

Abgereichertes Uran - Abfall der Kerntechnik

Peter Diehl 19. Januar 2000

Vortrag zur Tagung "Uranwaffen im Kosovo - Fakten und Konsequenzen"
in der Evangelischen Akademie Mülheim/Ruhr am 21.-23.1.2000

Zur Herstellung von Brennstoff für die gängigen Leichtwasser-Reaktoren muß der Anteil des spaltbaren Uranisotops U-235 im Uran gegenüber seinem natürlichen Anteil erhöht werden. Bei diesem Anreicherungsprozeß fällt Abfalluran mit einem gegenüber dem natürlichen Wert verminderten Gehalt an U-235 an. Dieses sogenannte abgereicherte Uran (engl. depleted uranium - DU) wird bisher bei den Anreicherungsanlagen im Freien gelagert. Angesichts der damit verbundenen Probleme wird nun verstärkt nach Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten gesucht.

Herkunft des abgereicherten Urans

Natürliches Uran enthält nur zu 0,71% das spaltbare Isotop Uran-235, der Rest besteht überwiegend aus Uran-238. Direkt ist Natururan nur in Graphit-moderierten Magnox-Reaktoren und Schwerwasser-Reaktoren (wie dem kanadischen CANDU-Typ) einsetzbar. Für die weltweit am meisten verbreiteten Leichtwasser-Reaktoren (Druckwasser- und Siedewasser-Reaktoren) muß der Anteil des Uran-235 künstlich erhöht werden: auf ca. 3 - 4%. Für Atomwaffen sind weit höhere Anreicherungsgrade erforderlich.

Die Aufbereitungsanlagen der Uranbergwerke liefern das Uran in 200-Liter-Fässern als Urankonzentrat (bekannt als Yellow Cake). Das Urankonzentrat kann in einer von mehreren möglichen Verbindungen von U_3O_8 vorliegen: als Natriumuranat (NaU_2O_7), Magnesiumuranat (MgU_2O_7) oder Ammoniumdiuranat ($(NH_4)_2U_2O_7$). Diese Konzentrate enthalten zudem noch verschiedene Verunreinigungen; ihr Gehalt an U_3O_8 beträgt 70 - 80%, ihr Urangehalt demnach 60 - 70%. Für die gängigen Anreicherungsverfahren wird das Uran in einer hochreinen gasförmigen Verbindung benötigt, dem Uranhexafluorid (UF_6). In einem ersten Schritt muß also das Urankonzentrat gereinigt und in das benötigte UF_6 umgewandelt werden.

Gefahren des Uranhexafluorids

Uranhexafluorid (UF_6) ist bei Raumtemperatur ein pulverförmiger Feststoff mit einer Dichte von $5,1 \text{ g/cm}^3$, geht aber bei Normaldruck schon oberhalb von $56,4^\circ\text{C}$ direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über (Sublimation). Chemisch ist UF_6 äußerst reaktiv: mit Wasser (Luftfeuchtigkeit!) bildet es die äußerst korrosive Flußsäure und das giftige Uranylfluorid (UO_2F_2). Die Flußsäure kann zu Hautverbrennungen, sowie bei Inhalation zur Schädigung der Lunge führen. Gesundheitsgefahren ergeben sich bei Inhalation von UF_6 weiterhin aufgrund der chemisch-toxischen Wirkung des Urans auf die Niere, sowie aufgrund der Strahlenwirkung des Urans.

Für die Arbeiter, die mit UF_6 umgehen, besteht das Risiko, bei Betriebsunfällen mit dem Stoff in Berührung zu kommen. Als besonders problematisch erweist sich hier das Entleeren und Befüllen der Behälter, wobei es wiederholt zu Unfällen und Explosionen gekommen ist.

Für die Bevölkerung geht die Gefahr hauptsächlich vom Transport des UF_6 zwischen den verschiedenen Anlagen der Uran-Verarbeitung aus. Problematisch wird es insbesondere dann, wenn die Behälter bei Unfällen langanhaltendem Feuer ausgesetzt sind: dann können in kurzer Zeit große Mengen UF_6 freigesetzt werden, die zu gefährlichen Konzentrationen von Uran und Flußsäure in der Luft führen. Bei einer vollständigen Freisetzung des Behälterinhalts ist bis in Entfernungen von 500 - 1000 m mit tödlichen Schadstoff-Konzentrationen zu rechnen. Außerdem können Flächen von mehreren Quadratkilometern kontaminiert werden. Wegen dieser Risiken hat die internationale Atomenergiebehörde IAEA 1996 die Anforderungen an die Feuerbeständigkeit von UF_6 -Transportbehältern verschärft. Bei einem im Dezember 1997 in Frankreich durchgeführten ersten Test zur Umsetzung dieser Richtlinie platzte ein Behälter der gängigen Type 48Y (Inhalt 12,7 t) bei einer Temperatur von $650^\circ C$ und einem Druck von 52 bar [NF 12.1.98].

Mitunter wird das Material zwischen den einzelnen Verarbeitungsschritten mehrere Male um die halbe Welt transportiert, bevor es zu Brennelementen verarbeitet wird.

Ein Schlaglicht auf die Transportrisiken warf 1984 der Untergang des Frachtschiffs Mont-Louis nach der Kollision mit einer Fähre vor der belgischen Kanalküste bei Oostende. Das Schiff hatte 30 Stahlbehälter mit insgesamt 350 t UF_6 an Bord. Das aus Frankreich, Gabun und Niger stammende Uran war in Pierrelatte in UF_6 umgewandelt worden und dann per Lastwagen über eine Entfernung von ca. 1000 km zum Hafen von Le Havre gebracht worden. Von dort sollte das Schiff seinen Weg nach Riga (Lettland) nehmen, von wo das UF_6 per Bahn zu einer russischen Anreicherungsanlage transportiert werden sollte.

Anreicherung

Für die Anreicherung des Anteils an spaltbarem Uran-235 werden derzeit zwei erprobte Verfahren benutzt: Gasdiffusions- und Gaszentrifugen-Verfahren. Weitere Verfahren befinden sich in der Entwicklung, allerdings haben die USA 1999 die Weiterentwicklung des Laser-Verfahrens AVLIS für den kommerziellen Einsatz wegen zu hoher Kostenrisiken eingestellt.

Beim Gasdiffusionsverfahren läßt man komprimiertes UF_6 -Gas durch eine poröse Membran diffundieren. Dabei bewegen sich die leichteren Uran-235-Moleküle etwas schneller als die schwereren Uran-238-Moleküle. Pro Stufe erreicht man theoretisch maximal einen Anreicherungsfaktor von 1,004; man benötigt also sehr viele hintereinander geschaltete Stufen, um die benötigte Anreicherung zu erzielen. Der Energieverbrauch dieses Verfahrens ist mit ca. 2500 kWh pro SWU (Separative Work Unit) sehr hoch, er entspricht etwa 5% des später mit diesem Uran im Reaktor produzierten Stroms. Große Gasdiffusionsanlagen sind in den USA (Paducah und Portsmouth) und Frankreich (Tricastin) in Betrieb.

