

"Die ich rief, die Geister, die werd' ich nun nicht los"  
(Goethe's Zauberlehrling)

Juni 1997  
(rev. Feb. 2001)

## Hintergrundinformation zu einem aktuellen Thema

---

# CUT-OFF : die technische Seite

---

1. Einleitung
  2. Spaltmaterial und Kernwaffen
  3. Spaltmaterialien
  4. Die Produktion von Spaltmaterial
  5. Die Inventare an Spaltmaterial in Waffenqualität
  6. Die Verifikationsproblematik
  7. Schlusswort
  8. Glossar
- 

## 1. Einleitung

**"Cut-Off" ist die Kurzbezeichnung für ein geplantes Abkommen, welches die künftige Herstellung von Spaltmaterial für Kernwaffen verbieten würde.**

- **Lohnt sich die Mühe zu diesem Thema eine "aktuelle Hintergrundinformation" heraus zu geben?**

Keine triviale Frage, denn "Insider" wissen, dass in keinem der offiziellen und inoffiziellen Kernwaffenstaaten und auch bei keinem der erkannten Proliferanten überhaupt noch **Uran** bis auf **Waffenqualität** angereichert wird. **Plutonium für Waffenzwecke** wird, in geringen Mengen, nur noch in Indien und Israel produziert.

- **Ist das Thema überhaupt aktuell?**

Ja, denn es entspricht einer dringenden Forderung der Weltgemeinschaft. Aktuell sind zur Zeit aber auch die Hintergründe, die bewirkten, dass "Cut-Off"-Verhandlungen noch nicht beginnen konnten.

- **Macht es Sinn, im Rahmen der Genfer Abrüstungskonferenz mühsam einen universell anwendbaren Vertrag auszuhandeln und aufwändige, teure Verifikationsprozeduren zu entwickeln, nur wegen dieser paar Ausnahmen? Ist ein "Cut-Off"-Abkommen bloss eine Alibiübung, oder doch mehr?**

Auch dies keine triviale Frage! Für die Kernwaffenstaaten ist ein "Cut-Off" tatsächlich eine Alibiübung. Ihr Hauptanliegen gilt weniger der

Weiterführung der Produktion als vielmehr der Weiterverwendung bzw. der Entsorgung ihrer gewaltigen Überschüsse. Die "Ausnahmen" sind da stärker betroffen. Ein Produktionsverbot, eben ein "Cut-Off", erscheint also auf den ersten Blick eher als politisches Seilziehen, aber ein Seilziehen mit einem starken technischen Hintergrund. Die Verhandlungen der Genfer Abrüstungskonferenz über ein **"Fissile Material Cut-Off-Treaty"**, oder **FMCT** wie es offiziell heisst, hätten im Mai dieses Jahres beginnen sollen. Anlass für dieses Abkommen ist ein Beschluss der NPT\*)-Verlängerungskonferenz von 1995. Dort wurden ein umfassendes **Atomteststoppabkommen** (Comprehensive Test Ban Treaty, CTBT) und ein **"Cut-Off"-Abkommen** als entscheidende Schritte zur Eindämmung und Kontrolle der nuklearen Proliferation und hin zur weiteren nuklearen Abrüstung erkannt; wortwörtlich wurden

**"ein sofortiger Beginn und früher Abschluss von Verhandlungen über eine nicht diskriminierende und universell anwendbare Übereinkunft über ein Verbot der Herstellung von Spaltmaterial für Kernwaffen oder andere Nuklearsprengkörper"**

mit Nachdruck verlangt.

Es geht also einzig und allein um einen zukünftigen **Produktionsstopp** und **nicht** rückwirkend um eine **Kontrolle** über die vorhandenen **Inventare**, obschon eigentlich beide Aspekte im Sinne einer Proliferationskontrolle untrennbar miteinander verknüpft sind; die Produktion von heute ist morgen Teil des Inventars.

