
Eine Welt aus Plutonium?

Engelbert Broda

Der nachstehende Artikel, den wir wegen seines großen Interesses für die energiepolitische Diskussion zum Wiederabdruck bringen, ist erstmalig in der »Naturwissenschaftlichen Rundschau« (Bd. 28, Heft 7, 1975) erschienen. Er ist im Original mit einer Fülle von Anmerkungen aus der einschlägigen Literatur versehen, auf die wir unsere naturwissenschaftlich gebildeten Leser verweisen.

Allgemeine Probleme der Kernenergie

Bis zum Ausbruch der Energiekrise galt es mindestens in Westeuropa und den USA als ausgemacht, daß die Energieerzeugung weiterhin alljährlich um etwa 4 bis 5 Prozent, die Elektrizitätserzeugung sogar um 7 Prozent steigen werde. Dies würde allerdings eine Versechsfachung der Elektrizitätserzeugung bis zum Jahre 2000 und eine Versechsendreißigfachung innerhalb von 50 Jahren bedeuten. Ausbaufähige Wasserkraftvorkommen gibt es in diesem Teil der Erde nur mehr in geringem Ausmaß, und die Bereitstellung fossiler Brennstoffe, seien es Kohle, Öl oder Gas, könnte ebenfalls mit der genannten Steigerungsrate bei weitem nicht Schritt halten, so daß der fortschreitende Übergang zur Kernenergie für nötig gehalten wurde. Dabei soll hier unter Kernenergie die Energie aus der Kernspaltung des Urans oder des Plutoniums verstanden werden.

Seit der Energiekrise wird angezweifelt, inwieweit für die entwickelten Länder eine Steigerung des Energieverbrauchs im bisherigen Ausmaß möglich oder auch nur wünschenswert ist. Weit verbreitet geblieben und von allen Regierungen akzeptiert ist aber die Überzeugung, daß man mindestens für die Zwecke der Stromproduktion vorwiegend auf die Kernenergie übergehen muß. Beispielsweise sind alle neuen Kraftwerke,

die in der Schweiz oder in Frankreich (»tout nucléaire« ist das offizielle Wort) errichtet werden, Kernkraftwerke. In der Bundesrepublik Deutschland sind nun bereits 10 Kernkraftwerke mit 3500 Megawatt elektrischer Leistung, entsprechend 6 Prozent der elektrischen Gesamtkapazität, im Betrieb. Das größte Werk ist Biblis in Südhessen mit 1200 Mw elektrischer Leistung, das größte Kernkraftwerk der Welt. Neun weitere Kernkraftwerke mit insgesamt 8000 Mw sind im Bau. Nach dem Energieprogramm der Bundesregierung sollen im nächsten Jahrzehnt ungefähr 50 Kernkraftwerke in Betrieb genommen werden, so daß dann die Hälfte der Elektrizität aus Uran oder Plutonium erzeugt werden wird. Ins einzelne gehende Bilder einer künftigen auf Kernenergie gegründeten Zivilisation wurden insbesondere von dem hervorragenden amerikanischen Physiker Weinberg, dem Direktor des Laboratoriums von Oak Ridge, entworfen.

Wie bekannt, bringt der Betrieb von Kernkraftwerken mannigfache Probleme mit sich. Die Sicherheit der häufigsten Kernkraftwerke, nämlich der mit leichtem (gewöhnlichem) Wasser arbeitenden Werke, gegenüber katastrophalem Versagen der Kühlung mit Durchschmelzen des Reaktorzentrums (Core) und Freisetzung großer Mengen an radioaktiven Stoffen ist Gegenstand lebhafter Kontroversen. Dazu hat der als Rasmussen-Report bekannte offiziöse amerikanische Bericht, der allerdings zu relativ optimistischen Ergebnissen kommt, wichtiges neues Material geliefert. Besorgnisse bestehen auch bezüglich des Austritts von Radionukliden in Wasser und Luft im Routinebetrieb der Kraftwerke. Man versucht dieser Gefahr durch Festsetzung niedriger zulässiger Konzentrationen der Radionuklide und durch verlässliche Kontrollen zu begegnen. Schließlich wird allmählich das Problem der Aufheizung der Flüsse, in Europa besonders von Rhein und Rhone, durch Kühlwasser akut. Der Temperaturerhöhung muß im Interesse des Umweltschutzes eine hinreichend niedrige Grenze gesetzt werden.

Mit diesen viel diskutierten, teilweise bereits heute bestehenden Problemen wollen wir uns im folgenden nicht befassen. Vielmehr werde zum Zweck der einfacheren Argumentation angenommen, die genannten Probleme seien sämtlich befriedigend gelöst, wenn das auch in Wirklichkeit leider nicht zutrifft. Dann erhebt sich aber die weitere Frage, ob nicht die Expansion der Kernenergiewirtschaft auf weitere Sicht zu unlösbaren Problemen höherer Ordnung führt. Schlagwortmäßig seien sie als die Probleme der »Plutoniumökonomie« bezeichnet. Dies ist eine Ökonomie, die weitgehend oder sogar fast gänzlich auf der Verwertung von Plutonium beruht. Meiner Meinung nach sind diese Probleme tatsächlich zum Teil unlösbar. Daher muß man meines Erachtens rechtzeitig Maßnahmen treffen, um von der sich vor unseren Augen entwickelnden Plutoniumökonomie wieder rechtzeitig wegzukommen. Damit wird eine teilweise Revision der Ansichten durchgeführt, die ich in früheren Jahrzehnten vertreten habe.