Das Gaszentrifugenverfahren nützt das unterschiedliche Verhalten der Isotope in einem Schwerfeld aus. Mit Zentrifugen wird ein besonders starkes Schwerfeld erzeugt; die leichteren Uran-235-Moleküle sammeln sich dann in der Mitte der Zentrifuge und die schwereren Uran-238-Moleküle am Rand. Pro Stufe erreicht man Anreicherungsfaktoren von 1,2 - 1,5; man benötigt nur wenige Stufen für die geforderte Anreicherung. Der Durchsatz ist jedoch sehr gering, so daß viele parallel geschaltete Zentrifugen-Kaskaden benötigt werden. Der Energieverbrauch beträgt weniger als 50 kWh pro SWU, also weniger als 2% des Verbrauchs des Gasdiffusionsverfahrens. Die Zentrifugentechnik wird laufend zu effektiveren Zentrifugen hin weiterentwickelt. Große Gaszentrifugenanlagen sind in Rußland und bei Urenco in Großbritannien (Capenhurst), den Niederlanden (Almelo) und Deutschland (Gronau) in Betrieb.

Nach der Anreicherung wird das UF_6 wiederum in Stahlbehälter abgefüllt, in denen es dann zur Weiterverarbeitung gebracht wird. Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Gefahren kommt beim Umgang mit dem angereicherten UF_6 nun noch das Risiko von Kritikalitätsunfällen dazu: Es darf nie zuviel angereichertes Uran an einer Stelle zusammenkommen, damit es nicht zu unkontrollierten Kernreaktionen kommt. Deshalb werden hier auch kleinere Behälter verwendet, z.B. Type 30B (Inhalt 2,3 t)

In einem letzten Verarbeitungsschritt wird das angereicherte UF_6 dann in Brennelement-Fabriken über die Zwischenprodukte Ammoniumuranylcarbonat oder Ammoniumdiuranat in pulverförmiges UO_2 umgewandelt. Dieses wird zu Tabletten gepreßt, gesintert und in die Röhren der Brennstäbe eingefüllt, die wiederum zu Brennelementen gebündelt werden.

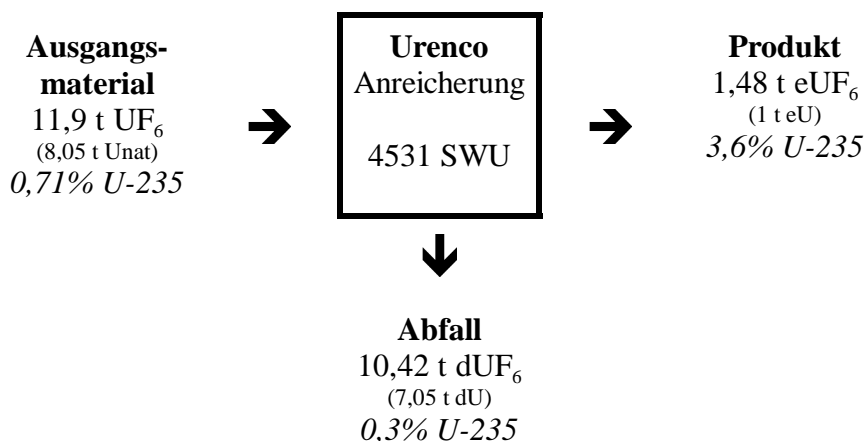
Abfallprodukt der Anreicherung: Abgereichertes Uran

Als Endprodukt entsteht in der Anreicherungsanlage nicht nur das gewünschte angereicherte UF_6 , sondern zwangsläufig auch abgereichertes UF_6 mit einem gegenüber dem natürlichen Verhältnis verminderten Anteil an Uran-235. Der Grad der Abreicherung kann in Abhängigkeit von Uranpreis und Anreicherungskosten gewählt werden; bei Urenco beträgt er 0,3% Uran-235.

Massenbilanz der Anreicherung (pro Tonne angereicherten Urans)

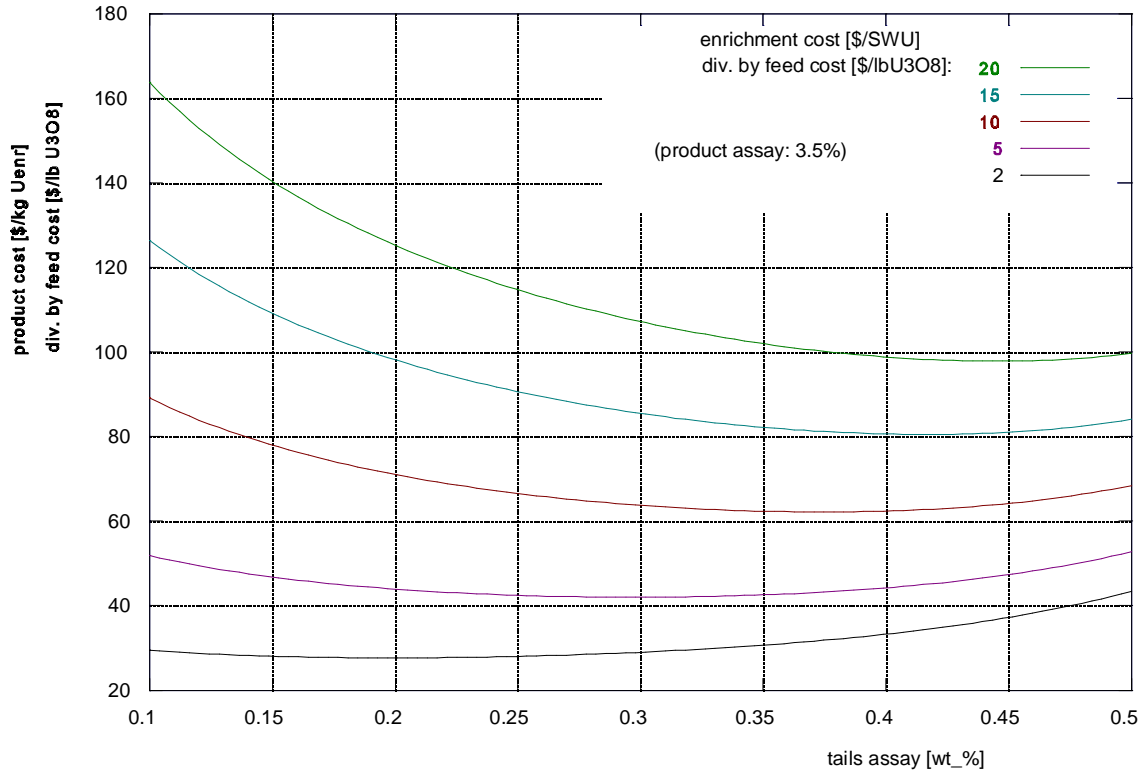
Annahmen:

- Anreicherung auf 3,6% (für DWR), Abreicherung auf 0,3%

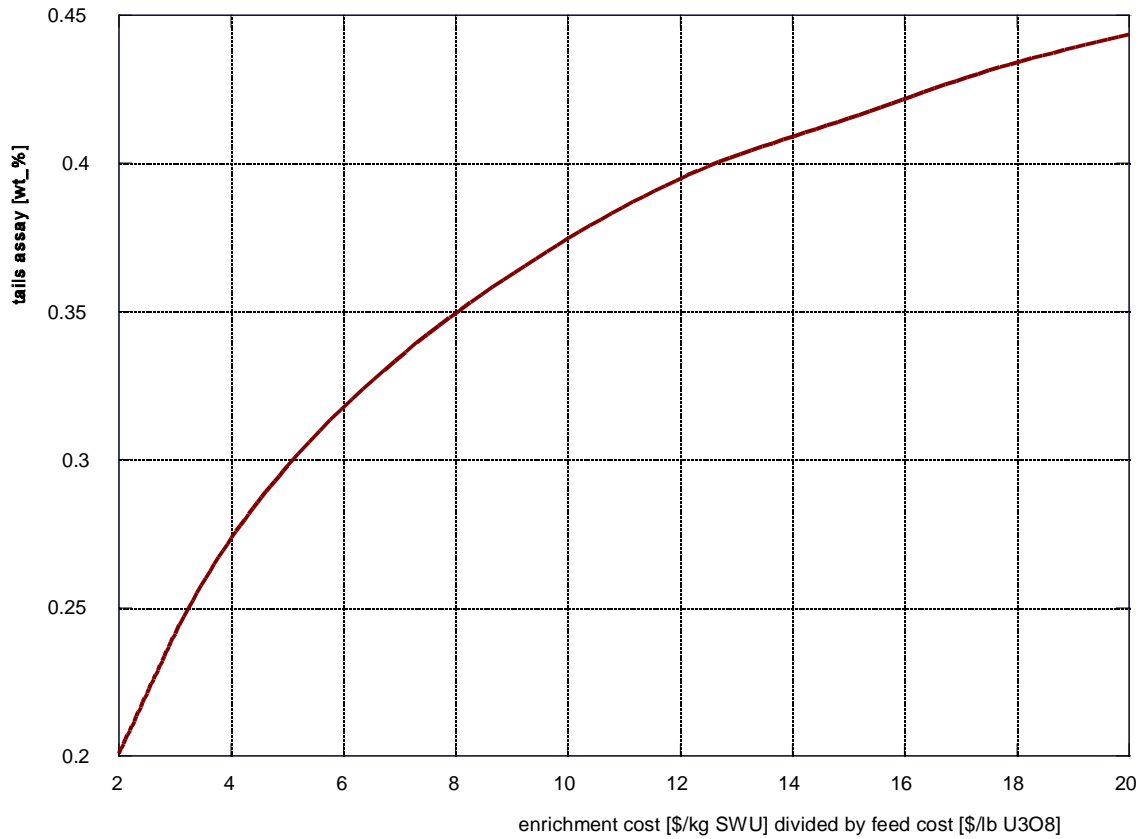


Es fällt unter diesen Bedingungen also siebenmal soviel abgereichertes wie angereichertes Uran an.

Kostenoptimierung der Anreicherung



Optimaler Abreicherungsgrad



Das abgereicherte Uran wird als UF_6 in Stahlbehältern bei den Anreicherungsanlagen im Freien gelagert. Aufgrund der chemischen Instabilität von UF_6 stellen diese Lager ein Risiko dar; bei korrosionsbedingten Leckagen oder bei Transportunfällen auf dem Gelände können gefährliche Mengen UF_6 freigesetzt werden. Als größten anzunehmenden Unfall wird man einen Flugzeugabsturz auf UF_6 -Lager annehmen müssen.

Eigenschaften des abgereicherten Urans

Natururan besteht aus den Isotopen U-234, U-235 und U-238. Diese sind alle langlebige Alphastrahler. Im abgereicherten Uran ist ihre Zusammensetzung gegenüber dem Natururan verändert: Der Anteil an Uran-235 ist im abgereicherten Uran auf typisch 0,2 - 0,3% reduziert, also etwa 30 - 40% seines Anteils in Natururan. Der Anteil von Uran-234 wird wegen seines kleineren Atomgewichts beim Anreicherungsprozeß prozentual sogar noch stärker reduziert. Hauptsächlich wegen dieses Effekts beträgt die Alpha-Aktivität von abgereichertem Uran nur etwa 60% der von Natururan.

Zusammensetzung der Uranisotope in abgereichertem Uran aus der Anreicherung von Natururan

(von der Anreicherung auf 3,5%, Abreicherung auf 0,2%)

	U-234	U-235	U-238	Gesamt
Gewichts-%	0,0008976%	0,2%	99,799%	100%
Aktivitäts-%	14,2%	1,1%	84,7%	100%
Aktivität in 1g dU	2076 Bq	160 Bq	12420 Bq	14656 Bq

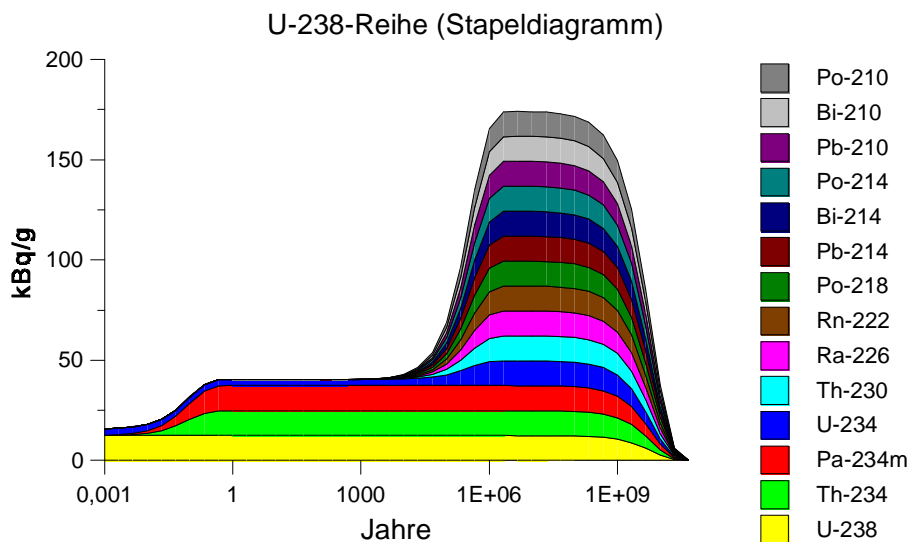
Innerhalb weniger Monate wachsen die Betastrahler Thorium-234 und Protactinium-234m nach, bis sie die Aktivität des Uran-238 erreicht haben. Die Gesamtaktivität im abgereicherten Uran bleibt danach für etwa 10 000 Jahre konstant. Dann beginnen Thorium-230 und die restlichen Zerfallsprodukte der Uran-238-Reihe nachzuwachsen. Unter diesen ist auch das Wismut-214, ein starker Gammastrahler. Nach etwa 100 000 Jahren wächst die Aktivität des Uran-234, bis es die des Uran-238 erreicht hat, wodurch auch weiteres Thorium-230 und dessen Zerfallsprodukte nachwachsen.

Nach etwa 2 Mio. Jahren sind alle Nuklide im Gleichgewicht und die Gesamtaktivität erreicht ein Maximum, auf dem sie für Milliarden von Jahren verbleibt.

Aus dem restlichen Uran-235 wächst innerhalb weniger Tage Thorium-231 nach. Nach etwa 10 000 Jahren beginnen auch Protactinium-231 und alle anderen Zerfallsprodukte der Uran-235-Zerfallsreihe nachzuwachsen.

Abgereichertes Uran hat also die ungewöhnliche Eigenschaft, daß auf lange Sicht seine Gefährlichkeit zunimmt - ein Effekt, der bei der Entsorgung zu berücksichtigen ist.

Aktivität von abgereichertem Uran



Gesundheitsgefahren gehen vom abgereicherten Uran auf mehreren Wegen aus:

- bei Annäherung entsteht eine äußere Strahlenbelastung durch Gamma- und Betastrahlung,
- beim Einatmen von Uranstaub entsteht eine Strahlenbelastung der Lunge durch Alphastrahlung,
- bei Aufnahme von Uran mit der Nahrung oder dem Trinkwasser entsteht eine Gefährdung hauptsächlich durch die chemische Toxizität des Urans.