\*) NPT: Non Proliferation Treaty: Kernwaffensperrvertrag

Soviel zum Kontext. Die vorliegende "Hintergrundinformation" befasst sich vorwiegend mit der **technischen Seite** der Problemstellung. Nach dieser Einleitung soll in einem **zweiten** Abschnitt, ausgehend von der Kernwaffentechnologie, erläutert werden, um welche Spaltmaterialien es sich eigentlich handelt. Diese werden dann im **dritten** Abschnitt vertieft betrachtet. Die verschiedenen Verfahren und Techniken zur Produktion dieser Materialien werden zusammen mit Angaben über vorhandene Inventare im **vierten** und **fünften** Abschnitt zusammengestellt. Im **sechsten** Abschnitt wird auf die Problematik der Verifikation und der Kontrolle eines "Cut-Off" eingegangen, bevor im **Schlusswort** das Ganze in einen Zusammenhang mit der eigentlichen Zielsetzung eines "Cut-Off" Abkommens, der erwähnten nuklearen Abrüstung und der Kontrolle der nuklearen Proliferation, gebracht wird. Am Schluss des Dokumentes soll ein **Glossar** der gebräuchlichsten Begriffe dem Leser das Navigieren im "Cut-Off"-Jargon erleichtern (kursiv geschriebene Wörter im Text).

## 2. Spaltmaterial und Kernwaffen \*)

\*) vgl. "ZUM BAU EINER KERNWAFFE...", Hintergrundinformation des ACLS, Juni 1995

Das auszuhandelnde Abkommen kann sich zur Hauptsache auf **zwei Materialien** beschränken, nämlich **Plutonium** und **hochangereichertes Uran**, denn alle Kernwaffen enthalten das eine und/oder andere dieser Materialien und, wichtig, es ist nicht bekannt, dass irgendeinmal irgendein anderes *Spaltmaterial* verwendet worden wäre.

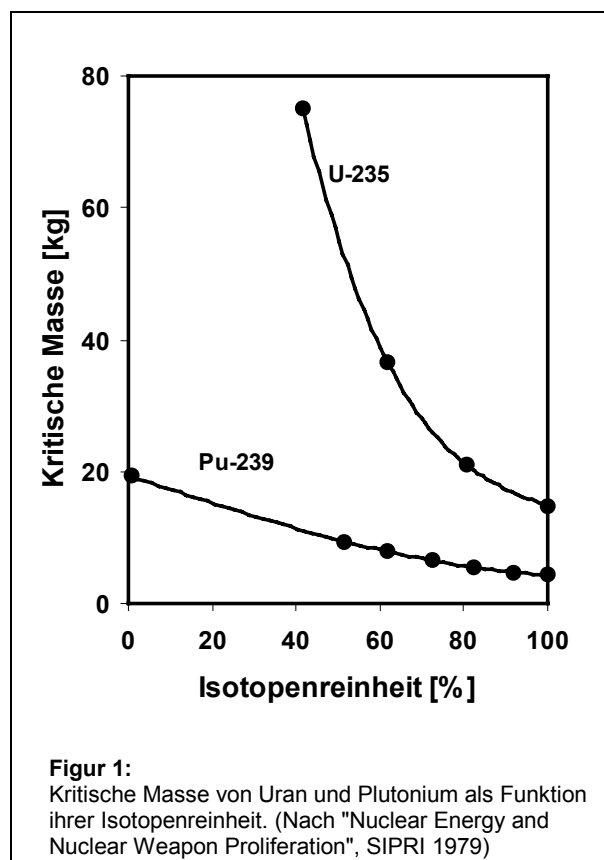
In modernen einstufigen Kernwaffen wird die Energie vorwiegend durch **Spaltung** von schweren Atomkernen, *Plutonium* und/oder *Uran*, erzeugt. In den mehrstufigen Wasserstoffbomben wird die Energie einer Spaltwaffe, dann "primary" genannt, zur Zündung eines thermonuklearen Teils ("secondary") eingesetzt, einer Waffenkomponente, welche ihrerseits die Energie hauptsächlich aus der **Verschmelzung** von Wasserstoffkernen gewinnt.

In einer technologisch nicht sehr hochstehenden Konstruktion einer Spaltwaffe, wie sie beispielsweise ein "Schwellenstaat" verwenden würde, betragen die sogenannten "*signifikanten Mengen*" etwa 8 kg für *Plutonium-239* und etwa 25 kg bei *Uran-235*.

Eine Besonderheit ist, dass die *Isotopenreinheit* bei *Uran* eine wesentlich grössere Rolle spielt als bei *Plutonium*. **Figur 1** gibt Zahlenwerte zur "*kritischen Masse*".