Von der außerordentlich ernsten Gefahr eines Krieges mit Kernwaffen zwischen Staaten wird hier nicht die Rede sein.¹ Immerhin sei betont, daß die reichliche und billige Verfügbarkeit des Sprengstoffs

Plutonium, der sich bei der Kernindustrie ergibt, für kriegsgewillte Staaten einen besonderen Anreiz darstellen muß, diese Industrie auszubauen.

Der nukleare Brennstoffzyklus

Zum Zweck unserer Untersuchung muß die Wirkungsweise der Kernkraftwerke und der in ihnen enthaltenen Reaktoren in ihren relevanten Aspekten zusammengefaßt werden. Dabei beziehen wir uns zunächst auf die Leichtwasserreaktoren, da diese, wie erwähnt, die häufigsten sind. Sie stehen unter anderem in den USA, in der Bundesrepublik Deutschland, in Frankreich, der Schweiz, in Österreich und auch in der Sowjetunion und der DDR im Vordergrund. Ausnahmen bilden Kanada und Großbritannien, wo man sich auf Schwerwasserreaktoren konzentriert hat beziehungsweise konzentrieren will. Leichtwasserreaktoren gibt es in zwei Varianten, die Druckwasser- und die Siedewasserreaktoren, doch ist ihre Unterscheidung hier nicht wesentlich.

Alle Leichtwasserreaktoren erfordern zum Betrieb mit dem Isotop ^{235}U angereichertes Uran. Typisch wird der natürliche Gehalt an Uran ^{235}U von seinem natürlichen Wert von 0,7 Prozent auf 3 Prozent gesteigert. Während des Betriebes wird das Uran ^{235}U allmählich verbraucht. Sobald die Brennstoffelemente in hinreichendem Maß verarmt sind, werden sie dem Reaktor entnommen und chemisch aufgearbeitet. Das Uran kann dann mit Uran ^{235}U ergänzt und in Reaktoren zurückgeführt werden. Hingegen müssen die hochradioaktiven Kernspaltprodukte, populär auch als Atomasche bekannt, in Sicherheit gebracht und gelagert werden. In Leichtwasserreaktoren wird die Kettenreaktion vorwiegend durch langsame Neutronen getragen, die eben durch Bremsung mit Hilfe des »Moderators« Wasser aus den ursprünglich vorhandenen schnellen Neutronen entstehen.

Das Uran ^{238}U , das im angereicherten Brennstoff noch immer 97 Prozent ausmacht, ist nur durch schnelle, also unverlangsamte Neutronen spaltbar. Da diese nur in relativ geringem Ausmaß zur Wirkung kommen, trägt das Uran ^{238}U zur Kettenreaktion unmittelbar nicht viel bei. Wohl aber fängt Uran ^{238}U zahlreiche mittelschnelle und langsame Neutronen ein und ergibt dabei letzten Endes das Plutonium-Isotop ^{239}Pu , das hier, soweit kein Mißverständnis möglich ist, einfach als Plutonium bezeichnet sei. Da Plutonium ein besonderes chemisches Element ist, kann es bei der erwähnten Aufarbeitung des bestrahlten Kernbrennstoffs nach chemischen Verfahren abgesondert werden.

Die nuklearen Eigenschaften von Plutonium ^{239}Pu sind denen von Uran ^{235}U ähnlich, und es kann ebenso wie dieses eine Kettenreaktion mit langsamen Neutronen aufrechterhalten. Die Halbwertszeit von Plutonium ^{239}Pu beträgt 24.000 Jahre; es klingt daher innerhalb absehbarer Zeiträume nicht nennenswert ab. Jedoch wirkt das Plutonium unvermeidlich schon von seiner Entstehung an innerhalb des Reaktors an der Kettenreaktion mit, so daß schließlich nur ein Teil für die Isolierung zur Verfügung steht.

Nach den offiziellen Plänen der Regierungen, zum Beispiel der USA wie auch der Bundesrepublik Deutschland, soll das abgetrennte Plutonium ebenfalls in Kraftwerken zur Energieerzeugung herangezogen werden.

Das Plutonium 239 kann jedoch auch ebenso wie das Uran 235 zur Erzeugung von Kernwaffen verwendet werden. So wurde Hiroshima durch Uran 235, Nagasaki aber durch Plutonium 239 zerstört. In den Kernwaffen wird bekanntlich die Spaltung der Atomkerne nicht durch langsame, sondern durch schnelle Neutronen herbeigeführt, damit die Kettenreaktion hinreichend schnell aufgebaut werden kann.

Brutreaktoren

Es ist offenbar möglich, das abgetrennte Plutonium anstelle von neuem Uran 235 zur Ergänzung von teilweise erschöpftem angereichertem Uran in Leichtwasserreaktoren zu verwenden. Diese Technik soll gegenwärtig in den USA in größerem Maßstab in die Praxis eingeführt werden. In erster Linie aber wird offiziell geplant, das Plutonium, soweit es friedlichen Zwecken dienen soll, in »Brutreaktoren« (»Brütern«) zu verwerten.