Bei direktem Hautkontakt mit einem Geschöß aus abgereichertem Uranmetall beträgt die Hautdosis 2 mSv/h, das entspricht nach ICRP einer effektiven (Ganzkörper)-Dosis von 20 μ Sv/h. Der nach ICRP für die Allgemeinheit anzuwendende Dosisgrenzwert für die Haut von 50 mSv pro Jahr wäre nach 25 Stunden erreicht. Die Strahlendosis nimmt mit der Entfernung rasch ab: für ein 30-mm Geschöß (271 g) beträgt die effektive Dosis in 1 m Entfernung nur noch 7 nSv/h.

Die effektive Inhalationsdosis nach ICRP72 beträgt für abgereichertes Natururan 0,12 mSv/mg. Der ICRP-Grenzwert für die effektive Dosis für die Allgemeinheit von 1 mSv pro Jahr entspricht 8,3 mg. Bei kontinuierlicher Exposition und einer Atemrate von 0,9 m³/h entspricht das einer Urankonzentration in der Atemluft von 1 μ g/m³. Es gibt jedoch Hinweise darauf, daß beim Auftreffen von Urangeschossen auf harte Ziele keramische Aerosole entstehen, die erheblich länger in der Lunge verbleiben als in ICRP72 angenommen; damit würde die Strahlenbelastung in diesem Falle wesentlich höher ausfallen.

Bei oraler Ingestion geht die Gefährdung hauptsächlich von der chemischen Toxizität des Urans aus - es ist ein Nierengift. Die US-Umweltbehörde EPA hat für Uran einen Trinkwasser-Grenzwert von 20 μ g/l vorgeschlagen; die Weltgesundheitsorganisation WHO empfiehlt vorläufig den niedrigeren Wert von 2 μ g/l, um noch Raum für die Aufnahme von Uran mit der übrigen Nahrung zu lassen.

Inhalationsdosis für abgereichertes Uran aus der Anreicherung von Natururan

(von Anreicherung auf 3,5%, Abreicherung auf 0,2%, kurzlebige Zerfallsprodukte im Gleichgewicht)

ICRP72 (public) Inhalation von unlöslichen Verbindungen, Erwachsene

Nuklid	Halb-wertszeit	Spez. Akt. [Bq/g]	Konz. [Gew._%]	Dosisfakt. [Sv/Bq]	Eff. Dosis [Sv/g]	Dosis-Anteil
U-238	4.468e9 a	1.245e+04	9.980e+01	8.000e-06	9.936e-02	83.73%
Th-234	24.1 d			7.700e-09	9.563e-05	0.08%
Pa-234m	1.17 m					
U-235	7.038e8 a	8.001e+04	2.000e-01	8.500e-06	1.360e-03	1.15%
Th-231	25.52 h			3.300e-10	5.281e-08	0.00%
U-234	2.445e5 a	2.313e+08	8.210e-04	9.400e-06	1.785e-02	15.04%
Gesamt			1.000e+02		0,119	100.00%

Mögliche Verunreinigungen des abgereicherten Urans

Daß im abgereicherten Uran möglicherweise nicht nur die beschriebenen Nuklide aus den natürlichen Zerfallsreihen enthalten sind, wurde in der Öffentlichkeit erstmals 1994/95 im Zuge des Genehmigungsverfahrens für ein Lager für abgereichertes Uran in Frankreich erörtert.

Die französische Firma Cogéma hatte für ihr Lager für abgereichertes Uran in Bessines (s.u.) ursprünglich eine Kapazität von 265 000 t beantragt. Während der Anhörungen zu dem Projekt stellte sich jedoch heraus, daß Cogéma bei den Berechnungen für das Gesamt-Aktivitätsinventar ein paar Radionuklide "vergessen" hatte; die spezifische Aktivität des abgereicherten Urans sei mit 21 100 Bq/g statt 15 902 Bq/g um 33% höher als angegeben. Damit hätte das Projekt die Grenze von 100 000 Curie ($3,7 \times 10^{15}$ Bq) überschritten und es wäre eine andere Art Genehmigung notwendig geworden. Daher wurde die genehmigte Kapazität begrenzt auf 199 900 t abgereicherten Urans. Es ging dabei hauptsächlich um das künstliche Uranisotop U-236, das nur bei der Verarbeitung von wiederaufgearbeitetem Uran in den Anreicherungsprozeß und damit in das abgereicherte Uran gelangen kann.

1999 wurde bekannt, daß die Arbeiter in der US-Anreicherungsanlage Paducah (Kentucky) jahrzehntelang unwissentlich erhöhten Strahlenbelastungen ausgesetzt waren, da außer Natururan auch stillschweigend Uran aus der Wiederaufarbeitung verarbeitet wurde. Dafür wären eigentlich besondere Schutzvorkehrungen nötig gewesen. Letzteres enthält neben Spaltprodukten (Technetium-99) auch künstliche Uranisotope (U-232, U-233, U-236, U-237) sowie Transurane (Plutonium-239 und Neptunium-237). Es ist also zu befürchten, daß solche strahlenden Verunreinigungen auch bis in das abgereicherte Uran gelangt sind.

Tatsächlich ist im abgereicherten Uran mit dem Auftreten der schwereren der genannten Isotope zu rechnen (U-236, Pu-239 und Np-237), außerdem ist der Gehalt an U-234 erhöht. Nach Angaben des US-Energieministeriums wird der Großteil der Transurane aber schon beim Konversionsprozeß zu UF₆ vor der Anreicherung abgetrennt.

Zusammensetzung der Uranisotope in abgereichertem Uran aus der Anreicherung von Wiederaufarbeitungs-Uran

(ursprünglich angereichert auf 3,5%, nach Abbrand von 39 GWd/tSM und Kühlzeit von 5 Jahren nach der Reaktor-Entladung, Abreicherung auf 0,2%)

	U-234	U-235	U-236	U-238	Gesamt
Gewichts-%	0,00194%	0,2%	0,2266%	99,571%	100%
Aktivitäts-%	20%	0,71%	24,1%	55,2%	100%
Aktivität in 1g dU	4485 Bq	160 Bq	5429 Bq	12396 Bq	22470 Bq

nach [Neghabian1991] S.90

Insgesamt führt die Verarbeitung von Wiederaufarbeitungs-Uran statt Natururan bei der Anreicherung zu einer Zunahme der Alpha-Aktivität des abgereicherten Urans um 53%. Die Inhalationsdosis nach ICRP72 nimmt um 60% zu.

Inhalationsdosis für abgereichertes Uran aus der Anreicherung von wiederaufgearbeitetem Uran

(ursprüngliche Anreicherung 3,5%, nach Abbrand von 39 GWd/tSM, 5 Jahre Kühlzeit nach Reaktor-Entladung, Abreicherung auf 0,2%, alles Pu-239 und Np-237 erscheint im abgereicherten Uran, kurzlebige Zerfallsprodukte im Gleichgewicht)

ICRP72 (public) Inhalation von unlöslichen Verbindungen, Erwachsene

Nuklid	Halbwertszeit	Spez. Akt. [Bq/g]	Konz. [Gew._%]	Dosisfakt. [Sv/Bq]	Eff. Dosis [Sv/g]	Dosis-Anteil
U-238	4.468e9 a	1.245e+04	9.957e+01	8.000e-06	9.913e-02	52.12%
Th-234	24.1 d			7.700e-09	9.542e-05	0.05%
Pa-234m	1.17 m					
U-236	2.342e7 a	2.396e+06	2.266e-01	8.700e-06	4.724e-02	24.83%
U-235	7.038e8 a	8.001e+04	2.000e-01	8.500e-06	1.360e-03	0.72%
Th-231	25.52 h			3.300e-10	5.281e-08	0.00%
U-234	2.445e5 a	2.313e+08	1.939e-03	9.400e-06	4.216e-02	22.16%
Pu-239	24131 a	2.295e+09	4.382e-07	1.600e-05	1.609e-04	0.08%
Np-237	2.14e6 a	2.610e+07	2.434e-05	1.200e-05	7.623e-05	0.04%
Pa-233	27 d			3.900e-09	2.478e-08	0.00%
Gesamt			1.000e+02		0,190	100.00%

Der Umgang mit dem Abfallproblem der Urananreicherung

Bisher wurde von den Betreibern argumentiert, daß es sich bei den Lagern mit abgereichertem UF_6 nur um eine Zwischenlagerung handelt, da ein denkbarer starker Anstieg des Uranpreises oder mögliche zukünftige Anreicherungstechnologien die Möglichkeit bieten könnten, auch den in dem abgereicherten Uran noch vorhandenen Rest an Uran-235 zu wirtschaftlichen Bedingungen nutzen zu können.

