

Aus der Neuen Solidarität Nr. 7/2003

Ehrlich streiten über Kernenergie

- Erster Teil -  
Von Dr. Helmut Böttiger

Auch unter den Lesern der Neuen Solidarität ist die Kernenergie nicht unumstritten. In Leserbriefen wurden wir aufgefordert, erneut Stellung zu beziehen. Wir tun dies in einer Serie, die das Thema ganz von vorn und grundsätzlich angeht.

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 Tod. Mit dem Stein hätte er Sterilität und 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; 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 Serie 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, die Neue Solidarität und die BüSo, 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 "hinterhältig" erörtern läßt, kommt außer Geschrei oder Achselzucken meist 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 Kernenergiedebatte nachdenken.

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 soll. 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 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. Dabei könnten die Verfechter der Kernenergie bei ihren Gegnern ebensogut sachfremde materielle Interessen ins Feld führen.

Die große Strompreisfrage

Die eine 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 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 (und das Ersparte gegebenenfalls an der Börse verspielen).

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 als Voraussetzung für höhere 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. Daß der vereinigte Chor der Medien so beharrlich auf Seiten der Kernkraftgegner erklingt, unterstreicht diese These.

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 erkauft werden mußte?

Gerät die Diskussion an diesen Punkt, läßt sie sich kaum weiterführen. Offensichtlich ist beides richtig: Der technische, vor allem der energietechnische Fortschritt hat dem Menschen kaum zu ermessenden Segen gebracht, aber er brachte in seiner Begleitung nicht zu bestreitendes menschliches Unglück mit, 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 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 befürwortete 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 Sache ist, dann ist sichergestellt, daß nichts dabei herauskommt und interessierte Kreise hinter den Kulissen treiben können, 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.

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

## Teil 2: Quellen der Energie

Ohne Energie läuft nichts. Energie ist, so die gängige Definition, die Fähigkeit, im physikalischen Sinn Arbeit zu verrichten. Laufen soll es, 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 Wasser in flüssigem Zustand 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, CO<sub>2</sub>, Wasser) umgewandelt.

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

Dieser Stoffwechsel ermöglicht es den Lebewesen, sich zu bewegen, Nahrung zu suchen, sich zu vermehren, kurz: zu leben. Dabei wird aus den eingenommenen Kohlehydraten und dem Luftsauerstoff O<sub>2</sub> zumeist Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O). Ein normaler Mensch atmet auf diese Weise pro Tag (24 Stunden) etwa 1 Kilogramm CO<sub>2</sub> aus.

Untergraben sich die Lebewesen allmählich ihre Existenzgrundlage, indem sie allen Sauerstoff umwandeln, oder erzeugen sie sich mit dem CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> und Sonnenenergie auf der Erde reichlich zur Verfügung, wie z.B. im tropischen Urwald, gedeiht das Leben üppig. Sind Wasser, CO<sub>2</sub> und Sonnenenergie nur spärlich vorhanden, wie in kalten oder trockenen Gebieten, dann wachsen die Pflanzen entsprechend dürrftig.

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 115jährige Buche) hat durchschnittlich 200000 Blätter mit 1200 m<sup>2</sup> Oberfläche, 1014 Chloroplasten, die zusammen 180g Chlorophyll enthalten. Ein solcher Baum nimmt täglich 9400 Liter CO<sub>2</sub> aus der Luft und stellt daraus und aus dem aufgenommenen Wasser 12 kg Kohlehydrate her. Nebenbei geben die Pflanzen, wenn sie wachsen, O<sub>2</sub> - also Sauerstoff - ab, den wir wieder einatmen können.

## II. Chemische Bindungsenergie

Betrachten wir einen Bestandteil des Kreislaufs, das 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 der Kerne 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 Alkali-element Natrium hat auf seiner äußersten Elektronenschale nur ein einsames Elektron. Nur noch ein einziges fehlt auf der äußeren Schale des Halogens Chlor. Beide Elemente verbinden sich 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 des jeweiligen Stoffs - einfach gesagt: die Energie, die aufgewandt werden muß, um den Stoff in alle seine atomaren Bestandteile zu zerlegen. Reagieren Stoffe mit niedriger Bindungsenergie so, daß

daraus Stoffe mit hoher Bindungsenergie entstehen, dann wird die Differenz freigesetzt und tritt meistens als Wärmebewegung seiner Teile, im Fall von Kohlenstoff und Sauerstoff z.B. als Wärme des Verbrennungsabgases CO<sub>2</sub> 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 beschränkte. 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 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), 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<sub>2</sub>-Moleküls aus Kohlenstoff und Sauerstoff. Ein Gramm Uran 235 setzt bei seiner Spaltung so viel Energie frei 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 x 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 7000 Tonnen Steinkohle freizusetzen. Daraus läßt sich erkennen, wie absurd es ist, von Energieknappheit zu reden. Knappheit ist aber eine wirtschaftliche Größe, sie geht in den Preis ein und rührt an mächtige menschliche Interessen. Doch noch stehen der friedlichen Nutzung der Kernfusion große technische 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 etwa 3 Tonnen CO<sub>2</sub> und je nach Qualität der Kohle gut 100kg Asche, die auch mit allerlei unangenehmen Stoffen vermischt ist.