In den Brütern läuft ein Brennstoffzyklus in der Weise ab, daß aus »fruchtbarem« Material durch Einfang von Neutronen eine größere Menge an neuem Kernbrennstoff erzeugt wird, als an eingesetztem Uran 235 oder Plutonium verbraucht wird. Das fruchtbare Material umgibt als Hülle (»Blanket«) den Kern (»Core«) des Brüters und kann aus Uran 238 bestehen, das dann natürlich wieder Plutonium ergibt. Man kann aber auch natürliches Thorium (Thorium 232) verwenden. In diesem Fall erhält man schließlich das Uranisotop 233, das in seinen Kerneigenschaften ebenso wie das Plutonium 239 weitgehend dem Uran 235 gleicht. Zumeist werden die Brüter mit schnellen Neutronen betrieben (»Schnelle Brüter«). Es gibt zwar auch Projekte und Versuche in Richtung auf Brüter mit langsamen Neutronen, doch kommt ihnen vorläufig geringere Bedeutung zu.

Da im Brüter mehr Brennstoff entsteht als verbraucht wird, ist der »Reproduktionsfaktor« größer als 1, und letzten Endes kann das gesamte eingesetzte Uran 238 oder Thorium in nutzbaren Kernbrennstoff verwandelt werden. Die angestrebte Verdoppelungszeit bei der Entstehung neuen Kernbrennstoffs beträgt 10 Jahre; allerdings wird dieses Ziel bei den derzeit existierenden Brütern bei weitem nicht erreicht. Der Einfachheit halber wollen wir weiterhin vom Thorium absehen. Die Vorstellung ist also, daß allmählich alles Uran auf dem Wege über Plutonium 239 zur Erzeugung von Kernenergie herangezogen werden kann. Dadurch wäre eine maximale Ausnützung der natürlichen Vorräte an Uran gewährleistet.

Gegen die Brüter sprechen jedoch starke Argumente, so daß sie von einer steigenden Anzahl von Fachleuten mit Skepsis betrachtet oder überhaupt abgelehnt werden. Da ist zunächst die außergewöhnliche technische Schwierigkeit der Brüter zu nennen, die sich sowohl in ihren Entwicklungs- und Betriebskosten als auch in ihrer vermuteten Anfälligkeit gegen Havarien und sogar Katastrophen ausdrückt. Die für die Entwicklung der schnellen Brüter schon bisher ausgegebenen Summen sind gigantisch, und die Voranschläge mußten immer weiter erhöht werden. In dieser Hinsicht ist der Vergleich mit dem Überschallflugzeug Concorde gezogen worden. Gegenwärtig ist in den USA für die Periode 1975 bis 1979 ein Betrag von 2,5 Milliarden Dollar aus staatlichen Mitteln für die Entwick-

lung des Schnellen Brütters vorgesehen, und zum Beispiel im Jahre 1974 flossen 36 Prozent des Bundesbudgets der USA für Forschung und Entwicklung auf dem Energiegebiet dem Schnellen Brüter zu.

Die technische Schwierigkeit des Schnellen Brütters erklärt sich zum Teil dadurch, daß der mit Uran 235 hoch angereicherte oder aus Plutonium bestehende Brennstoff im Vergleich zu natürlichem Uran sehr teuer ist. Die Investitionskosten für den Brennstoff sind demnach groß. Daher ist es aus wirtschaftlichen Gründen nötig, einen relativ kleinen Reaktorkern zu einer hohen Leistung zu zwingen. Größenordnungsmäßig muß aus diesem Reaktor je Einheitsvolumen oder -gewicht an Brennstoff zehnmal mehr Wärme pro Zeiteinheit abgeführt werden als aus einem gewöhnlichen (Leichtwasser-)Reaktor. Dabei ist das Uran 238 mitgerechnet.

In der wichtigsten Version des Schnellen Brütters wird die hohe Leistung erreicht, indem ein bisher in der Technik ganz unübliches Kühlmittel verwendet wird, nämlich flüssiges Natrium. Dieser Stoff hat wirklich in nuklearer und wärmetechnischer Hinsicht eine Reihe günstiger Eigenschaften, doch wird er im Betrieb durch Einfang von Neutronen enorm stark radioaktiv. Vor allem reagiert das heiße metallische Natrium heftig mit Luft und besonders Wasser, wenn es mit ihnen in Berührung kommt. Daher muß das in einem Primärkreislauf als Kühlmittel verwendete Natrium in einem sekundären Kreislauf seine Wärme auf weiteres Natrium abgeben, das keinen Neutronen ausgesetzt und daher nicht radioaktiv ist. Erst das sekundäre Natrium überträgt (in einem zweiten Wärmetauscher) seine Wärme auf das Wasser, das letzten Endes die Dampfturbine und den Generator treibt.

Weiterhin bieten die notwendige Kompaktheit und Enge der Konstruktion große technische Schwierigkeiten. Überdies beschädigen die schnellen Neutronen bei ihrem Aufprall das Konstruktionsmaterial, vor allem den Stahl. Schließlich ist die Regelung des Reaktors problematisch, da die Geschwindigkeit, mit der die schnellen Neutronen zur Wirkung kommen, so außerordentlich groß ist.² Bei Unfällen wäre mit weitreichender radioaktiver Verseuchung und mit riesigen Problemen bei Reparaturen zu rechnen. Schnelle Brüter sind durchwegs mit großen Verzögerungen in Betrieb genommen worden, und es liegen keinerlei Beweise für ihre Wirtschaftlichkeit im Routinebetrieb vor. Auch an Schnellen Brütern, die statt mit flüssigem Natrium mit Helium unter Hochdruck gekühlt werden, wird gearbeitet, doch hält man diesen Typ für weniger aussichtsreich.

