanlage am 6.9. 2007 aber auch die Kampagne gegen Bemühungen des Iran und des Sudan eine eigene, vom Westen unabhängige Nuklear-Industrie zu entwickeln. Präsident Omar al-Bashir im Sudan hatte im März 2006 die Entwicklung eines zivilen Atomprogramms angekündigt, dem der iranische Ayatollah Ali Khomeini schon im April 2006 die Unterstützung seines Landes zugesagt hatte - was indirekt dazu führte, dass von interessierter Seite im Südsudan der Bürgerkrieg wieder angeheizt wurde.

Nun hat Präsident Obama aber Mitte 2009 ein bilaterales Abkommen zur Zusammenarbeit im Bereich der friedlichen Nutzung der Kernenergie mit den Vereinigten Arabischen Emiraten VAE gebilligt. Die VAE hatten schon 2007 die Errichtung eines KKW angekündigt und im April 2008 ihre politischen Absichten zum Einstieg in die Kerntechnik veröffentlicht. Die VAE hat mit dem Abkommen den 123-Vertrag unterzeichnet, der bei der Lieferung von US-Technologie die Urananreicherung oder die Wiederaufbereitung von abgebranntem Nuklearbrennstoff ausschließt, wodurch die Nuklearindustrie im Land in Abhängigkeit vom Ausland gehalten wird.

Ehrlich streiten über Kernenergie

ten wird. Das Abkommen hat eine Laufzeit von 30 Jahren. Den Auftrag bis 2020 vier Kernkraftwerke von je 1.400 MW zu errichten erhielt ein Konsortium unter Führung der Korea Electric Power Comp. (KEPCO). Der Generaldirektor der staatlichen Emirates Nuclear Energy Corp. (ENEC) Chaldun al-Mubarak sagte dazu: "Wir waren von der erstklassigen Sicherheitsphilosophie (des koreanischen Reaktortyps) beeindruckt." Der erste Reaktor soll 2017 ans Netz gehen, die weiteren bis 2020.

Oman unterzeichnete im Juni 2009 mit Russland ein Abkommen über die kerntechnische Zusammenarbeit. Schon im Oktober 2007 hatte König Hamad von **Bahrain** Interesse an KKWen geäußert und im März 2008 diesbezüglich ein Kooperationsabkommen mit den USA unterzeichnet, dem folgten im Dezember Gespräche mit Frankreich über ein Atomprogramm. Saeed Mohammed Al Tayer, Leiter der Elektrizitäts und Wasserbehörde **Dubai** kündigte am 5.7.2010 eine "Energy Strategy 2030" an, die neben neuen Kohle- auch Kernkraftwerke umfassen soll. **Qatar** ist mit Südkorea und Frankreich im Gespräch über die enge Zusammenarbeit im Bereich Kernenergie und begann im November 2008 die Suche nach dem bestmöglichen Standorts für sein KKW.

Auch der frühere Präsident Hosni Mubarak in **Ägypten** hatte am 29.10.2007 den Bau mehrerer KKWe mit den Worten angekündigt. "Mit dieser strategischen Entscheidung übernehmen wir neue Verantwortung und ziehen Konsequenzen aus der Energiesituation in Ägypten". Im August 2010 habe er - laut Nachrichtenagentur MENA - die Zustimmung zum Bau eines KKW bei Dabaa an der Mittelmeerküste erteilt. Bis 2025 sollten insgesamt vier KKWe in Ägypten den Betrieb aufnehmen. Das Programm dürften die Aufstände vorerst gestoppt haben.

Im Juni 2008 unterzeichneten Frankreich und **Algerien** ein ziviles Atomabkommen, dem im November eines mit Argentinien folgte. Und im Februar 2009 kündigte der algerische Energieminister Chakib Kheli an, Algerien werde ab 2020 über ein eigenes KKW verfügen und im Rhythmus von 5 Jahre jeweils ein neues in Betrieb nehmen. Der Vorsitzende von Algeriens Atomenergiebehörde Comena Dr.M. Derdour erklärte anlässlich eines Besuchs in Südafrika, wo er sich für den dortigen Hochtemperaturreaktor PBMR interessierte: "Wir planen den Bau von 1000 MW nuklearer Kapazität bis 2022 und 2.400 MW bis 2027. Da diese Energie sowohl für die Stromerzeugung als auch für die Meerwasserent-

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

salzung eingesetzt werden soll, scheint die Technologie des Kugelhaufenreaktors eine extrem attraktive Option zu sein."