Inzwischen brennt den Betreibern das Problem jedoch unter den Nägeln: In den USA beispielsweise hatten sich bis 1993 bereits 560 000 t an abgereichertem UF_6 in 46 422 Stahlbehältern angesammelt; inzwischen sind 8000 weitere Behälter dazugekommen. Die Behälter zeigen zunehmend Korrosions-Erscheinungen und müssen verstärkt überwacht werden.

USA: Verwertung angestrebt

Angesichts der Probleme mit der bisherigen Lagerung als UF_6 hat die US-Regierung nun die Initiative ergriffen. In Anbetracht der drohenden Entsorgungskosten in Milliardenhöhe für eine Beseitigung des abgereicherten Urans als Atommüll hat sie nun intensiv nach alternativen Verwertungsmöglichkeiten suchen lassen. Kleinere Mengen an abgereichertem Uran wurden bisher zwar schon als Uranmetall wegen seiner hohen Dichte z.B. für Gegengewichte in Flugzeugen oder vom Militär als Material für besonders durchdringende Geschosse oder für Panzerungen (erstmalig eingesetzt im Golfkrieg) verwendet, für das Gros des Materials war jedoch bisher keine Verwendung in Sicht.

Eine Einsatzmöglichkeit für größere Mengen abgereicherten Urans sieht man als UO_2 oder Uranmetall in Abschirmungen von Behältern für hochaktiven Atommüll. Wegen seiner hohen Dichte und seiner hohen relativen Atommasse hat es eine bessere Schirmwirkung als Blei, und die vergleichsweise geringe Eigenaktivität würde in diesem Fall nicht weiter stören. Daneben wird noch weiter nach industriellen Einsatzmöglichkeiten für das abgereicherte Uran gesucht (so war die Rede z.B. von Gegengewichten für Gabelstapler), womit dieser problematische Stoff in alle möglichen Lebensbereiche eindringen und die Frage der endgültigen Entsorgung nur in die Zukunft verschoben würde.

Interessanterweise spielt die Tatsache, daß die so angestrebte Verwertung des abgereicherten Urans zumindest teilweise die Möglichkeit verbaut, den Restgehalt an Uran-235 in Zukunft noch wiederzugewinnen, bei den Entscheidungen keine Rolle.

Die verbleibenden Mengen, für die keine Anwendung gefunden wird, könnten als UO_2 oder U_3O_8 zwischen- oder endgelagert werden.

Allen diesen Varianten ist gemeinsam, daß das abgereicherte Uran nicht in der vorliegenden Form als UF_6 benötigt wird, sondern als UO_2 , U_3O_8 oder Uranmetall. Daher hat die U.S. Regierung 1998 - im Vorgriff auf eine endgültige Entscheidung über die letztliche Verwendung des abgereicherten Urans - beschlossen, zwei Rekonversions-Anlagen zu Kosten von je 200 Mio. \$ zu bauen, die die in jedem Fall benötigte Umwandlung durchführen können.

Europa: Langzeit-Zwischenlager

Auch in Europa geht man nun daran, die problematischen Lager mit abgereichertem UF_6 aufzulösen, allerdings ist hier nicht an eine Verwertung, sondern nur an eine sicherere Lagerform gedacht.

In Frankreich erhielt die Firma Cogéma 1995 die Genehmigung, 199 900 t abgereicherten Urans

in speziell zu errichtenden Hallen auf dem Gelände eines ehemaligen Uranerzaufbereitungsbetriebs in Bessines-sur-Gartempe am Nordwestrand des Zentralmassivs einzulagern. Das Material liegt bisher als UF_6 bei der Anreicherungsanlage Tricastin im Rhône-tal vor und soll zur Lagerung in einer bereits bestehenden Anlage in Pierrelatte ("usine W") in die chemisch stabilere Form U_3O_8 umgewandelt werden. Als Zweck der Lagerung wurde die mögliche Ausnutzung des Restgehalts an Uran-235 mit zukünftigen neuen Anreicherungsverfahren genannt.

Im Juli 1998 widerrief jedoch das Verwaltungsgericht Limoges die Genehmigung mit der Begründung, daß diese Lagerung als Endlagerung zu betrachten sei. Die Freude bei den französischen Umweltschützern währte allerdings nicht lange, denn am 5. November 1998 entschied die nächste Gerichtsstanz in Bordeaux, daß das abgereicherte Uran kein Abfall, sondern ein Rohstoff mit vielen Anwendungsbereichen sei. Aufgrund dieser Entscheidung begann Cogéma am 12. November 1998 mit der Einlagerung.

Auch Urenco hat im Zuge der beantragten Kapazitätserweiterung auf 4 Mio. SWU/a in Gronau einen Antrag zur Errichtung für ein Langzeit-Zwischenlager für abgereichertes Uran gestellt. Für die Einlagerung soll das UF_6 von Cogéma in Pierrelatte (Frankreich) in U_3O_8 umgewandelt werden. Das Lager soll eine Gesamtkapazität von 50 000 t U_3O_8 haben - das entspricht 62 722 t UF_6 . Das derzeitige Lager für abgereichertes UF_6 hat eine genehmigte Kapazität von 38 000 t UF_6 .

Zivile Anwendungen von abgereichertem Uran

Im 19. Jahrhundert und in den USA auch bis in die dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts wurde Uran als Farbstoff in Glas sowie in Keramik-Glasuren für Geschirr und Kacheln eingesetzt. Später kamen die Uranfarben aus der Mode, bzw. in den USA wurde in den vierziger Jahren alles Uran vom Staat für die beginnende Atomwaffenentwicklung beansprucht. Uranglas enthält typ. 1% Uran, Keramik-Glasuren enthalten bis zu 20% Uran. Die Gesamtproduktion von Uranfarben (mit einem Urangehalt von 70%) im 19. Jahrhundert wird auf 260 t geschätzt, 150 t davon für Uranglas [Kirchheimer1963]. Neuere Untersuchungen an solchem uranhaltigen Geschirr haben gezeigt, daß bei Kontakt mit sauren Lebensmitteln beträchtliche Mengen des Nierengifts Uran herausgelöst werden können, weswegen beim Umgang mit solchen Antiquitäten Vorsicht geboten ist.

In neuerer Zeit wurde Uran u.a. als Zusatz für Stahllegierungen und in chemischen Prozessen (z.B. als Katalysator) eingesetzt. Wegen seiner hohen Dichte kann Uran auch in Gewichten oder Schwungrädern eingesetzt werden. So wurden die ersten 550 Exemplare des Flugzeugtyps Boeing-747 mit Gegengewichten aus abgereichertem Uranmetall ausgerüstet. (Für alle nicht-nuklearen Anwendungen sind Natururan und abgereichertes Uran gleichwertig.)