Vorrat und Preis von Uran

Das landläufige Argument für den Schnellen Brüter ist die gute Ausnützung des natürlichen Urans. Warum aber eigentlich muß man das natürliche Uran gut ausnützen? Dies wäre nötig, wenn Uran entweder in der Natur selten oder wenn es teuer wäre. Beides trifft nicht zu.

Es wurde darauf hingewiesen, daß derzeit in rascher Folge weitere Reserven an reichen Uranerzen (mit weniger als 10 Dollar/Pfund Oxid) gefunden werden. So sind die bekannten Reserven innerhalb dieses Kostenbereichs allein zwischen 1970 und 1973 um 34 Prozent gestiegen. Niemand

weiß, wie groß die Reserven an armen Erzen sind, weil man sich bisher gar keine Mühe genommen hat, nach ihnen zu suchen. Es ist charakteristisch, daß in einer speziellen Übersicht der OECD Erze mit mehr als 15 Dollar (immer je Pfund Oxid) nicht einmal angeführt werden.

Kein Zweifel kann aber bestehen, daß die Vorräte an armen Erzen enorm sind. Weinberg hat auf die Faustregel hingewiesen, daß ganz allgemein Reserven von Elementen in der Erdkruste in ihrem Ausmaß ungefähr dem Quadrat der reziproken Konzentration (also des Verdünnungsgrads) proportional sind. Wenn man nun vorsichtig annimmt, daß die Kosten der Gewinnung etwa proportional dem Verdünnungsgrad ansteigen, so findet man zum Beispiel, daß Uran von 30 Dollar aus Erz kommt, das dreimal ärmer ist als Erz von 10 Dollar. Dann sind nach der erwähnten Faustregel die Reserven bereits neunmal größer. Tatsächlich rechnet man unter anderem in den USA mit gewaltigen Vorräten an armen Erzen.

Eine obere Grenze für den möglichen Uranpreis ist auf weite Sicht durch den Urangehalt des Ozeans gesetzt. Dieser enthält fast 5 Milliarden Tonnen Uran. Schon mit 1prozentiger Ausnützung (auf Grund von Uran 235 und unvermeidlich während des Betriebs gebildetem Plutonium) entspricht dies 10^{18} Kilowattstunden (1 Trillion kWh) an Wärmeenergie. Diese Zahl kann mit einer schließlichen Weltbevölkerung von 15 Milliarden und einem dauernden Energiekonsum pro Kopf (als Wärme gerechnet) von 20 Kilowatt verglichen. Dies ist doppelt soviel als der heutige Energiekonsum pro Kopf in den USA, wobei gar nicht gesagt sei, daß diese oft genannten Werte einen wünschenswerten Zustand darstellen. Unter diesen großzügigen Voraussetzungen würde das ozeanische Uran allein immer noch für 300 Jahre ausreichen. Technische Verfahren zur Gewinnung des ozeanischen Urans stehen zur Verfügung. Für die Kosten der Gewinnung werden neuerdings 25 Dollar angegeben.

Auch die Steigerung des Strompreises, die der Übergang zu ärmeren Erzen notwendigerweise mit sich bringt, ist kein ernsthaftes Argument für den Schnellen Brüter. Diese Steigerung ist nämlich unbedeutend, weil der Brennstoff (sehr zum Unterschied zur Situation in einem Kohle- oder Ölkraftwerk) ohnehin wenig zu den Gestehungskosten des Stroms in Kernkraftwerken mit langsamen Neutronen beiträgt. Eine neuere Rechnung ergibt die folgende Rolle der Brennstoffkosten in einem Leichtwasserkraftwerk: Unter Annahme eines Uranpreises von 8 Dollar, von Kapitalkosten von 10 Prozent pro Jahr und eines Ausnutzungsfaktors des Kraftwerkes von 80 Prozent würde eine Steigerung des Uranpreises auf 250 Prozent (also auf 20 Dollar) eine Preiserhöhung der Kilowattstunde am Ausgang des Kraftwerkes um bloß 10 Prozent erfordern. Nun ist aber der Strompreis für die weitaus meisten Konsumenten vorwiegend durch die Verteilungskosten, also die Errichtung und Erhaltung von Transformatoren, Leitungen und so weiter bestimmt. Für sie dürfte daher die Preissteigerung sehr viel weniger als 10 Prozent ausmachen. Ähnlich wird in einem Dokument der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) in Wien festgestellt, daß in Leichtwasserreaktoren eine Erhöhung des Uranpreises auf 30 Dollar den Strompreis am Kraftwerksausgang nur um 15 Prozent erhöhen sollte. Offenbar wird der Strompreis durch politische, soziale,

fiskale und monetäre Faktoren viel stärker bestimmt als durch den Uranpreis.