Im Februar 2010 hat die Firma Areva mit der **jordanischen Regierung** einen Vertrag über 25 Jahre Uranerzabbau abgeschlossen. Jordanien verfügt nämlich über beträchtliche Uranerzvorkommen. Das Land möchte nicht nur Natururan, sondern so bald als möglich fertige Kernbrennstoffe exportieren. Die Ausbildung des benötigten Fachpersonals soll die Areva übernehmen. Die Bereitschaft der Firma wurde durch das Angebot untermauert, zwei KKWe am Golf von Akaba zu errichten. Zuvor, am 22.5.2009, hatte der Vorsitzende der jordanischen Atomkommission, Ch. Tukan in Moskau ähnliche 10-Jahres-Verträge mit der russischen Regierung und der Firma Rosatom über die Erschließung der Uranvorkommen, die Brennstoffaufbereitung und den Bau von vier KKWen abgeschlossen. Offensichtlich will das Land bis 2030 - wie geplant - ein Drittel seines Elektrizitätsbedarfs nuklear erzeugen können. Nun folgte am 15.02.2011 noch ein Abkommen über die nukleare Kooperation zwischen Jordanien und der Türkei.

Libyen war bereits 1970 einen Vertrag mit Russland und Belgien über die Lieferung zweier Reaktorblöcke vom Typ WWER-440 eingegangen. Die belgische Firma Belgonucleaire stieg auf Druck der USA wieder aus dem Vertrag aus. 1984 wurden die Arbeiten an dem Projekt und 1986 die Planungen an weiteren 9 Blöcken ausgesetzt. Libyen verfügt derzeit nur über einen Versuchsreaktor in Tajura. Im November 2008 wurde die Zusammenarbeit zwischen Libyen und Russland auf dem Gebiet der Kernenergie wieder aufgenommen, die die jüngsten Aufstände je nach Ausgang unterbrechen dürften.

Marokkos reiche Phosphatvorkommen enthalten bedeutende Anteile an Uran. Die Westsahara birgt vielleicht sogar die größten derzeit bekannten Uranvorkommen der Welt. Für sie beginnt sich Frankreich zu interessieren. Jedenfalls hatten **König Mohammed VI.** und Präsident Sarkozy im Oktober 2007 ein "neues großes Projekt für die friedliche Atomenergie" angekündigt. Geplant ist ein KKW in Sidi Boulbra und eine nukleare Meerwasserentsalzungsanlage in Tan Tan. Selbst **Tunesien** unterzeichneten mit Frankreich im April 2009 ein Abkommen zur Unterstützung des Landes bei der Entwicklung seines Nuklearprogramms im Umfang von zunächst 100 Mio. US- $\text{\$}$.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Pakistan betreibt bereits zwei KKW, eines in Karatschi (462 MW) und ein chinesisches in Chashma (460 MW). Zwei weitere Reaktoren zur Produktion von Waffenplutonium sollen sich in der Provinz Punjab nahe an der indischen Grenze befinden. Ein weiterer ziviler Reaktor aus chinesischer Produktion, Chashma 2, soll 2011 ans Netz gehen.

Selbst **Saudi-Arabien** will seinen künftigen Energiebedarf zunehmend mit Kernenergie decken und gründete dazu am 17. April 2010 die „King Abdullah City für atomare und erneuerbare Energie“. Der Präsident der Behörde Hashim Yamani sagte Reportern am 23.1.2011. Die wachsende Nachfrage nach Elektrizität erfordere bis zum Jahr 2032 eine Verdreifachung der installierten Kapazität auf 120.000 Megawatt. Der größte Teil der Grundlast soll durch Kernenergie gedeckt werden. Im Rahmen einer Initiative des Golf-Kooperationsrates GCC (Bahrain, Katar, Kuwait, Oman, Saudi-Arabien und VAE) werden dazu umfangreiche Studien durchgeführt und die Kooperation mit den Firmen Areva, Mitsubishi und der südkoreanischen Samsung vorbereitet. Auch gibt es zwischen Saudi-Arabien und den USA eine Absichtserklärung über die Zusammenarbeit in Forschung und Ausbildung im Bereich Kernenergie. Bereits im August 2009 hatte der saudische Minister für Wasser und Energie einen von der finnischen Firma Pöyry ausgearbeiteten Plan für den Bau des ersten KKW angekündigt.