Die Verwendung von Uran in Alltagsartikeln schien dagegen schon längst Geschichte zu sein, als 1999 in Frankreich in gelbem Email-Pulver aus aktueller Produktion abgereichertes Uran als Farbstoff entdeckt wurde. Das Pulver mit einem Urangehalt von 10% wird von Kunsthandwerkern zur Herstellung von Email-Schmuck (Broschen, Ringe, Anhänger) verwendet. Da das Pulver bis vor kurzem ohne jeglichen Warnhinweis verkauft wurde, haben sich diese Handwerker nichtsahnend dem Strahlungs-Risiko durch die Inhalation des alpha-strahlenden Urans ausgesetzt. Die Nutzer des Schmucks werden durch die vom Uran und seinen Zerfallsprodukten ausgehende Gamma- und Betastrahlung sowie durch das mögliche Herauslösen des Nierengifts Uran gefährdet. Die Firma, die das Email-Pulver herstellt, bezieht das abgereicherte Uran dafür von der Fa. Cogéma in der Form von U_3O_8 - die gleiche Form, die

Cogéma jetzt auch für die Langzeit-Zwischenlagerung in Bessines herstellt. Zufällig liegt die Herstellerfirma des Pulvers nicht weit von Bessines...

Wiederanreicherung von abgereichertem Uran

Einen besonderen Weg hat die Anreicherungsfirma Urenco für die Verwendung ihrer Bestände an abgereichertem Uran eingeschlagen: Urenco läßt das abgereicherte Uran in der Zentrifugen-Anreicherungsanlage des russischen Atom-Ministeriums Minatom in Novouralsk bei Ekaterinburg seit einigen Jahren wieder anreichern. Das Uran wird bis auf den natürlichen Gehalt von 0,71% Uran-235 angereichert und anschließend zu Urenco zurücktransportiert. Dort wird es in den normalen Anreicherungsprozeß eingebracht. Im Jahr 1996 wurden auf diese Weise über 6000 t abgereicherten Urans verarbeitet [NF 6.10.97].

Damit findet die von den Betreibern der Anreicherungsanlagen als Zukunftsperspektive genannte Rückgewinnung des Rests an U-235 aus dem abgereicherten Uran bereits heute statt. Dies ist auf den ersten Blick überraschend, da es ja an den dafür genannten Voraussetzungen fehlt: weder ist der Uranpreis in die Höhe gegangen (er sinkt im Gegenteil), noch sind etwaige hocheffiziente Anreicherungsverfahren einsatzbereit. Wie sich bei näherer Betrachtung zeigt, ist die Rückgewinnung in diesem Fall aber gar nicht der eigentliche Zweck...

Aus dem Jahresbericht 1998 der Euratom geht hervor, daß in diesem Jahr in ihrem Wirkungsbereich eine Uranmenge von 1000 - 2000 t U (Natururan-Äquivalent) aus der Wiederanreicherung eingesetzt wurde. Wenn man obige Massenbilanz zugrunde legt, bedeutet dies, daß dafür 13 600 - 27 200 t abgereichertes Uran nach Rußland gebracht wurden, das zwei- bis vierfache der für 1996 genannten Menge. Es ist allerdings nicht klar, ob die von Euratom genannte Menge ausschließlich aus der laufenden Produktion stammt, oder ob darin auch Lagerbestände enthalten sind. Wenn man ersteres annimmt, dann ist dies zugleich das zwei- bis vierfache der bei Urenco im gleichen Zeitraum neu angefallenen Menge: man könnte daraus also schließen, daß Urenco im Moment mit Hochdruck seine Bestände an abgereichertem Uran abbaut. Tatsächlich hat Urenco inzwischen bestätigt, daß der Lagerbestand an abgereichertem Uran in Gronau derzeit abnimmt [WN 31.7.99]

Probleme hat Urenco bisher nur damit, daß Kanada seine Nonproliferations-Bestimmungen auch auf abgereichertes Uran anwendet. Rußland weigert sich aber, seine Anreicherungsanlagen der Aufsicht der IAEA zu unterstellen. Urenco darf also nicht ohne weiteres abgereichertes Uran nach Rußland schicken, das bei der Anreicherung kanadischen Urans angefallen ist. Ähnliches gilt auch für Uran aus Australien. Verhandlungen zur Lösung dieser Frage sind derzeit im Gange. [NF 4.10.99].

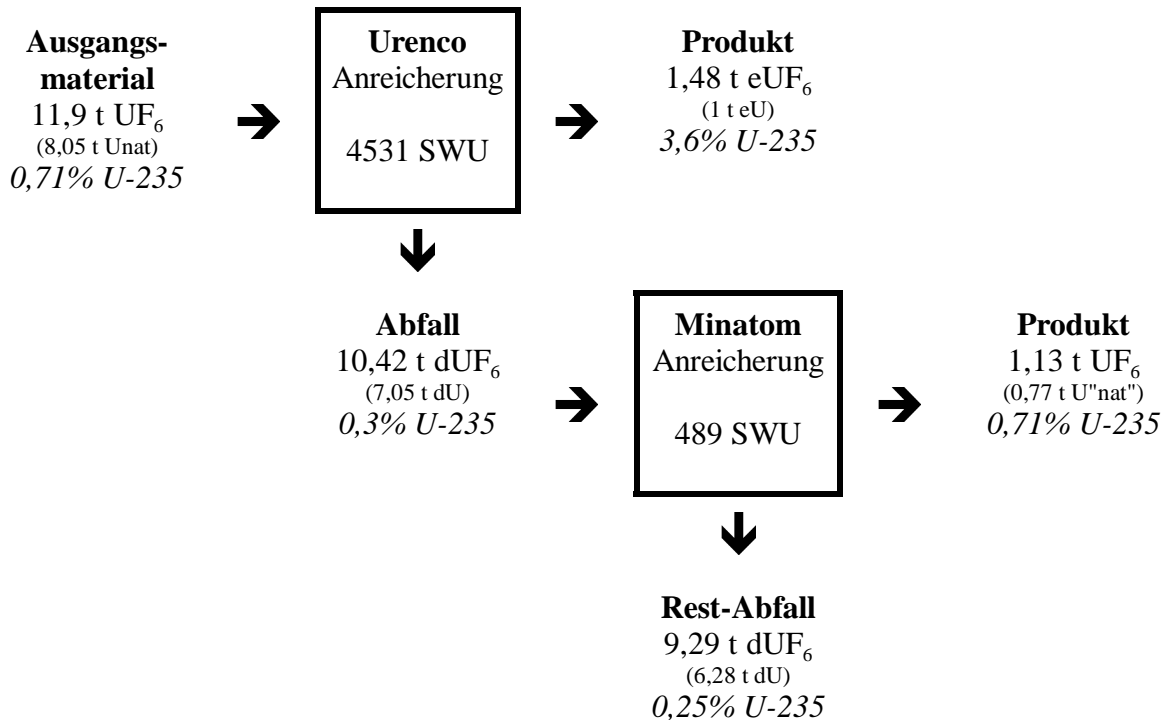
Zur Vermarktung des zurückgewonnenen "naturäquivalenten" Urans hat Urenco einen Vertrag mit der kanadischen Fa. Cameco abgeschlossen, dem derzeit größten Uranproduzenten der Welt. [NF 20.9.99]

Aus der Sicht Urencos würde das Wiederanreicherungs-Geschäft keinen besonderen Sinn machen, wenn es da nicht einen besonderen Grund gäbe - schließlich könnte Urenco das abgereicherte Uran ja auch selber tiefer abreichern, wenn dies wirtschaftlich von Vorteil wäre. Ein Grund könnte sein, daß Minatom angesichts seiner derzeitigen Überkapazitäten möglicherweise nicht den vollen Weltmarktpreis für die Wiederanreicherung berechnet.