Nach meiner Meinung ist zu schließen, daß der Schnelle Brüter schon deshalb gänzlich abzulehnen ist, weil er teuer, unsicher, gefährlich und völlig unnötig ist. Ein noch ernsteres Argument gegen den Schnellen Brüter liegt aber darin, daß er zwangsweise zu einer Plutoniumökonomie führt. Nach einer Anlaufperiode, in der noch der ursprüngliche Kernbrennstoff Uran 235 im Vordergrund steht, muß in höherem und höherem Maße Plutonium, das aus Uran 238 gebildet wurde, dem Schnellen Brüter dienen.

Plutonium als Sprengstoff

D. L. Ray, die Vorsitzende der Atomenergiekommission der USA, hat mitgeteilt, daß im Jahre 2000 die Kapazität der amerikanischen Kernkraftwerke 1,2 Millionen Megawatt betragen wird. Man kann abschätzen, daß einer solchen Kapazität eine unvermeidliche und den Proponenten dieser Expansion auch erwünschte Plutoniumproduktion zwischen 250 und 1500 Tonnen jährlich entspricht; der genaue Wert hängt vom Anteil der Brüter an der gesamten Produktion ab. Freilich soll den offiziell geäußerten Vorstellungen entsprechend das Plutonium nach seiner Gewinnung auch wieder verbraucht werden. Jedoch würden sich jeweils große und steigende Mengen im Prozeß der Aufarbeitung befinden und vor der Verwendung auf Lager liegen, ja auch zur Verwendung als Waffenmaterial abgezweigt werden können.

Eine Menge zum Beispiel von 1000 Tonnen Plutonium erster Qualität würde für etwa 100.000 Atombomben des Typus ausreichen, durch die Nagasaki zerstört wurde. Diese Qualität hat das Plutonium insofern nicht unter allen Umständen, als es von der Entstehung her mit verschiedenen Mengen an dem Isotop Plutonium 240 verunreinigt ist, welches die Wirksamkeit des Sprengstoffs herabsetzt. Dessenungeachtet hat das Plutonium aus Brütern eindeutig »Waffenqualität«, und selbst das Plutonium aus Leichtwasserreaktoren läßt sich, wenn auch weniger gut, für Waffen verwenden.

Die Daten Rays beziehen sich nun allein auf ein einziges Jahr und allein auf die USA. Nach den herrschenden Vorstellungen werden aber bis zum Jahre 2000 wohl fast alle auch nur einigermaßen entwickelten Länder über ähnliche Plutoniumfabriken verfügen. Aus dem Plutonium Bomben zu machen, scheint nicht allzu schwierig zu sein. Nach den Worten eines amerikanischen Atomwaffenexperten braucht man dazu nur Plutonium und die Kenntnis des Lesens und Schreibens. Daher wird allgemein damit gerechnet, daß nicht nur Staaten, sondern sogar Organisationen oder Gruppen auf niedrigerer als staatlicher Ebene (Stichwort: Mafia) Bomben basteln können, falls sie in den Besitz des Sprengstoffes gelangen.

Tatsächlich kann schon heute, obwohl wir uns erst auf dem Wege zur Plutoniumökonomie befinden, gar keine Rede davon sein, daß die damit befaßten Firmen über das verarbeitete Plutonium voll Rechenschaft geben könnten. In zahlreichen Fällen ist durch schlechte Organisation oder Schlamperei Plutonium einfach verschwunden, in anderen Fällen sind

Plutoniumlösungen vergossen worden. Die Befürchtung ist berechtigt, daß sich in einer Plutoniumökonomie ein Schwarzer Markt für Plutonium entwickeln und sicherlich auch über Staatsgrenzen hinausgreifen wird.

Die Giftigkeit des Plutoniums

Die zweite große Gefahr liegt in der geradezu unglaublichen strahlenschutzmäßigen Gefährlichkeit des Plutoniums, das man in dieser Hinsicht als eine Erfindung des Teufels bezeichnen könnte. Für die Gefährlichkeit ist die kombinierte Wirkung der folgenden vier Umstände maßgebend: 1. Plutonium hat eine so lange Halbwertszeit, daß es während geschichtlicher Zeiträume praktisch nicht abklingt. 2. Andererseits ist die Halbwertszeit doch (anders als etwa bei Uran 235 oder 238) so klein, daß die spezifische Aktivität (Aktivität pro Masseneinheit) des Plutoniums sehr groß ist. 3. Plutonium emittiert die biologisch wirksamste Form von Strahlung (größte Wirkung je Einheit an absorbierter Energie), nämlich Alpha-Strahlung. 4. Auf Grund seiner chemischen Eigenschaften lagert sich Plutonium innerhalb des menschlichen Körpers an besonders empfindlichen Stellen ab.

Plutonium, das in die Zirkulation eingetreten ist, zum Beispiel von Wunden aufgenommen wurde oder im Tierversuch intravenös injiziert wurde, wird stark von Zellmembranen in weichem Gewebe (Knochenmark, Leber) adsorbiert, so daß es dort direkt wirksam wird, und zwar wegen der geringen Reichweite der Alpha-Strahlen sehr konzentriert. Es kann dann, wenn die Menge für akute Strahlenvergiftung nicht hinreicht, doch auf längere Sicht Krebs dieser Gewebe hervorrufen. Alternativ kann Plutonium, das bei verschiedenen technischen Manipulationen leicht oxidiert wird und dann Staub und Aerosole bildet, eingeatmet und dann zunächst im Lungengewebe abgelagert werden. In diesem Fall ist in erster Linie mit Lungenkrebs zu rechnen.