Saudi-Arabien ist deshalb ein besonderer Fall, weil dieses Land ohne dies bisher einzugestehen, über Kernwaffen verfügt. Auf dem südlich von Riad gelegenen geheimen unterirdischen Militärgelände von al-Sulaiyil wurde die Überführung der Atomsprengköpfe für die *Ghauri-II*-Raketen mit einer Reichweite von 2.300 Kilometern aus Pakistan vorbereitet. Saudi-Arabien war seit Anfang der 1990er Jahren Nuklearmacht, hatte seine Waffen aber in Pakistan gelagert, um selbst nicht als solche in Erscheinung zu treten. Den westlichen Geheimdiensten war dies aber nicht unentdeckt geblieben. Chinesische Fachleute hatten in al-Sulaiyil gewaltige Raketensilos zunächst für konventionelle Raketen aber so gebaut, dass sie auch für Atomraketen tauglich waren. 1985 bis 1990, vor dem Einmarsch in Kuwait, erhielt Irak von Saudi-Arabien etwa fünf Milliarden Dollar zur Entwicklung eines Nuklearen Sprengkopfs. Danach bekam Pakistan den entsprechenden Zuschlag. Das belegen Dokumente, die der saudische UNO-Bürokrat Muhammad Khilewi, bei seinem Wechsel zur saudischen Opposition, 1994 veröffentlichte. Bis heute gab es keinen

Teil 11 Wie steht man weltweit zur Kernenergie?

offiziellen US-Protest oder gar Maßnahmen gegen das saudische Atomwaffenprogramm.

Ein Gewicht in der politisch im Umbruch begriffenen Nahost Region hat schließlich noch die **Türkei**. Im November 2007 hatte die türkische Regierung den Bau von drei KKWen angekündigt. Im Juni 2008 unterzeichneten Syrien und die Türkei ein Abkommen über die Zusammenarbeit in kerntechnischen Angelegenheiten. Konkreter war ein Abkommen zwischen Russland und der Türkei vom Mai 2010 über den Bau und Betrieb eines KKW. Es soll in der Nähe des Mittelmeerhafens Mercin, in der Region Akkuyu entstehen. Engagiert sind Atomstroiexport, Inter RAO EES und die türkische Gesellschaft Park Teknik. Man will vier Reaktoren vom Typ WWER KKW-2006 mit einer Leistung von je 1.200 MW bauen. Die türkische Genehmigungsbehörde TAEK hatte sich schon am 19.12.2008 für das russische Projekt entschieden. Die Finanzierung von etwa 20 Mrd. US-\$ und die Gesamtleitung übernimmt Rosatom.

Die Übrigen

Von den übrigen Staaten ist natürlich **Japan** im Bereich der Kernenergie am aktivsten. Das Land deckte etwa ein Drittel des Strombedarfs mit Kernenergie aus 54 Reaktoren. Bis 2030 sollten 14 neue KKW ans Netz gehen und der Anteil der Kernenergie auf 50% wachsen. Um von Energieimporten unabhängig zu werden, wollte man auf den Schnellen Brüter setzen. Desweiteren entwickelte man inhärent sichere Mini-KKWe für den Export in Entwicklungsländer und für den Eigenbedarf ganz neue KKWe der IV und V Generation. Ob es dabei bleibt, ist nach der jüngsten Katastrophe in Fukushima, zunächst unklar.

Am ehrgeizigsten von den kleineren Ländern ist vielleicht **Südkorea**. Das Land strebt eine Stromversorgung zu 59% aus Kernenergie an und baut dafür zur Zeit an 12 neuen KKWen aus eigener Entwicklung. Bis 2030 will das Land 80 KKW exportieren und damit einen Anteil von 20% am wachsenden Weltmarkt für Kernenergie erreichen. Zu diesem Zweck werden zur Zeit 2.800 neue Nuklearingenieure ausgebildet. Entsprechende Verhandlungen und Abschlüsse wurden mit Abu Dhabi, den Vereinigten Arabischen Emiraten, der Türkei, Brasilien, Südafrika und

Ehrlich streiten über Kernenergie

China getätigt. Um die Versorgung mit Kernbrennstoff zu sichern, investiert das Land in ausländische Uranbergwerke.