Sie zeigt, dass *Uran* hochangereichert sein **muss**, wenn mit handhabbaren Mengen eine Bombe gebaut werden soll, während bei *Plutonium* auch *Isotopenmischungen*, die wenig bis gar kein Pu-239 enthalten, *waffenfähig* sind, d.h. zur Herstellung von nuklearen Sprengkörpern verwendet werden könnten. Es sind andere Gründe, thermische beispielsweise, vor allem aber die durch die höheren Isotope erhöhte Wahrscheinlichkeit einer Frühzündung bzw. "Verpuffung" des Sprengkörpers, die

die Bombenbauer dazu bewegen, möglichst reines Pu-239 zu verwenden. In einer Kernwaffe muss eine genügende Menge *Spaltmaterials* in einen sogenannten "überkritischen" Zustand gebracht werden, einen Zustand, in welchem eine exponentiell (explosionsartig) anwachsende Kettenreaktion stattfinden kann. In modernen Kernwaffen wird dazu das Implosionsverfahren angewendet. Dabei befindet sich eine Hohlkugel aus *Spaltmaterial*, ein sogenannter "pit" aus *Plutonium* und/oder *Uran*, im Zentrum der Waffe. Durch die Explosion eines sphärisch-symmetrisch um diesen Kern angeordneten Mantels eines konventionellen Sprengstoffs wird der Kern komprimiert und dadurch "überkritisch". Im Verlauf von etwa einer Millionstelsekunde wird dann eine riesige Menge von Kernenergie freigesetzt, äquivalent derjenigen von bis zu Zehntausenden oder gar Hunderttausenden von Tonnen des konventionellen Sprengstoffs TNT.



## 3. Spaltmaterialien

Atome setzen sich aus der elektrisch negativ geladenen Elektronenhülle und dem Atomkern zusammen. Die Atomkerne ihrerseits bestehen ausschliesslich aus elektrisch positiv geladenen und elektrisch neutralen Teilchen, ein merkwürdiges Gebilde, schliesslich wissen wir aus der Schule, dass sich elektrisch gleich geladene Teilchen gegenseitig abstossen. Kernkräfte sorgen für einen gewissen Zusammenhalt. Bei grossen Kernen kann ein Einfluss von aussen, beispielsweise ein Zusammenprall mit einem Neutron, dazu führen,

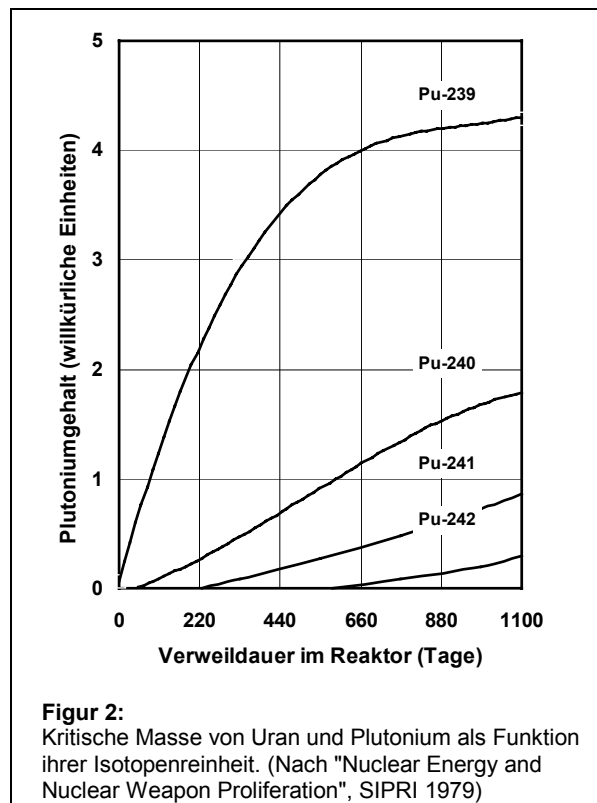
dass sich der Kern unter Freisetzung von Neutronen in zwei oder mehrere Stücke aufteilt. Solche **spaltbare ("fissionable") Materialien** bzw. *Isotope* sind häufig und im Bereich der chemischen Elemente mit Ordnungszahlen 90 und höher zu finden. Die Spaltung setzt Energie frei, welche im wesentlichen in der Bewegungsenergie der auseinanderfliegenden Bruchstücke und in elektromagnetischer Strahlung steckt. Zur Kernenergiegewinnung im grösseren Massstab, sei es kontrolliert und kontinuierlich in einem Kernreaktor oder sei es in Form einer Bombe, reicht die Eigenschaft "spaltbar" noch nicht aus. Erst wenn im Mittel pro Spaltung mehr als ein Neutron freigesetzt wird und zwar Neutronen, deren Energie ausreicht, um einen weiteren Kern zur Spaltung zu bringen, ist eine sogenannte **selbsterhaltende Kettenreaktion** möglich. Spaltbare *Isotope* mit der zusätzlichen Eigenschaft, eine selbsterhaltende Kettenreaktion tragen zu können, werden **Spaltmaterial** bzw. **"fissile material"** oder etwa auch "special nuclear material" genannt. Der englische Sprachgebrauch ist hier ein bisschen präziser als das Deutsche. Die Untergruppe der *"fissiles"* hat wesentlich weniger Mitglieder als die Oberfamilie der *"fissionables"*; für die weiteren Betrachtungen sind bloss noch die *Spaltmaterialien Uran* und **Plutonium** von Interesse und zwar die Isotope **U-235**, **Pu-239** und **Pu-241**. Diese *"fissiles"* sind denn auch von **fundamentaler Bedeutung** im Zusammenhang mit dem "Cut-Off", welcher aber selbstverständlich alle andern exotischeren *"fissiles"* wie beispielsweise Californium (Cf-249 und Cf-251) auch einschliessen würde.