Der besonderen Gefährlichkeit des Plutoniums hat die Internationale Kommission für Strahlenschutz (ICRP) dadurch Rechnung getragen, daß sie die für beruflich exponierte Personen maximal zulässige Konzentration (MZK) für lösliche Verbindungen von Plutonium 239 in Wasser (10^{-4} Millicurie/Liter) oder Luft ($2 \cdot 10^{-12}$ Millicurie/Liter) besonders niedrig angesetzt hat. Auch wurde die zulässige Belastung des Körpers eines in der Kernenergie Berufstätigen durch inkorporiertes Plutonium mit nur 40 Nanocurie = 0,6 Mikrogramm begrenzt. Dies bedeutet, daß die Energieabsorption (Dosisrate) fünfmal kleiner gehalten werden muß als bei Radium im Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten. In der Verhältniszahl drückt sich die ganz besondere Gefährlichkeit des Plutoniums aus.

Es gibt allerdings auch Wissenschaftler, die selbst diesen niedrigen Maximalgehalt für zu hoch erachten und eine Herabsetzung um einen Faktor 10^5 (!) beantragen. Sie gehen dabei davon aus, daß »heiße Teilchen« (Plutoniumoxid-Körnchen aus Aerosolen) ihr Plutonium nur langsam an die Lungenflüssigkeit abgeben. Vielmehr liefern die Körnchen lokal an den Stellen, wo sie sich in der Lunge festgesetzt haben, sehr viele größere Dosen als bei Gleichverteilung. Ob die Wirkung tatsächlich entsprechend

stärker ist, ist zwar noch unsicher. Darf man aber von vornherein den günstigsten Fall als gegeben annehmen?

Für das Jahr 2000 sind für die USA viele hundert Schnelle Brüter vorgesehen. Wenn zum Beispiel die gesamte nukleare Leistung durch Brüter zu 2000 Mw beigestellt würde, wären es 600. Die Ausbreitung der Schnellen Brüter würde mit sich bringen, daß in einer zunehmenden Zahl von Anlagen ferngelenkt bestrahlte Brennstoffelemente in Säuren aufgelöst und chemische Trennungen durchgeführt würden, das isolierte Plutonium chemisch umgesetzt und schließlich wieder zur Fabrikation neuer Brennstoffelemente verwendet würde. Diese technischen Maßnahmen erfordern mannigfache Handhabung, gewiß auch durch unqualifizierte Kräfte, sowie massenhafte Transporte von hoch radioaktiven Brennstoffelementen, Plutonium und Atomasche auf Schiene oder Straße. Dabei sind offenbar auf die Dauer Verluste durch Unfälle, Unachtsamkeit oder sogar bösen Willen gar nicht zu vermeiden.

Wegen seiner immensen Lebensdauer kann man das Plutonium auch nicht mehr loswerden. Eine chemische Entseuchung von kontaminierten Landstrecken durch Säurewaschung und so weiter ist wohl kaum praktikabel. Es ist daher damit zu rechnen, daß der Verseuchungsgrad der obersten Erdschicht, der heute (auf Grund der seinerzeitigen atmosphärischen Kernwaffenexperimente) immerhin 1 Millicurie/km² beträgt, rasch weiter ansteigen wird. Die Kontamination wäre nicht mehr rückgängig zu machen. Die ökochemischen Verhältnisse sind äußerst komplex, aber offenbar ist die Resuspension von abgelagertem Plutonium als Staub wegen der Möglichkeit der Inhalation besonders zu fürchten.

Schließlich ist noch die Frage der Endlagerung der radioaktiven Abfälle zu bedenken. Auf das wohlbekannte Problem der Beseitigung der Atomasche sei hier nicht eingegangen. Während aber die Spaltprodukte »schon« innerhalb einiger Jahrhunderte weitgehend abklingen, müssen plutoniumhaltige Abfälle, wie sie sich natürlich in einer Plutonium-ökonomie ebenfalls an allen Ecken und Enden ergeben, auf Hunderttausende von Jahren in Sicherheit gebracht werden. Dabei ist noch gar nicht bekannt, inwieweit eine Befreiung der Spaltprodukte von Resten von Plutonium in großem Maßstab wirtschaftlich möglich ist.

Zur Beseitigung der plutoniumhaltigen Abfälle kann man an Lagerung an Orten denken, die man auch über längste Zeiträume für sicher hält, und dann die Abfälle sozusagen vergessen.³ In Betracht kommen zum Beispiel verlassene Salzbergwerke. Man kann aber auch die Verantwortung fühlen, das weitere Schicksal des Plutoniums (in Salzbergwerken oder anderswo) durch Meßgeräte zu kontrollieren, um gegebenenfalls Maßnahmen gegen unvermutete Verbreitung etwa durch Wassereinträge oder seismische Prozesse treffen zu können. Dann muß man die Gewähr dafür übernehmen, daß die notwendigen Fachleute über Hunderttausende von Jahren gefunden, organisiert und bezahlt werden können. Ob qualifizierte Arbeitskräfte gerne solche Wächterfunktionen übernehmen werden, ist eine weitere Frage. Allgemeiner: Ist man gewiß, daß menschliche Institutionen über derartige Zeiträume die notwendige Stabilität haben werden?

Kernenergie ohne Plutoniumökonomie?