Das Department of Minerals and Energy **Südafrikas** hatte im August 2007 ein umfassendes Nuklearprogramm vorgestellt, das den Aufbau einer eigen kerntechnischen Industrie für den Bau von **KKWen**, den Uranabbau, die Urananreicherung, die Brennelemente-Herstellung, die Wiederaufarbeitung und Entsorgung vorsieht. Finanzierungsprobleme zwangen die Regierung Ende 2008 wieder schrittweise von dem Vorhaben abzurücken. 2010 wurde aus diesem Grund sogar die Weiterentwicklung des Hochtemperaturreaktors **PMBR** mit deutscher Lizenz auf Eis gelegt. Dieser Reaktortyp war wie in Deutschland ursprünglich zur Veredelung der reichen Kohlevorräte, zur Methanisierung von CO_2 , zur thermischen Wasserspaltung und zur Meerwasserentsalzung vorgesehen. An dem Projekt kann möglicherweise bald wieder weitergearbeitet werden, weil die USA und Algerien Interesse an der Weiterführung bekundet haben.

Malaysia beabsichtigt bis 2023 eigenen Nuklearstrom zu erzeugen. **Vietnam** hatte Mitte 2010 zum gleichen Zweck einen Vertrag mit den USA geschlossen. Danach darf Vietnam selbst Uran für seine in den nächsten 20 Jahren geplanten 14 **KKWe** anreichern. Die **Philippinen** besitzen bei Napot Point seit 1984 einen betriebsbereiten Westinghouse-Reaktor, für den sie zahlen, den sie pflegen aber nicht betreiben dürfen. Inzwischen ist die „Rehabilitierung“ des Reaktors vorgesehen. **Indonesien** will bis 2016 sein erstes **KKW** in Betrieb nehmen und das dafür benötigte Uran ausschließlich aus Australien beziehen. **Bangladesch** unterzeichnete 2009 mit Russland einen Vertrag über den Bau eines ersten **KKW** in Roopur. Und selbst ein Land wie **Nigeria** unterzeichnete im Juni 2009 ein Abkommen mit Russland über den Bau eines Forschungsreaktors und eines **KKWs**.

Australien besitzt zwar seit 1960 einen Forschungsreaktor ($10 \text{ MW}_{\text{th}}$, und seit 2007 sogar einen neuen mit $20 \text{ MW}_{\text{th}}$) aber kein **KKW**, dafür aber erhebliche Kohle- und Uranvorkommen für den Export. Den von den Konservativen geplanten Bau von **KKWen** hat Labour bisher erfolgreich verhindert.

Was lernt man daraus?

Zum Schluss. Fortschritt und menschliche Zivilisation

Das Verfügungsrecht über Kernenergie ist ein politisches und hat mit sogenannten Sicherheitsfragen kaum etwas zu tun. Immer mehr Länder machen sich von der energiepolitischen Bevormundung durch die führenden westlichen Industrieländer insbesondere deren Energiekonzerne unabhängig und bauen im Zuge dessen ihre kerntechnischen Kapazitäten aus. Wenn Deutschland trotz seiner einstigen technischen Führungsrolle auf diesem Gebiet auf die Kernenergie verzichtet, offenbart sich hier weder kluge Vorsicht noch machtpolitische Bescheidenheit, sondern ideologischer Wahn. Dass ihn inzwischen alle von den Medien als wählbar anerkannten Parteien teilen, deutet an, dass er aufoktroziert ist. Im Zuge der nuklearen Verblendung wurden hierzulande Arbeitsplätze vernichtet, Marktchancen verspielt und nicht zuletzt durch das Beharren auf sogenannte erneuerbare Energien die Wirtschaft des Landes zunehmend ruiniert. Was treibt wohl die Vertreter von Medien, Politik, Wirtschaft, Show-Business und Umweltorganisationen zu dieser auf der Erde einzigartigen Demontagepolitik?