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 erst 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 besondere Art 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. Dem wollen wir uns im nächsten Beitrag zuwenden.

### Teil 3: Was geschieht eigentlich im Kernreaktor?

Moderne Kernkraftwerke sind Wärmekraftwerke. Sie nutzen die bei der Kernspaltung als Wärme freigesetzte Energie wie andere Heizkraftwerke auch. 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, zum Brotschneiden etwa, Verwendung fanden. Hätten unsere Vorfahren deshalb auf Messer verzichten sollen? Wir haben uns inzwischen an diese Gefahr "gewöhnt", weil wir mit größeren Gefahren als mit Messerstechereien umgehen - 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 außer Kontrolle gerät;
3. geht wegen ihrer ionisierenden Strahlung auch von den Spaltprodukten Gefahr aus. Der Strahlung und dem Problem der Endlagerung nuklearer Abfälle werden wir ein eigenes Kapitel widmen.

#### 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 Kugelhaufenreaktor wurde ein nuklearer Reaktorofen konzipiert, auf den wir später zu sprechen kommen.

#### Einschluß des radioaktiven Materials

Entscheidend für die Nutzung der Kernenergie ist der zuverlässige Einschluß der Strahlungsquellen, vor allem der stark strahlenden Spaltprodukte. 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 gefährliche Strahler entstehen erst durch den Spaltprozeß und fallen als Spaltprodukte an. Sie werden auf mehrfache Weise eingeschlossen

Zunächst werden sie im nuklearen Brennstoff selbst eingeschlossen. Es handelt sich dabei vorwiegend um Uranerz (UO<sub>2</sub>), das vermahlen und zu fingerdicken Tabletten gepreßt wird. Die sich aus der Spaltung eines Kerns ergebenden Spaltprodukte bleiben weitgehend im 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 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. Das Gehäuse ist innen gegen Splitterwirkung und von außen gegen Flugzeugabstürze und Explosionen weitgehend geschützt.

Hinzu kommen Reinigungs- und Filtersysteme, die radioaktive Stoffe, die einzelne Barrieren doch überwunden haben sollten, z.B. aus dem Kühlmittel entfernen. 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 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.

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 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 Harrisburg nahe an eine Katastrophe herangeführt hatte. Um das zu verstehen, müssen wir uns den Kernspaltungsprozeß etwas näher ansehen.

## 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  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung, die 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 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 Neutronen aufnehmen, ohne selbst gespalten zu werden. Dazu zählen unter anderem die Brutstoffe wie das erwähnte Uran 238, aus dem die Brennstofftablette zum größten Teil besteht. Auch Spaltprodukte wie z.B. Xenon 135 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, denen zusätzliche leere oder mit Absorbermaterial gefüllte Stäbe zugeordnet werden, 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 Uran 238. Sein Anteil in den Brennstofftabletten fängt nun mehr Neutronen ein und senkt dadurch die Anzahl der Spaltvorgänge wieder. Mit der Temperatur des Moderators steigt die mittlere Geschwindigkeit der Neutronen, und dementsprechend sinkt die Wahrscheinlichkeit, daß sie von spaltfähigen Kernen eingefangen werden. Mit zunehmender Temperatur nimmt schließlich auch die Dichte des Moderators - besonders im Falle von Wasser - ab. Dadurch sinkt seine Bremswirkung auf die Neutronen, so daß sie eher von U-238-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 Spaltungsneutronen zu einer Leistungssteigerung des Reaktors führt, muß die erwähnte Gegenwirkung, der Temperaturkoeffizient, diese sogar überbieten. Im Endergebnis muß die Zahl der Spaltvorgänge 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 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

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 entgegenwirkende Temperaturkoeffizient zu spät folgt.

Das löste bei dem Betriebsversuch in Tschernobyl das Unglück aus, denn dort waren die Steuerstäbe bei niedriger Reaktorleistung und niedrigem Kühlmittelumlauf vollständig herausgefahren. 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 3000t schweren Reaktordeckel mit den Abschirmblöcken an und stellte ihn quer, so daß die flüchtigen radioaktiven Stoffe - die Edelgase, Jod 131 und Cäsium 137 - 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 Abschaltung 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 Xenon 135 nach der Abschaltung zunächst zu, erreicht nach etwa zehn Stunden den Höchststand, um nach weiteren 14 Stunden den Ausgangsstand zu unterlaufen. Xenon 135 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.

#### 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.

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

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.

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 standgehalten. Diese Gefahr wird inzwischen durch eine Stickstoffatmosphäre im Sicherheitsbehälter oder das Zusetzen von Wasserstoffrekombinatoren bekämpft.