Für eine voll entwickelte Plutoniumökonomie (15 Milliarden Menschen, 20 kW thermische Energie entsprechend 8 kW elektrischer Energie) wären 120 Millionen MW an Leistung von Brütern nötig, also etwa 60.000 Brüter zu 2000 Megawatt. Mit einer Lebensdauer von 30 Jahren müßten in der Welt zur Erneuerung täglich (!) 6 Brutreaktoren in Betrieb genommen und ebenso viele Reaktorleichen beseitigt werden.

Angesichts einer derartigen Lage schrieb der Nobelpreisträger James Watson, der Mitentdecker der Doppelhelix der DNA: »Wenn die Geschichte unseres Jahrhunderts geschrieben werden wird, wird, so fürchte ich, die größte Katastrophe unserer Nation nicht in unserer tragischen Verstrickung in Südostasien gesehen werden, sondern in der Schaffung riesiger Flotten (sic) von Plutonium. Ihre sichere Aufbewahrung wird eine ernste Voraussetzung für das Überleben der Menschheit bilden, und zwar nicht für einige Jahrzehnte oder Jahrhunderte, sondern für Tausende Jahre, mehr als die menschliche Zivilisation bisher bestanden hat.«

Inwieweit würde nun eine Ablehnung einer Plutoniumökonomie auch eine totale Ablehnung der Kernenergie einschließen? Bisher sind die Kernkraftwerke ohne Plutoniumrückführung gelaufen, und erst jetzt soll, wie erwähnt, mit der Rückführung begonnen werden. Der wirtschaftliche Wert des aus den Reaktoren gewonnenen Plutoniums und auch des rückgewonnenen angereicherten Urans ist bescheiden. Zum Beispiel ergibt sich aus Daten der Electricité de France, die sich auf Leichtwasserreaktoren beziehen, daß ein Verzicht auf die Wiedergewinnung von Uran und Plutonium die Netto-Brennstoffkosten nur um 15 Prozent steigern würde. Die Kleinheit des Gewinns durch Rückführung erklärt sich natürlich dadurch, daß die ferngelenkten chemischen Operationen bei der Aufarbeitung der Brennstoffelemente kostspielig sind. Von diesem Standpunkt aus müßte man also die teilweise verbrauchten Brennstoffelemente überhaupt nicht ausnützen. In der realen Welt allerdings will man auf das Plutonium schon deshalb nicht verzichten, weil man es für die Waffen braucht.

Eine alternative Strategie in eine Kernenergiewirtschaft ohne Brüter würde demnach darin bestehen, daß man die teilweise verbrauchten und nicht mehr arbeitsfähigen Brennstoffelemente ohne Aufarbeitung als solche lagert. Dann würde man den Übergang auf eine Plutoniumökonomie vermeiden. Die Gefahr einer Verbreitung des Plutoniums und von Plutoniumvergiftungen wäre infolgedessen stark vermindert. Überdies hätte das Plutonium, solange es nicht aus den Brennstoffelementen isoliert wird, keinen militärischen Wert. Man wird sich auch kaum vorstellen können, daß eine Mafia Plutonium ferngelenkt aus gestohlenen Brennstoffelementen gewinnen kann. Die Probleme der mittelfristigen Lagerung der Brennstoffelemente, zur Kühlung etwa in Teichen, sind überwindlich. Tatsächlich wird eine solche Lagerung unaufgearbeiteter Brennstoffelemente im Rahmen des kanadischen CANDU-Kraftwerkssystems derzeit praktiziert. Das CANDU-System arbeitet mit Schwerem Wasser als Moderator und natürlichem Uran als Brennstoff, so daß eine Wiedergewinnung angereicherten Urans ohnehin nicht in Frage kommt.

Das Problem der langfristigen (End-)Lagerung des Plutoniums freilich würde bestehen bleiben. Ob eine gegebene Zahl von Kilowattstunden in einem Kernkraftwerk dieses oder jenes Typs erzeugt wird — auf jeden Fall wird neues Plutonium erzeugt, und zwar im Ausmaß von 0,5 bis 1,5 Atomen je verbrauchtes Atom an Kernbrennstoff (Uran 235 oder Plutonium 239). Daher ist in einer Kernenergiewirtschaft gegebenen Ausmaßes die alljährliche anfallende Menge an Plutonium nur relativ wenig davon abhängig, ob die Energie in Leicht- oder in Schwerwasserkraftwerken oder auch in Brütern erzeugt wird. Die Handhabung des Plutoniums allerdings könnte man durch den Verzicht auf Brüter vermeiden.

Dieser Teil wäre also in dem Sinn zusammenzufassen, daß durch Verzicht auf die Aufarbeitung von Brennstoffen und a fortiori auf den Schnellen Brüter mittelfristig eine erhebliche Milderung der Problematik der Kernenergie ohne besondere wirtschaftliche Opfer zu erreichen wäre. Dennoch würden ernste Probleme langfristig ungelöst bleiben, so daß ein Rückzug von der Kernenergie in absehbarer Zeit auf jeden Fall notwendig ist.