Zum Schluss. Fortschritt und menschliche Zivilisation

Die Nutzung molekularer Bindungskräfte (z.B. $C + O_2 = CO_2 + \text{Wärmebewegung}$) bildet noch immer die Hauptenergiequelle unserer Industriegesellschaft. Seit der Menschwerdung war das Fehlen oder die Uerschwinglichkeit von Energie (neben der Kontrolle des Bodens und seiner Schätze) zunehmend die reale Ursache für Not und Elend, denn die zur Behebung der Not erforderlichen Versorgungsgüter lassen sich ohne Energie nicht herstellen. Not - vor allem die unnötig verlängerte und sinnlos beibehaltene - lenkt uns von uns selbst und von der Herausforderung an uns ab, „wesentlich“ zu werden, so wie es dem Wesen des Menschen entspricht.

Der Mensch ist erwiesenermaßen aber das Wesen, das sich - anders als Tiere - selbst entwickeln und über sich selbst hinauswachsen kann. Es ist uns Menschen „eigentümlich“, dass wir durch unseren ureigenen Beitrag, den jeder einzelne einzigartig zur Besserung der Lebensumstände unserer Mitmenschen oder der Biosphäre insgesamt beitragen kann und will, erst wir selbst werden.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Ein solcher eigener, schöpferischer Beitrag für andere - und sei es nur der gegläuckte Versuch, in traurigen Augen wieder den Schimmer von Freude zu wecken - oder die materielle Versorgung der Allgemeinheit zu verbessern, ist das einzige wirkliche „Eigentum“, das wir uns im Unterschied zu unwesentlichem Besitz erwerben können. Kreativität, Weiterentwicklung ist immer verbunden mit etwas verbunden, das religiös ausgedrückt Tod des alten und der Neugeburt des „neuen“ Menschen hieß. Wo werden größere Ängste frei als in solchen für das Menschsein so wesentlichen Übergängen?

Es wird behauptet, Technik habe mit Moral nichts zu tun, es käme nur darauf an, was der Mensch mit seinen technischen Möglichkeiten anfängt. Das mag in den meisten Fällen stimmen, trifft aber nicht auf die Ablehnung oder gar Verhinderung technischer Möglichkeiten zu, welche die Menschen von materiellem Mangel und Not befreien könnten - durch deren Verhinderung anderen eine menschenwürdigere Existenz oder der sog. „Überbevölkerung“ sogar die nackte Existenz verweigert wird. Eine solche Ablehnung ist eine grundlegende Frage der Moral. Ist es doch kaum verwerflicher, einen Menschen zu erschlagen, als ihn durch aufgezwungene Lebensumstände - wie es heute weltweit aus politischen, wirtschaftlichen und angeblichen umweltbedingten Gründen geschieht - verhungern zu lassen oder dies doch wenigstens billigend in Kauf zu nehmen.

Es wird ohne die Nutzung der Kerntechnik in Zukunft weder eine Industriegesellschaft noch eine menschenwürdige Zivilisation geben. Der Mensch bleibt in gewisser Weise noch menschlich, wenn es ihm die materiellen Umstände nicht erlauben, sich zu entwickeln. Wenn er sich aber aus Ängstlichkeit, Faulheit oder Schlechtigkeit selbst der Entwicklungsmöglichkeit beraubt, wird er mit Sicherheit unmenschlich und sinkt moralisch noch unter die Stufe des „bewußtlos unschuldigen“ Tieres.

Die Beherrschung der Kernenergie - nicht nur der Kernspaltung, von der hier weitgehend die Rede war, sondern mehr noch der Kernfusion, der Materie-Antimaterie-Reaktion und anderer Energie freisetzender Kernreaktionen - ist aus diesem Grunde eine Schicksalsfrage der Menschheit. Und das macht sie neben all den wissenschaftlichen und technischen Problemen, die im Zusammenhang mit der Verwendung der Kernenergie zu lösen sind, zu einer Frage der Moral. Die Kernenergie zu meistern, ist

Zum Schluss. Fortschritt und menschliche Zivilisation

nicht nur eine technische, auch nicht nur eine politische, sondern vor allem eine menschliche Aufgabe.