Würden sich aus Reaktionen der Schmelze mit Bestandteilen des Fundaments nicht kondensierbare 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 nicht der Druck in der Sicherheitshülle entsprechend heruntergefahren wird. Nach den Berechnungen und dem heutigen Erkenntnisstand kann die Schmelze nicht genug Energie enthalten, um die Sicherheitshülle durch eine Dampfexplosion zu zerstören oder sie selbst zu durchschmelzen.

Zunehmende Qualitätskontrolle, eingebaute Redundanzen und Diversitäten bei den Ventilen und sonstigen Durchlässen, die aus dem Reaktorinneren 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 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.

### Sicherheitsprinzipien

Mit dem Betrieb der Reaktoren (inzwischen sind es über 10000 Reaktorbetriebsjahre aller Kernkraftwerke) sammeln sich immer mehr Erfahrungen an. Sie führen ständig zu weiteren Verbesserungen der Sicherheitstechnik. 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 und darauf falsch reagiert wird. Solche denkbaren Störfälle werden in Verbindung mit allerlei möglichen Einzelfehlern untersucht und durchgespielt.

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 und Tschernobyl, haben gezeigt, daß ihre Ursache vor allem in der Unkenntnis des Bedienungspersonals lag: Sie waren auf die eingetretenen Störfälle nicht vorbereitet, konnten sie nicht erkennen und behandelten sie demnach auch 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. Das Personal wußte z.B. nicht, daß die Reaktivität beim Abkühlen des Reaktors wieder sprunghaft ansteigen kann. Sie zogen die Steuerstäbe nach dem Abschalten ganz aus dem Reaktor.

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 in die Schulungs- und Trainingsunterlagen der Kraftwerksbetreiber, ihres Wartungspersonals, der Aufsichts-, Überwachungsbehörden und der Sachverständigen und ihre ständige Überwachungsarbeit und Sicherheitsprüfungen ein. 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:

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, udgl.

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 Sperrungen 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.

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 sie 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 - vor allem wegen des fehlenden Nachwuchses, der die erforderliche aufwendige Ausbildung auf sich nimmt - wesentlich unsicherer macht. Konsequenz wäre der sofortige und unbedingte Ausstieg aus der Kernenergienutzung gewesen, wenn man von ihrer Unbeherrschbarkeit überzeugt gewesen wäre. Der gewählte kostensparende Weg war der denkbar unsicherste, und dies legt nahe, daß "Sicherheitsbedenken" nur vorgeschobene Gründe für ganz andere wirtschaftliche und gesellschaftspolitische Absichten sind.

Teil 5: Wann ist Radioaktivität gefährlich?

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, wie ich im vierten Teil dieser Serie (siehe Neue Solidarität Nr. 10/2003) gezeigt habe, 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 diese Anregung 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 es, die Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeiteinheit festzustellen. Ein Kernzerfall pro Sekunde entspricht einem Becquerel (Bq). Die dabei übertragene Energie mißt man in Gray (Gy). 1 Gy entspricht der Strahlung von 1 Joule pro Kilogramm bestrahlter Substanz.

Da belebte Substanzen unterschiedlich auf die Strahlungsenergie unterschiedlicher Strahlungsarten reagieren, wird der Betrag mit einem in unzähligen Versuchen ermittelten Faktor der "relativen biologischen Wirksamkeit" multipliziert; man erhält dann als Äquivalentdosiswert 1 Sievert (Sv) oder 100 rem (Roentgen Equivalent Man). Dies gibt die Strahlungsintensität pro Zeit der Einwirkung an - so mißt man die Jahresdosis in Millisievert (mSv/a) oder in Millirem (mrem/a).

Da ein Atom eines Stoffes nur einmal zerfallen kann, ergibt sich ein Zusammenhang zwischen hoher Radioaktivität und 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 aber auch schwachstrahlende Elemente mit extrem langen Halbwertszeiten - 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.

Was macht die Radioaktivität gefährlich?

Radioaktivität bewirkt in der Materie, auf die sie trifft, entweder eine Ionisierung oder eine Anregung einzelner Atome. Bei der Ionisierung verändert sich die Ladung des Atoms, es entsteht ein Elektronenüberschuß oder ein Elektronenmangel. Bei der Anregung bleibt die Ladung gleich, aber die Elektronen verändern ihren Energiezustand. In beiden Fällen kommt es zu den gleichen biochemischen Wirkungen.