Massenbilanz der Wiederanreicherung (pro Tonne angereicherten Urans)

Annahmen:

- Urenco: Anreicherung auf 3,6%, Abreicherung auf 0,3%
- Minatom: Abreicherung auf 0,25%



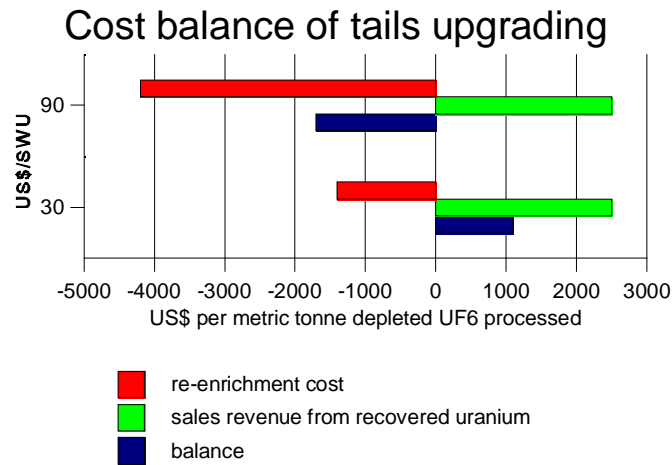
Beobachtungen:

- 9,5% des Urans im ursprünglichen Ausgangsmaterial wird zurückgewonnen
- Die Rückgewinnung beträgt 1,57 kg Uran pro bei Minatom aufgewendeter SWU, oder 74 kg pro t verarbeitetem abgereicherten UF₆
- Die Masse des abgereicherten Urans reduziert sich nur um 11%

Bei Anwendung der Weltmarktpreise unter den Marktbedingungen von 1997 wäre das zurückgewonnene Uran 68% teurer als frisches Uran. Pro Tonne abgereichertes UF₆ könnte Uran im Marktwert von 2500 US\$ zu Kosten von 4200 US\$ rückgewonnen werden. Urenco bliebe also auf Kosten von 1700 US\$ pro t UF₆ sitzen *). Inzwischen haben sich die Bedingungen sogar noch weiter verschlechtert.

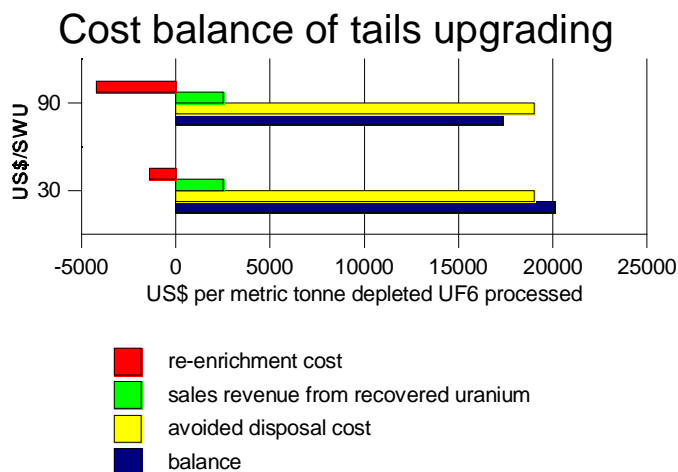
Wenn Minatom jedoch statt des Weltmarktpreises nur die Betriebskosten seiner Anreicherungsanlagen (geschätzt 20 - 30 US\$ pro SWU [DOE1997e]) in Rechnung stellen würde, würde das wiederangereicherte Uran nur etwa halb soviel kosten wie frisches Uran. Nimmt man 30 US\$ pro SWU an, könnte pro Tonne an abgereichertem UF₆ Uran im Marktwert von 2500 US\$ zu Kosten von 1400 US\$ zurückgewonnen werden. Urenco würde also einen

Gewinn von 1100 US\$ pro t UF₆ machen.



Der Clou aber ist, daß das bei der Wiederanreicherung anfallende zweifach abgereicherte Uran in Rußland verbleibt, wo es vermutlich bis auf weiteres als UF₆ gelagert wird.

Normalerweise müßten für das deutsche Urenco-Werk in Gronau die Entsorgungskosten für das abgereicherte Uran im geplanten Endlager Gorleben berücksichtigt werden. Dies ist das einzige, das in Deutschland in Frage kommt, da das geplante Endlager für schwach-aktive Abfälle im Schacht Konrad solche Mengen an Uran nicht aufnehmen kann: die für dieses Lager festgelegten Gesamtaktivitäten erlauben nur die Einlagerung von insgesamt etwa 100 t abgereicherten Urans [Wingender1994]. Die Kosten der Endlagerung in Gorleben wären umgerechnet 18 200 US\$ pro t UF₆; zusammen mit den Kosten für die Umwandlung in Uranoxid käme man auf etwa 19 000 US\$ pro t UF₆. Die Endlagerkosten wären also über 10 mal so hoch wie die Verluste aus der Wiederanreicherung zu Weltmarktpreisen, und sie würden knapp die Hälfte von Urencos Einnahmen aus dem Anreicherungs-geschäft auffressen. Bei Betrachtung der vermiedenen Endlagerkosten macht Urenco mit der Wiederanreicherung also einen Netto-Gewinn von 17 300 US\$ pro t UF₆. *)



Dieser Gewinn ist natürlich nur eine theoretische Größe, denn wenn Urenco die Endlagerkosten für Gorleben tatsächlich bezahlen müßte, wäre dies vermutlich das geschäftliche Aus für die Firma in Deutschland. In den USA beispielsweise stellt man weniger strenge Anforderungen an

ein Endlager für abgereichertes Uran und berechnet die Endlagerkosten maximal zu 2500 US\$ pro t UF_6 , also nur 14% der Kosten in Gorleben [DOE1997c]; ganz davon abgesehen, daß es ein solches Endlager für abgereichertes Uran bisher nirgends gibt. Urenco ist also lebensnotwendig darauf angewiesen, diese Kosten wie auch immer zu vermeiden.

Für Urenco liegt der Hauptzweck dieses Handels mit Minatom also ganz offensichtlich darin, ihr Abfallproblem zu lösen. Die mit der Wiederanreicherung an sich erlittenen Verluste oder (je nach Preisgestaltung von Minatom) erzielten Gewinne spielen überhaupt keine Rolle gegenüber den vermiedenen Endlagerkosten. Die Bundesregierung jedoch beruft sich auf eine zusammen mit Großbritannien und den Niederlanden durchgeführte Prüfung, nach der "mit der Wiederanreicherung in Rußland keine gegen internationale Regeln, Standards oder Verpflichtungen verstoßende Entsorgung von Reststoffen verbunden ist". (Bundestags-Drucksache 13/8810)

*) Diese Zahlen beruhen auf folgenden Annahmen (Preise 1997): Uranpreis von 11 US\$ pro lb U_3O_8 bzw. 34,2 US\$ pro kg U als UF_6 , Anreicherungskosten von 90 US\$ pro SWU, einer Anreicherung des Produkts auf 3,6% (für Druckwasser-Reaktoren) und einer Abreicherung des Abfalls bei Urenco auf 0,3%, und einer weiteren Abreicherung des Abfalls bei Minatom auf 0,25%. Die Endlagerkosten für ein 200-Liter-Faß im Endlager Gorleben werden mit 15 000 DM veranschlagt, das benötigte Lagervolumen für das abgereicherte Uran in der Form von UO_2 (nach Einzementierung) wird mit 550 Liter pro Tonne UO_2 angesetzt, der Dollarkurs mit 1,74 DM. Die Transportkosten wurden nicht berücksichtigt.