Die Menschheit steht heute vor einem ähnlichen Problem, wie die Anthropoiden zu Beginn der menschlichen Zivilisation. Damals ging es darum die animalische Angst vor der Beherrschung der molekularen Bindungskräfte außerhalb des eigenen Körpers (Feuer) zu überwinden. Feuer bot genügend „realen“ Anlass, davor Angst zu entwickeln. Ein Teil der Anthropoiden schaffte es diese Angst zu überwinden und wurde durch die produktive Beherrschung der molekularen Bindungskräfte zu Menschen, die es nicht schafften, blieben beziehungsweise wurden erst (wie neuere Forschungen herausgefunden haben wollen) zu Affen.

Wir stehen heute an der Schwelle zu Produktionsverhältnissen, die es wegen der ungeheuren technischen Versorgungsmöglichkeiten bei geringen Kosten immer durchschaubarer unmöglich machen, Menschen weiterhin durch Androhung von Not und Mangel zu einem fremdbestimmten Handeln zu zwingen. Wir stehen also an der Schwelle einer Gesellschaft, die nicht mehr durch Macht und wirtschaftliche Gewalt, sondern durch kluge, kreative, weiterführende Einfälle und Strategievorschläge überzeugt und geführt werden müsste. Das ist eine Horrorvorstellung sowohl für die heute mehr und mehr verkommene Macht-Elite wie für deren terrorisierte, verängstigte Gefolgschaft.

Zugleich stehen wir an der Schwelle, die uns Menschen vor die Wahl stellt, die Evolution der Biosphäre führend und gestaltend weiter zu entwickeln und dafür mehr und mehr die Verantwortung zu übernehmen, oder uns zu Objekten der biologischen Evolution - zu Tieren also - zurück zu entwickeln (worauf unsere derzeitige „Kultur“ hinzudeuten scheint) und damit unsere Vernunft wie auch unsere Verantwortung an eine metaphysische „Mutter Natur“ abzugeben. Daher ist unsere derzeitige Schwellensituation mit derjenigen der Anthropoiden an der Schwelle zum bisherigen Grad der Menschwerdung vergleichbar. Die Frage, die nuklearen Bindungskräfte beherrschen zu wollen, steht im Mittelpunkt der geforderten Entscheidung.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Glossar:

Abbrand	= Anteil des während des Reaktorbetriebs verbrauchten Kernbrennstoffs.
Absorber-, Abschalt- oder Regel-Stab	= Anordnungen aus Neutronen absorbierendem Material (Cadmium, Bor etc.) zur Regelung oder Beendigung der Reaktivität im Reaktor.
Aktivierung	= Vorgang, durch den Material durch Beschuss mit Neutronen, Protonen oder anderen Teilchen radioaktiv gemacht wird.
Alpha- Teilchen	= Kerne des Heliumatom, die beim Zerfall verschiedener radioaktiver Stoffe abgestoßen werden.
Anreicherung	= Vorgang, durch den der Anteil eines bestimmten Isotops in einem Element vergrößert wird.
Äquivalentdosis	= ein Maß für die Wirkung unterschiedlicher ionisierender Strahlungsarten auf den Menschen.
Becquerel (Bq)	= Ein Kernzerfall pro Sekunde (früher Curie).
Belastung/Exposition	= wie ein Körper oder Gegenstand einer Bestrahlung ausgesetzt ist. Wir bevorzugen „Exposition“, weil „Belastung“ von vornherein negativ besetzt ist.
Beta- Teilchen	= Elektron/Positron.
Bindungsenergie	= Die Energie, die aufgewendet werden muss, um Bestandteile eines Atomkerns (Neutronen/Protonen) voneinander zu trennen.
Blanket	= eine Umhüllung des Spaltstoffs eines Reaktors aus nichtspaltbarem Material, in dem durch Neutronenabsorption und Kernumwandlung spaltbares Material entsteht.
Brüten	= Umwandlung von nicht spaltbarem in spaltbares Material.
Brutreaktor	= ein Reaktor, der mehr Spaltstoff erzeugt als er selbst verbraucht.
Deuterium	= Wasserstoffisotop, dessen Kern ein Proton und ein Neutron enthält (schweres Wasserstoff).