Freilich werden die für einen derartigen Rückzug nötigen Entschlüsse nicht leichtfallen, wenn einmal enorme finanzielle Interessen auf die Kernenergie festgelegt sind und die Kernenergieindustrie eine gewaltige Macht darstellt. Das Umschalten von einer Energietechnologie auf eine andere ist immer schwierig gewesen. Gerade im vorliegenden Fall lehnt der »militärisch-industrielle Komplex«, wie er von Präsident Eisenhower genannt wurde, ein Abgehen von der bisherigen Linie in Richtung auf totalen Verlaß auf Kernenergie und besonders den Brüter ab. Diese Tatsache ist, so scheint es, besonders ernst zu nehmen.

Alternative unkonventionelle Energietechnologien

Wenn man von der Kernenergie wieder fortkommen will und an die Möglichkeit eines Rückzugs auf konventionelle Energiequellen mindestens in den entwickelten Ländern nicht glaubt, muß man Alternativen anbieten. Zunächst ist auf die sehr großen Möglichkeiten des Energiesparens hinzuweisen. So ist eine Studie der Ford Foundation zum Ergebnis gekommen, daß durch straffe, aber durchaus nicht drakonische technisch-wirtschaftliche Maßnahmen der Energiebedarf der USA in den nächsten 25 Jahren gedeckt werden könnte, ohne Kernkraftwerke, Erdöl vom Kontinentalsockel oder aus Ölschiefer oder schließlich Tagbaukohle aus den Rocky Mountains zu verwenden.

Darüber hinaus wird zunehmend angezweifelt, ob eine weitere Steigerung des Energieverbrauchs pro Kopf in den entwickelten Ländern das menschliche Wohlbefinden überhaupt verbessert. Der Umweltschutz kann offenbar seine Ziele nicht erreichen, wenn der Energiekonsum immer weiter ansteigt. Man könnte sich denken, daß durch zunehmende Anwendung energiesparender Technologien und durch Lenkung der Lebensgewohnheiten in neue Richtungen steigende Lebensqualität ohne Steigerung des Energiekonsums erreicht werden könne. Andererseits ist nicht zu verkennen, daß selbst in den entwickelten Ländern breite Volksschichten

immer noch einen großen berechtigten Nachholbedarf in bezug auf den Güterverbrauch haben. Zweifellos gilt dies auch, und zwar im höchsten Maß, für die Entwicklungsländer. Dem Studium dieses ganzen Fragenkomplexes soll das neue Energieforschungsinstitut der Schwedischen Akademie der Wissenschaften dienen, das auf Grund einer Empfehlung der internationalen Pugwash-Bewegung (»Wissenschaft und Weltprobleme«) vor kurzem in Stockholm gegründet wurde.

Auf längere Sicht sind für den Ersatz der bisherigen Energiequellen und für weitere Expansion, soweit wünschenswert, mindestens drei neue Quellen potentiell großer Leistung in Betracht zu ziehen. Freilich müßten in jedem Fall für Forschung und Entwicklung große Mittel aufgewendet werden. Es handelt sich um die Energie der Kernverschmelzung, also der Fusion, um die geothermische Energie, also die Energie der Erdwärme, und schließlich um die Sonnenenergie. Die Problematik der großtechnischen Nutzbarmachung der Sonnenenergie für die Erzeugung von Wasserstoff und Elektrizität wird an anderer Stelle behandelt werden.⁴ Diese Nutzbarmachung kann auch in einem entwicklungsgeschichtlichen Zusammenhang gesehen werden.

Leider wird für die Erforschung der neuen Energiequellen überall viel zuwenig Geld ausgegeben. So werden zum Beispiel in den USA 1975 bis 1979 laut Plan für Sonnenenergieforschung 15mal (!) weniger Mittel zur Verfügung gestellt als allein für die Entwicklung des Schnellen Brüters, und auch von den kargen Mitteln für erstere ging bisher der größte Teil in die Entwicklung der Halbleiter-Sonnenzellen, die vorwiegend für die Raumfahrt interessant sind.

ANMERKUNGEN

1 Ein Manuskript über die Technik und Wirkungen der Kernwaffen kann vom Verfasser angefordert werden.

2 Man verläßt sich zunächst darauf, daß ein, wenn auch sehr kleiner Teil der Neutronen verzögert emittiert wird und daher die effektive Generationsdauer verlängert, so daß für die Regelung mehr Zeit zur Verfügung steht. Wenn aber durch irgendwelche Umstände die Reaktivität des Brüters plötzlich so stark zunimmt, daß schon die »prompten« (nichtverzögerten) Neutronen für sich allein sich (ähnlich wie in einer Atombombe) von Generation zu Generation vermehren, nimmt die effektive Generationsdauer sprunghaft ab. NB. Verzögert emittierte Neutronen sind nicht mit langsamen Neutronen zu verwechseln!

Ob eine durch gesteigerte Reaktivität bewirkte abnorme Erhöhung der Temperatur die Kettenreaktion weiter begünstigt oder aber hemmt, hängt von einem komplizierten Wechselspiel ganz verschiedener Faktoren ab, die sich zum Teil auch durch die Konstruktion beeinflussen lassen. Man strebt natürlich im Interesse der Sicherheit einen negativen Temperaturkoeffizienten (Hemmung) an.

3 Der Vorschlag, Abfälle in den Weltraum zu schießen, ist nicht ernst zu nehmen. Abgesehen von den enormen Kosten eines solchen Verfahrens wären die Folgen von Versagern katastrophal.

4 Inzwischen erschienen: Naturwissenschaftliche Rundschau, Oktober 1975.