Für Rußland könnte die Wiederanreicherung auch aus einem anderen Grund interessant sein: Minatom hat derzeit überschüssige Anreicherungs-Kapazitäten in Höhe von 9 Mio. SWU. Amerikanische Experten vermuten, daß Minatom diese Kapazitäten dazu verwendet, Urencos abgereichertes Uran nicht nur von 0,3% bis auf 0,25%, sondern weiter bis auf 0,12% Uran-235 abzureichern [NF 19.10.98]. In diesem Fall könnte Minatom 7290 t "Natururan" zurückgewinnen, das wären 26,7% des von Urenco ursprünglich eingesetzten Ausgangsmaterials. Davon gingen 2610 t zurück an Urenco und 4680 t könnte Minatom auf eigene Rechnung auf dem Uranmarkt verkaufen. Die Ausbeute betrüge mit 0,81 kg Uran pro bei Minatom aufgewendeter SWU allerdings nur noch etwa die Hälfte. Die Masse des abgereicherten Urans reduzierte sich dabei um 30,5%.

Unter normalen Umständen würde Minatom mit diesem Geschäft Verluste machen. Die Situation wird jedoch anders, wenn man für die Wiederanreicherung statt des Weltmarktpreises nur die Betriebskosten (geschätzt 20 - 30 US\$ pro SWU [DOE1997e]) veranschlagt: In diesem Fall würde bei Abreicherung von 0,3% auf 0,12% das rückgewonnene Uran gerade etwa soviel kosten wie frisches Uran.

Die US-Anreicherungsfirma USEC fürchtet inzwischen, daß Minatom bei einer Aufhebung der US-Handelsbeschränkungen für in Rußland angereichertes Uran seine Überkapazitäten wieder dazu verwenden könnte, Natururan anzureichern, und diese Anreicherungsleistung dann zu konkurrenzlosen Preisen ab 30 US\$ pro SWU zu verkaufen [NF 4.10.99]. Für Urenco würde dies das Ende der für die Firma lebensnotwendigen preisgünstigen Entsorgung seines abgereicherten Urans bedeuten. Somit erklären sich auch Urencos neue Pläne, in Gronau ein Langzeit-Zwischenlager für abgereichertes Uranoxid zu errichten.

Schlußfolgerungen

- Pro Tonne angereicherten Urans fallen ca. 7 Tonnen abgereicherten Urans an.
- Die bisher praktizierte Zwischenlagerung des abgereicherten Urans als UF_6 ist in hohem Maße unsicher.
- Das abgereicherte Uran bereitet der Anreicherungsindustrie einen zunehmenden Problemdruck, sowohl von den technischen Problemen der UF_6 -Lagerung, als auch von den drohenden Entsorgungskosten her.
- Der derzeitige Anreicherungspreis enthält nicht die Entsorgungskosten für das anfallende abgereicherte Uran (die Endlagerung in Deutschland würde 50% des Anreicherungspreises auffressen!). Dennoch sinkt der Anreicherungspreis zur Zeit wegen weltweiter Überkapazitäten.
- Die als Begründung für die derzeitige Zwischenlagerung angeführte zukünftig denkbare Rückgewinnung des Rests an spaltbarem Uran-235 ist nur eine Schutzbehauptung, um die Entsorgungsfrage auf die Zukunft abzuschieben:
 - Das US-Energieministerium faßt bei seinen Planungen für eine Verwertung des abgereicherten Urans hauptsächlich Verwendungsmöglichkeiten ins Auge, bei denen eine Rückgewinnung nicht oder nur erschwert möglich wäre,
 - Urenco müßte dann ja ein Interesse haben, das von Minatom weiter auf 0,25% abgereicherte Uran zurückzunehmen, das Gegenteil ist aber der Fall.
- Die bisher praktizierte zivile und militärische Verwertung hat die Bestände an abgereichertem Uran nicht merklich verringern können.
- Die Suche nach neuen Verwertungsmöglichkeiten bringt die Gefahr mit sich, daß das Uran unkontrolliert in alle möglichen Lebensbereiche eindringt. Allein die Verwendung in Behältern für hochaktiven Atommüll erscheint in dieser Hinsicht akzeptabel.
- Der seit einigen Jahren von Urenco praktizierte Transport von abgereichertem Uran zur Wiederanreicherung in Rußland stellt einen verkappten Atommüll-Export dar:
 - Das zweifach abgereicherte Uran verbleibt in Rußland.
 - Die Menge des abgereicherten Urans nimmt durch die Wiederanreicherung nur minimal ab.
 - Die Wiederanreicherung rechnet sich unter derzeitigen Weltmarktbedingungen bei weitem nicht. Möglicherweise ist sie dann wirtschaftlich, wenn Rußland die Wiederanreicherung zu Dumpingpreisen ausführen sollte, auf jeden Fall aber, wenn man die vermiedenen Endlagerkosten für Urenco berücksichtigt.
- Die nun in verschiedenen Ländern anlaufende Umwandlung des abgereicherten Uranhexafluorids UF_6 in die chemisch stabilere Form von Uranoxid (UO_2 oder U_3O_8) zwecks sichererer Lagerung ist an sich begrüßenswert, aber:
 - dies begünstigt auch die direkte Verwendung in dieser Form und damit die unkontrollierte Verbreitung in Produkten aller Art (siehe Email-Schmuck in Frankreich!); dieser Weiterverbreitung muß ein wirksamer Riegel vorgeschoben werden,
 - dies ist nur ein erster notwendiger Schritt in Richtung auf eine sichere Endlagerung: die damit zusammenhängenden Fragen sind noch gar nicht angegangen worden.

Literatur

[DOE1997c] Summary of the Cost analysis report for the long term management of depleted uranium hexafluoride, U.S. Department of Energy, September 1997, Report No. UCRL-ID-127650, 23 p.

[DOE1997e] Engineering analysis report for the long term management of depleted uranium hexafluoride, U.S. Department of Energy, May 1997, Report No. UCRL-AR-124080

[DOE1999] Programmatic Environmental Impact Statement for Alternative Strategies for the Long-Term Management and Use of Depleted Uranium Hexafluoride, U.S. Department of Energy, April 1999, DOE/EIS-0269

[Goldstick1991] Goldstick, Miles: The Hex Connection - Some Problems And Hazards Associated With The Transportation Of Uranium Hexafluoride, Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Ecology and Environmental Research, Uppsala, 1991, 196 S., ISBN 91-576-4440-3

[Kirchheimer1963] Kirchheimer, Franz: Das Uran und seine Geschichte, Stuttgart 1963, 371 S.

[Neghabian1991] Neghabian, A.R., Becker, H.J., Baran, A., Binzel, H.-W.: Verwendung von wiederaufgearbeitetem Uran und von abgereichertem Uran. Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1992-332, November 1991, 186 S.

[Wingender1994] Wingender, H.J., Becker, H.J., Doran, J.: Study on depleted uranium (tails) and on uranium residues from reprocessing with respect to quantities, characteristics, storage, possible disposal routes and radiation exposure. European Commission, Nuclear Science and Technology, Report EUR 15032 EN, Luxembourg 1994

NF = Nuclear Fuel

Ux = Uranium Exchange Co.

WN = Westfälische Nachrichten

Aktuelle Informationen zum Thema bietet das WISE Uranium Projekt im Internet unter <http://www.wise-uranium.org>