Zum Schluss. Fortschritt und menschliche Zivilisation

Dosis	= Strahlungsenergie, die bei Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie auf die Materie übergeht.
Druckbehälter	= dickwandiger Stahlkessel, der die Spaltzone eines Reaktors umschließt.
Elektronenvolt	= die von einem einfach geladenen Teilchen (Elektron) gewonnene kinetische Energie aufgrund einer zusätzlichen Spannung von einem Volt.
Fusion	= Verschmelzung leichterer Kerne zu einem schwereren.
Gamma- Teilchen	= Energiequantum kurzwelliger, elektromagnetischer Strahlung.
Gammastrahlung	= kurzwellige elektromagnetische Strahlung sofern sie von einem Atomkern ausgestrahlt wird.
Gray	= übertragene Strahlungs-Energie von 1 Joule pro Kilogramm bestrahlter Substanz.
Halbwertszeit	Die Zeit in der die Hälfte der Kerne eines Radionuklids (radioaktiven Isotops) zerfällt. Für einige Radionuklide siehe Tabelle Seite nn.
Ion	elektrisch geladenes Teilchen (Atom oder Molekül), das durch Abspaltung oder Anlagerung von einem oder mehreren Elektronen oder bei der elektrolytischen Dissoziation von Molekülen in Lösungen entstehen kann.
Ionisation	Umwandlung von Atomen oder Molekülen in Ionen z.B. durch ,Alpha- Beta-, Gama- oder Neutronen-Strahlung.
Isotope	Atome derselben Anzahl von Protonen (desselben chemischen Elements) aber einer vom Standardelement abweichender Anzahl von Neutronen.
Kosmische (Höhen)Strahlung	=verschiedenartige Strahlung, die von außerhalb der Erde herrührt mit teilweise sehr hohen Energien.
Kritikalität (kritisch)	= Zustand eines Reaktors, in dem eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion abläuft.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Kühlmittel	= Stoffe, die der Wärmeableitung aus dem Reaktor dienen (Gase, Wasser bis hin zu flüssigem Metall).
Ladung eines Reaktors	= Kernbrennstoffmenge, die in einen Reaktor eingebracht wird.
LD (Letaldosis)	= Dosis ionisierender Strahlen, die ausreicht, den Tod herbeizuführen. Die mittlere Letaldosis (LD50) reicht aus, um die Hälfte der gleichermaßen bestrahlten Individuen zu töten (Beim Menschen sind das rund 400 rem).
Joule	= die intern. Maßeinheit für alle Formen thermischer, mechanischer sowie elektrischer Energie z.B. um 1 g Wasser um 15°C zu erwärmen.
MeV	= eine Million Elektronenvolt.
MW	= Leistung von einer Million Watt.
Moderator	= Material, das eingesetzt wird, um Neutronen auf eine gewünschte Geschwindigkeit abzubremesen (meist Wasser (H ₂ O), schweres Wasser (D ₂ O) oder Graphit).
Nachwärme	= Wärme die Nachabschaltung des Reaktors auf Grund des Zerfalls von Spaltprodukten entsteht.
Neutron	= Ungeladenes Kernteilchen mit der Masse eines Protons und eines Elektrons. Einzeln ist es instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 11,5 Minuten.
Photon	= Energiequantum der elektromagnetischen Strahlung.
Plasma	= Gasgemisch, in dem sich aufgrund der starken Wärmebewegung der Atome die Elektronen von ihren Kernen trennen.
Primärkühlmittel	= Kühlmittel, das zum Abführen der Wärme aus der Spaltzone eines Kernreaktors dient (Primärkreislauf).
Radioaktivität	= Eigenschaft bestimmter natürlicher oder künstlicher Kerne, sich ohne äußere Einwirkung selbst umzuwandeln. (Ursache liegt im Verhältnis Protonen : Neutronen im Kern).
Reaktivität	= Maß für das Abweichen eines Reaktors vom kritischen Zustand. Positive Reaktivität bedeutet, die Leistung des Reaktors steigt an, ist sie negativ, fällt sie ab.