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 80000 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 Strahlenbelastung von 9 Sv aussetzte. In anderen untersuchten Fällen wurde zu Diagnosezwecken Thorium verabreicht, das die Leber mit über 10 Sv belastete. Aus diesen und vielen anderen Fällen gewann man statistische Werte über die Wirkung zu hoher Strahlendosen. Man vermehrte sie um einen Sicherheitsfaktor und erhielt die Richtwerte der Tabelle 1:

Tabelle 1: Auswirkung hoher Strahlenbelastung

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

In den genannten Fällen handelte es sich um extrem hohe, in Sv gemessene Dosiswerte. 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 für diese Fälle ein Gefährdungspotential zu ermitteln, wird oft die empirisch ermittelte Erkrankungswahrscheinlichkeit entsprechend geteilt. Gäbe es z.B. bei einer Dosis von n Sv eine höhere Krebswahrscheinlichkeit von 10 pro 1000 Betroffenen, würde man bei n mSv mit einer Krebswahrscheinlichkeit von 1/100 pro 1000 Betroffenen rechnen.

"Erst die Dosis macht das Gift"

Dieses formale Herunterrechnen führt zu grotesken Übertreibungen, die noch heute durch die Medien und die Literatur der Kernkraftgegner geistern. Tatsächlich bemerkte man jedoch schon bald nach Entdeckung der Röntgen- und gamma-Strahlen gesundheitsfördernde Wirkungen der ionisierenden Strahlung im relativ niedrigen zusätzlichen 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.

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 Herz-Kreislaufkrankheiten 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 also unter einer zehnmal höheren Strahlenbelastung, 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."

Natürliche und zusätzliche Radioaktivität

Nur im Hinblick auf die ionisierende Strahlung 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 Strahlenbelastung aus Boden und Gestein liegt bei 0,45 mSv.

Tabelle 2: Beispiele natürlicher Radioaktivität

in Kernzerfällen pro Sekunde (Bc)	
1mü Luft im Freien	14 Bc
1mü Luft in Gebäuden	50 Bc
Trinkwasser	0,6 bis 4 Bc/l (pro Liter)
Heilwasser	bis 37.000Bc/l
Fleisch, Gemüse, Brot, Milch	ca. 40 Bc/kg
der menschliche Körper	106 Bc/kg Körpergewicht

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 und Bergsteiger erhalten dadurch eine beträchtlich höhere Strahlendosis als die Bewohner des tiefliegenden Flachlands. Die durchschnittliche Belastung durch die kosmische Strahlung liegt bei 0,3 mSv. Schließlich enthält auch unser Körper radioaktive Stoffe wie C14 und Kalium 40 mit 0,25 mSv.

Zur natürlichen Hintergrundstrahlung, 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 Belastung 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.

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).

Tabelle 3: Energiegehalt der natürlichen Hintergrundstrahlung  
in mGy (mJ/kg bestrahlter Substanz, /a = pro Jahr bei nicht stetiger Disposition)

China (niedrigste Bereiche)	1,3
USA (Durchschnitt)	2,0
Mitteleuropa (Durchschnitt)	3,3
Nil-Delta	3,5
Arbeiter in kerntechn. Betrieben	3,5/a
Tschernobyl (an der Evakuierungsgrenze)	5,0
Vielflieger/Piloten	6-8/a
Kerala, Indien	4-23
Guarapara, Brasilien	10-18
Gerais, Brasilien	23
Grenzwert für Nukleararbeiter	26/a
Araxi, Brasilien	35
ermitteltes biologisches Optimum	100/a
Ramasar, Iran	243
Guarapara Strand	263

Die Menschen in den stark strahlenden Gebieten wurden ebenso wie Piloten oder Arbeiter in kerntechnischen Betrieben sehr intensiv untersucht. Dies ergab die genannten Hinweise auf die

lebensfördernde Wirkung einer leicht erhöhten Strahlung.

### 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 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.

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)

### Teil 6: Das sogenannte Abfall-Problem

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

Zum einen ist in dem "Atommüll" 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.

### 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.

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 Uranerztaschen 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 Uran<sup>235</sup> - nämlich nur 0,35% - enthielt wie gewöhnliches Uranerz (meist Uran<sup>238</sup>). Natürlich wollte man wissen, wie es dazu kam, da der Anteil von Uran<sup>235</sup> im natürlichen Uranerz keiner Willkür, sondern dem Naturgesetz der Halbwertszeit beim Zerfall radioaktiver Kerne unterliegt.

In den Urantaschen stieß man bald auf Spaltprodukte, die wegen ihrer Zusammensetzung und nach den Zerfallsgesetzen für radioaktive Kerne vor etwa 1,8Mrd. Jahren entstanden sein mußten. Uran<sup>235</sup> zerfällt schneller als Uran<sup>238</sup>. Man rechnete nach und stellte fest, daß das Uran vor 1,8Mrd. Jahren wenigstens 3% Uran<sup>235</sup> 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 1,8Mrd. Jahren gab es an dieser Stelle offenbar einen "natürlichen" Kernreaktor, der etwa 100000 Jahre lang in Betrieb war. Der Beweis dafür liegt in Form des stabilen Elements Ruthenium<sup>99</sup> vor, das sich allmählich aus dem radioaktiven Spaltprodukt Technetium<sup>99</sup> 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 stammt. Auch die Sonne, der riesige Fusionsreaktor am Himmel, hat die friedliche Nutzung der Kernenergie für Kernkraftgegner nicht "natürlicher" oder akzeptabler gemacht.