Zum Schluss. Fortschritt und menschliche Zivilisation

Reaktorgift	= Substanzen die unerwünschterweise Neutronen absorbieren, wie z.B. die Spaltprodukte Xenon 135 oder Sarium 149.
Reflektor	= Materialschicht am Rand des Reaktors, die Neutronen in die Spaltzone zurückreflektiert.
rem	= Roentgen Equivalent Man (Mensch) Maß für die äquivalente biologische Schädlichkeit unterschiedlicher Strahlungsarten .
Roentgen	= eine veraltete Maßeinheit für die Ionendosis entspricht etwa 0,01 Gray.
Schweres Wasser	= D ₂ O. Wasser bei dem Wasserstoff (H) durch schweren Wasserstoff, Deuterium (D) ersetzt ist.
Sievert	= Äquivalentdosiswert für relative biologische Wirksamkeit.
Spallation	= Erzeugung von mehreren Neutronen und Protonen durch Beschuss eines hochenergetischen Teilchens.
Strahlenschäden	= Änderung eines (biologischen) Materials aufgrund der Einwirkung ionisierender Strahlen.
Target	= Stück Materie, auf das man Strahlung gezielt richtet.
Temperaturkoeffizient	= Reaktivitäts-Änderung aufgrund der Änderung der Betriebstemperatur. Der Koeffizient ist negativ, wenn bei steigender Temperatur die Reaktivität sinkt.
Transmutation	= Umwandlung eines Elements durch Hinzufügung oder Abspaltung von Neutronen oder Protonen zu/aus seinem Atomkern.
Transurane	= Chemisches Element mit einer Kernladungs- Protonen-Zahl größer als 92.
T-Zellen	= <i>T</i> -Lymphozyten, wichtigste <i>Zellen</i> der zellulären Abwehr.
Unterkritischer Reaktor	= Reaktor, in dem die Spaltvorgänge durch von außen eingeleitete Neutronen oder Protonen (Spallation) aufrechterhalten werden müssen.

Ehrlich streiten über Kernenergie

Wiederaufbereitung = Abtrennung der Spaltprodukte und Wiedergewinnung der Kernbrennstoffe (95%) aus abgebrannten Brennelementen.

INHALTSVERZEICHNIS

Ehrlich streiten über Kernenergie.....Fehler! Textmarke nicht definiert.

TEIL 1: DIE KERNENERGIE IST NICHT UNUMSTRITTEN. FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.

- I. Mehr als eine technische Frage.....6
- II. Die große Strompreisfrage7
- III. Fortschritt braucht Redlichkeit.....8

TEIL 2: QUELLEN DER ENERGIE 10

- I. Leben und Energie.....10
- II. Chemische Bindungsenergie12
- III. Äußere Anwendung chemischer Bindungsenergie12
- IV. Und nun die Kernenergie.....13

TEIL 3: WAS GESCHIEHT EIGENTLICH IM KERNREAKTOR? 18

- I. Meiler oder Ofen?.....19
- II. Einschluß des radioaktiven Materials.....19
- III. Der Spaltungsvorgang.....23

TEIL 4: WARUM DER „GAU“ BEHERRSCHBAR IST 27

- I. Was ist der „GAU“?28
- II. Sicherheitsprinzipien30
- III. Vergrößerung der Sicherheitsrisiken durch die Politik33

TEIL 5: WANN IST RADIOAKTIVITÄT GEFÄHRLICH?... 33

- I. Was macht die Radioaktivität gefährlich?35
- II. „Erst die Dosis macht das Gift“38
- III. Natürliche und zusätzliche Radioaktivität.....39
- IV. Übertriebene Angst vor Strahlung48

Zum Schluss. Fortschritt und menschliche Zivilisation

TEIL 6: DAS SOGENANNT E ABFALL-PROBLEM	50
I. Unnatürlich?	50
II. Abfall?	52
III. Abfälle und Abfallmengen	53
VI. Vorbereitung zur Endlagerung	57
V. Endlager	59
TEIL 7: FUSION	60
TEIL 8: TRANSMUTATION	70
I. Grundsätzliches	71
II. Die Neutronenquelle	75
TEIL 9: DER ÖKO-KERNREAKTOR	79
I. Der Kugelbettreaktor	80
II. Vor- und Nachteile niedriger Leistungsdichte	82
III. Brennelemente	83
IV. Besondere Vorteile	85
TEIL 10: IST DER AUSSTIEG AUS DER KERNENERGIE MORALISCH VERTRETBAR?	86
I. Praktische Gerechtigkeit	87
II. Friedenssicherung	89
III. Umweltschutz	90
TEIL 11: WIE STEHT DIE MENSCHHEIT WELTWEIT ZUR KERNENERGIE?	92
ZUM SCHLUSS: FORTSCHRITT UND MENSCHLICHE ZIVILISATION	116