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 führte hier ja ein "Langzeitexperiment" zur Lagerung des Atommülls durch. 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 1,8Mrd. Jahren entstanden waren. Doch das soll kein Argument dafür sein, feste, radioaktive Spaltprodukte einfach vor Ort zu vergraben.

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 5Tonnen (t) des nicht radioaktiven Elements Kobalt<sup>59</sup> in Kernkraftwerken zum radioaktiven Kobalt<sup>60</sup> gebrütet, weil man es unter anderem in der Medizintechnik benötigt. Man könnte statt dessen ebensogut auf Cäsium<sup>137</sup> oder Technetium<sup>99</sup> 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. 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.

## 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 Filterrückstände aus dem Kühlmittelkreislauf und ähnliches dazu.

In einem Kraftwerk vom Typ Biblis (mit 1300MW Leistung) fallen pro Jahr etwa 330m<sup>3</sup> 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 9000t hochradioaktiver Abfälle, vor deren Strahlung Lebewesen geschützt werden müssen.<sup>1</sup> Weil nicht genügend Wiederaufbereitungsanlagen vorhanden sind, wird etwa nur die Hälfte des Brennstoffs wieder aufbereitet. Auf diese Weise haben sich bis zum Jahr 2000 etwa 200000t hochradioaktiver Abfälle angesammelt.<sup>2</sup> Hinzu kommen als Folge der Abrüstung etwa 250t Waffenplutonium und etwa 1000t hochangereichertes Waffenuuran, 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 2500GW-Jahren ergibt. Die im folgenden genannten Abfallmengen beziehen sich auf die Jahresproduktion eines Reaktors vom Typ Biblis B. Jährlich fallen hier 33t abgebrannter Brennstäbe an, das sind rund 5m<sup>3</sup> hochradioaktiver Abfälle.

Der größte Teil der abgebrannten Brennstäbe besteht allerdings noch immer aus Kernbrennstoff, der bei geeigneter Wiederaufbereitung weiter verheizt werden könnte. Von dem Uran<sup>235</sup>, dem eigentlichen Brennstoff, ist in den abgebrannten Brennelementen noch etwa ein Viertel der ursprünglichen Menge vorhanden - 31t sind wieder als Brennstoff verwendbares Uranoxid. Potentieller Nuklearbrennstoff sind auch die 301kg Plutonium, die aus Uran<sup>238</sup> gebrütet wurden. 1,35t Abfall stammt aus dem Strukturmaterial der Hüllrohre und ist weniger problematisch.

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

Unter den "Abfällen" befinden sich aber auch Spaltprodukte und Transurane<sup>3</sup> 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.<sup>4</sup>

In der folgenden Tabelle ist die Jahresproduktion der langlebigen Spaltprodukte einschließlich des Plutoniums eines Reaktors vom Typ Biblis B aufgeführt. Der Rest der verschiedenen Isotope zerfällt rascher und stellt daher kein Endlagerproblem dar.

Element	Isotop	Halbwertszeit in Jahren	Masse in kg
Jod	J-129	$1,57 \times 10^7$	5,9
Neptunium	Np-237	$2,14 \times 10^6$	14,3
Plutonium	Pu-242	$3,76 \times 10^5$	15
Technetium	Tc-99	$2,10 \times 10^5$	26,7
Plutonium 239	Pu-239	24110	176
Americium 243	Am-243	7370	1,4
Plutonium 240	Pu-240	6550	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

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß eine säuberliche Trennung zwischen den wiederverwendbaren Brennstoffen, den langlebigen und den rasch zerfallenden Strahlern die Abfallmenge für die lange Endlagerung beträchtlich vermindern würde. Bei der Wiederaufbereitung, bei der die Trennung vorgenommen wird, entstehen jedoch erneut niederaktive Abfälle ohne eigene Wärmeerzeugung - nach dem derzeitigen Stand etwa das Sechzigfache der zu trennenden hochradioaktiven Abfälle.

#### 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 2Mrd.DM errichteten Werk versagten die politisch Verantwortlichen nach der Fertigstellung die Betriebsgenehmigung. 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.

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 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 - nachdem 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 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 bewacht werden.

## 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 0,04mm 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 schon über Jahrmillionen gehalten hat, auflösen und dabei das Lagergut freilegen.

Würde dieser Laugenangriff sofort eintreten, nachdem das Lager gefüllt und verschlossen wurde, würde es immer noch Jahrtausende dauern, bis die Stahlbehälter zerfressen sind, das radioaktive Material zusammen mit dem Salz ins Grundwasser gerät und mit diesem wieder auf den Menschen trifft. Allerdings würde es in einem solchen Fall zu einer beträchtlichen Verdünnung der radioaktiven Substanzen kommen.

Man hat aufgrund vielfältiger ungünstiger Annahmen die sich aus einem solchen Unfall ergebende maximale effektive Dosisbelastung im Grundwasser errechnet und kam auf etwa ein Hundertstel bis ein Tausendstel der mittleren natürlichen Dosisbelastung von etwa 2,4mSv/a (Millisiervert pro Jahr).

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 Einlagerungsvorgang ist ebenfalls einfach und wird vielfach schon gehandhabt. Im Fall des "Nurrektors" 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 im nächsten Beitrag eingehen wollen.

## Anmerkungen

1. Baestle, L.H.: Role and Influence of Partitioning and Transmutation on the Management of Nuclear Waste Streams, Nuclear Energy Agency/P&T Report Nr. 3, OECD-NDC, 1992.
2. N. Candelli et al.: PAGIS-Performance, Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste, Report EUR 11775 EN, 1988.
3. K. Kugler, P.W.Philippen: Energietechnik, Springer-Verlag Berlin, 1992.
4. Siehe Anm. 2

## Teil VII: Transmutation

Radioaktive Abfälle lassen sich 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, kann die moderne Kerntechnik heute verwirklichen.

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%.

### 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.

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, 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.

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 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 sich die jeweilige Zusammensetzung durch entsprechende Zumischung und Absonderung entsprechend der im Reaktor gewünschten Bedingungen ändern und so Abbrand, 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 vor allem der Spaltstofflösung, um sie dem Neutronengeschehen im Reaktor anzupassen. Sinnvoll könnte es auch sein, Brenn- und Brutstofflösungen getrennt von Spaltstofflösungen 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.

## 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. Dabei werden Ziele (targets) aus Schwermetall (Blei, Wismut) mit geladenen Teilchen beschossen - in der Regel mit positiv geladenen Protonen, die mit Hilfe leistungsfähiger Teilchenbeschleuniger 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 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, dann kann jedes Spaltungsneutron 19 weitere Spaltungsneutronen erzeugen. Über den Multiplikationsfaktor, der beim unterkritischen Reaktor immer unter 1 liegt, läßt sich der gesamte Neutronenfluß im Blanket regeln.<sup>1</sup>

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.<sup>2</sup>

Um das Target liegt das Blanket, die eigentliche Reaktorzone. Hier werden die Stoffe dem Neutronenfluß ausgesetzt und entsprechend umgewandelt. Die Neutronengeschwindigkeit ist in der targetnahen Zone am höchsten und wird zum Rand hin langsamer. Um die unterschiedlichen Neutronengeschwindigkeiten besser zu nutzen, wird das Blanket in Zonen unterteilt, die jeweils mit unterschiedlichen Brenn- und Spaltstoffgemischen beschickt werden.

In Jülich schlägt man z.B. vor, in die unmittelbar um das Target liegenden Zone das langlebige Spaltprodukt Technetium Tc-99 einzubringen. Um diese herum wird auch J-129 - aber, weil es in flüssiger Form sehr korrosionsfähig ist, als Blei- oder Natriumjodid - in festen Brennstäben angeordnet. Dabei nimmt man in Kauf, daß das gasförmige Transmutationsprodukt Xenon aus den Jodverbindungen weit schwerer als aus dem flüssigen Jod austritt und Xenonisotope den Neutronenfluß nachteilig beeinflussen. In dieser Blanket-Region wird mit flüssigem Blei gekühlt. 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.

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° 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 abtransportieren<sup>3</sup>. Das Blanket umschließt ein Reflektor, der die Neutronen zurück in das Blanket wirft. Den Reaktor umschließt, wie bei herkömmlichen Reaktoren, ein nach sicherheitstechnischen Gesichtspunkten ausgelegtes 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 Brennstoff-Transuranegemisch 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 Curium 242 und Plutonium 238) 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.

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

#### Anmerkungen

1. H. Lengeler: Nuclear Waste Transmutation using High-Intensity Proton Linear Accelerators, Report CERN AT/93 DI Genf 1993.
2. 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.
3. F. Lybsch: Aspekte des Einsatzes von Systemen zur Transmutation radioaktiver Stoffe - Neutronik, Technik, Sicherheitsverhalten, Jülich 3181, Januar 1996

#### Teil VIII: Der Öko-Reaktor

Die Transmutation (siehe Neue Solidarität 14/2003) löst das Abschalt- und das Entsorgungsproblem, aber sie ist aufwendig und komplex. Unberührt läßt sie ein anderes "Problem", das man "technisch weitgehend im Griff" hat, bei dem aber ein größerer Schadensfall und ein Restrisiko nicht ganz auszuschließen ist: das "Nachwärmeproblem" des üblichen Leichtwasserreaktors. Dieses Problem vermeidet der Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktor (HTR), 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. Dieser viel einfachere und inhärent (d.h. aufgrund physikalischer Gesetze) sichere Hochtemperatur-Kugelhaufenreaktor (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.

#### Der Kugelhaufenreaktor

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 die Steuerung des Reaktors sehr vereinfachen, eine konstante Reaktivität wird unschwer eingehalten und damit ein entsprechend gleichbleibendes 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 (vorgesehen war ursprünglich Heliumgas), der durch den Kugelhaufen 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 abgeschaltet wurde. Die innere Selbstregelung des Reaktors verlief so, wie es theoretisch berechnet worden war. Reaktorbehälter und Inventar nahmen unter dieser Belastung keinen Schaden, auch kam es nicht zur Freisetzung von Spaltprodukten aus den Brennelementen. Der Reaktor konnte nach dem Versuch problemlos weiterbetrieben werden.

#### Vor- und Nachteile niedriger Leistungsdichte

Diese Sicherheit hat einen Preis: Sie wurde durch die relativ niedrige Leistungsdichte im HTR erkaufte. Im Unterschied zum Leichtwasserreaktor mit einer Leistungsdichte von 90 MWth/m<sup>3</sup> werden im HTR nur 3 MWth/m<sup>3</sup> 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 Edelgas 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 können, läßt sich bei diesem Hochtemperaturreaktor eine für Kernkraftwerke sehr hohe Leistungsausbeute von 48% erzielen.

Die geringe Leistungsdichte und daher relative Größe des Reaktors und der dazugehörigen Gebäude verteuern den Reaktor. Dem stehen aber die verbilligenden Gewinne entgegen. Der Wegfall von

Wärmetauschern, die Vereinfachung der Regelung, mögliche Einsparungen an mehrfach vorhandenen Sicherheitssystemen (Redundanz) senken die Investitionskosten für diesen Reaktor erheblich.

Ein weiterer günstiger Kostenfaktor liegt auch 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 größerer Spannbetonbehälter, der innen mit hitzebeständigem Graphit ausgekleidet wird.

Allerdings liegt die optimale Betriebsgröße des Kugelhaufenreaktors bei etwas über 100 MWe. Dem gegenüber sind moderne Leichtwasserreaktoren auf 1300 MWe ausgelegt. Die relativ kleine Betriebsgröße macht den Reaktor für die Stromversorgungsunternehmen in dichtbesiedelten Industriegebieten uninteressant. Interessant wird er aber wegen seines Angebots von Prozeßwärme für industrielle Anwendungen und zum Einsatz in entlegeneren Gebieten ohne Verbundnetz und relativ geringem Energiebedarf in der Grundlast. Das macht den Reaktor, vor allem auch wegen seiner sicheren Handhabung, vor allem für einzelne Unternehmen und für Entwicklungsländer interessant.

### Brennelemente

Die entscheidenden Vorzüge des 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 Moderator material Kohlenstoff. In ihn werden die eigentlichen Brennstoffpartikel eingearbeitet. Das sind wiederum kleine Kugeln mit einem Durchmesser von etwa 1 mm. Sie enthalten das spaltbare Material in Form von Uran- oder Thoriumoxid. Dieses wird von einer dünnen Schicht Kohlenstoff umgeben.

Diese wiederum sind, und das ist das Geheimnis dieser Brennelemente, von einer Schicht Siliziumkarbid (SiC) eingehüllt. Zum Schluß wird die Brennstoffkugel insgesamt von mehreren voneinander unabhängigen, jeweils 100 µm dicken SiC-Schichten umgeben. Sie stabilisieren die Brennstoffkugel so, daß sie nicht nur möglichen Quetschungen im Schütthaufen des Reaktors, oder dem Aufprall sehr schnell in den Reaktorraum hineingeschossener Abschaltstäbe standhält, sondern auch allen Versuchen, ihnen wieder Brennstoffpartikeln entnehmen zu wollen.

Entscheidend ist hierbei das SiC. 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 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 ebenfalls kaum möglich, die in ihnen noch enthaltenen Restbrennstoffe oder wertvolle Spaltprodukte können also nicht zurückgewonnen werden.

Andererseits sind die Kugeln bereits für das Endlager fertig "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, außerdem wäre dann ihre Eigenstrahlung relativ gering und nicht mehr gefährlich. Auch die direkte Endlagerfähigkeit birgt einen großen wirtschaftlichen Vorteil - jedenfalls, solange genügend nukleare Brennstoffe zur Verfügung stehen und der Preis für sie relativ gering ist.

## 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 30000 bis 40000 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<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) zu Methan oder höherwertigen Kohlenwasserstoffketten. Auf diese Weise ließen sich die Verbrennungsgase der Kohlenwasserstoffe (CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) 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<sub>2</sub> 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.

Der erste funktionstüchtige 300-MWe-Kugelhaufen-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, 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 kann.

China betreibt seit März 2001 einen 10-MW-Versuchsreaktor nach dem Kugelhaufenprinzip und will ähnlich wie Südafrika schließlich einen 100-MW-Reaktor in Modulbauweise auf den Markt bringen. In Südafrika haben die Bauarbeiten für ein solches Modul bereits begonnen. Im Jahr 2004 soll der erste Prototyp fertiggestellt werden und ab 2007 die Lieferung der in Serie gebauten Reaktoren beginnen. 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.

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

1999 schrieb Prof. Dr. Ing. D. Schwarz aus seinem Privatvermögen für denjenigen einen Preis von 100000 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.

#### 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 wachsenden 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. Außerdem wird in den kommenden zehn Jahren bei den größten, bequem zugänglichen Ölgebieten der Scheitelpunkt der Förderkapazität überschritten sein. Man wird dann weniger leicht zugängliche Ölreserven erschließen müssen. Auch das dürfte die Preise für Rohöl weiter steigen lassen.

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 sicherlich 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".

## Friedenssicherung

Der augenblickliche Irakkrieg ist sicherlich nicht nur ein Raubkrieg ums knapper werdende Öl. Doch spielt die Kontrolle der Energiereserven auch 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 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, sich auf engem Raum relativ große Energievorräte anzulegen und sich so gegen derartige Erpressungsversuche zu schützen.

Der Ausstieg aus der Kernenergie verknappt nicht nur die verfügbaren Energiereserven mit entsprechendem Preisanstieg, sondern macht als Folge der Knappheit auch Verteilungskämpfe um die Ressourcen wahrscheinlicher. Das gilt vor allem auch für Wasser. Denn 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 für den Menschen und seine Landwirtschaft genießbaren und verwendungsfähigen Zustand zu bringen und es an die Stellen zu leiten, an denen es besonders dringend benötigt wird.

Das gleiche gilt auch für andere Rohstoffe aller Art: 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 Rohstoffbeschaffung aus normalem Oberflächengestein bewältigen. Die dafür benötigte Energiequelle steht spätestens mit der Beherrschung der Kernfusion zur Verfügung. Damit nämlich ließe sich dieses Gestein in Plasma umwandeln und in die einzelnen Elemente auftrennen.

## 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 Güterproduktion oder ihrer Verwendung chemische Verbindungen (Abfälle), die sich nicht weiter verwenden lassen. Zum anderen sammeln sich solche Moleküle in der Umwelt an, bis sie einen schädlichen Dosiswert erreichen oder überschreiten.

Wenn man nun bedenkt, daß alle Stoffe dieser Erde aus molekularen Verbindungen der nur rund 80 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. Wenn Umweltprobleme auftreten, dann

muß es an der Verteilung der Stoffe liegen.

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. Mit ihrer Hilfe lassen sich gefährliche oder nicht mehr benötigte chemische Verbindungen wieder in ihre Bestandteile zerlegen, um daraus nützliche Stoffe zu bilden und verhindern, daß sich schädliche Stoffe in einem nicht gewünschten Grad anreichern.

Die Spaltung der Moleküle in ihre Elemente, um daraus nützliche chemische Verbindungen zu machen, ist jedoch erst wirtschaftlich machbar, 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.

Die dazu benötigte hohe Energiedichte läßt erkennen, warum der oft vorgetragene Hinweis auf die reichlich auf die Erde eingestrahlte Sonnenenergie keinen Ausweg aus der Energieknappheit bietet. Diese Energieform hat den Nachteil, daß sie nur halbtags zur Verfügung steht und außerdem jeweils über die Hälfte der Erdoberfläche verteilt ist. Der eigentliche Aufwand besteht 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.

Ähnlich bestehen die eigentlichen Kosten der Sonnenenergie im 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 Centbeträgen 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.

#### Fortschritt und menschliche Zivilisation

Not - vor allem die unnötig verlängerte und sinnlos beibehaltene - lenkt uns von uns selbst ab und von der Herausforderung an uns, "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, über sich selbst hinauswachsen kann. Es ist den 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.

Ein solcher eigener, schöpferischer Beitrag für andere - und sei es nur der geglückte Versuch, in traurigen Augen wieder den Schimmer von Freude zu wecken - oder für die Allgemeinheit ist das einzige wirkliche "Eigentum", das wir uns im Unterschied zu unwesentlichem Besitz erwerben können. Kreativität, Weiterentwicklung ist aber, religiös ausgedrückt, immer verbunden mit dem Tod des alten und der Neugeburt des "neuen" Menschen. Wo werden größere Ängste frei als in diesem wesentlichen Zusammenhang des Menschseins?

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 und 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 aus Faulheit oder Schlechtigkeit selbst aber der Entwicklungsmöglichkeit beraubt, wird er mit Sicherheit unmenschlich und sinkt noch unter die Stufe des "bewußtlos unschuldigen" Tiers.

Die Frage der Kernenergie - nicht nur der Kernspaltung, von der hier 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 Fragen, die im Zusammenhang mit der Verwendung der Kernenergie zu lösen sind, zu einer Frage der Moral. Die Kernenergie zu meistern, ist nicht nur eine technische, auch nicht nur eine politische, sondern vor allem eine menschliche Aufgabe.