## Uran

1789 isolierte der deutsche Chemiker Klaproth aus Pechblendeproben der Silbermine Joachimsthal in Böhmen das Uranoxid U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. *Uran* wurde während etwa 100 Jahren vorwiegend in Keramikglasuren verwendet; es resultiert ein schönes Orangerot. 1898 entdeckte Marie Curie, dass in der Pechblende auch etwas Strahlendes vorhanden ist, das **Radium** benannt wurde (frz. Strahlung = **radiation**). Die nachfolgend gefundenen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten dieser Substanz, einem Zerfallsprodukt des U-238, machten die Radiumextraktion finanziell interessant, das Uranmineral hingegen landete im Abfall. Mit der Entdeckung der Kernspaltung im Jahre 1938 und der damit verbundenen Möglichkeit mit "Uranmaschinen" Energie zu gewinnen, änderte sich dies. 1995 betrug die Weltjahresproduktion an U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, auch "yellowcake" genannt, rund 30'000 Tonnen. Dieser "yellowcake" ist Ausgangsprodukt sowohl für militärische als auch für zivile Anwendungen im nuklearen Bereich. Es gibt Typen von Kernreaktoren, die sich mit *Natururan* betreiben lassen, auch wenn der Anteil des "fissilen" U-235 bloss 0.7% beträgt. Für die meisten Reaktortypen, erst recht aber für Bombenzwecke reicht diese Konzentration nicht aus; *Anreicherung* ist angesagt (vgl. Abschnitt 4.2).

## Plutonium

*Plutonium*, und zwar das Isotop *Plutonium-239*, entsteht wenn sich an einem Kern des *Uranisotop-238* ein Neutron anlagert. Dies ergibt zunächst einen U-239-Kern, welcher sich rasch über zwei Zwischenschritte zu Pu-239 umwandelt. In grossem Stil geschieht solches in Kernreaktoren, in welchen Urankerne mit Neutronen beschossen werden oder, vornehmer ausgedrückt, einem intensiven Neutronenfluss ausgesetzt sind. Diese Kernreaktoren nennt man **Kernkraftwerke**, wenn dabei die Energieproduktion das primäre Ziel ist und das täglich in Gramm-Mengen entstehende *Plutonium* (auch in Schweizer Kernkraftwerken!) als "Abfallprodukt" betrachtet wird. Die Anlage wird **Plutoniumfabrik** genannt, wenn das hauptsächliche Ziel die Plutoniumproduktion zu militärischen Zwecken ist und die dabei anfallende Energie eine Nebenerscheinung. Die Unterschiede sind graduell. Je nachdem nun, wie lange das in den Brennstäben enthaltene *Uran* im Kernreaktor mit Neutronen beschossen wird und je nach Dichte des Neutronenflusses, bilden sich unterschiedliche Mengen von **Plutonium-239** und von diesem Pu-239 aus durch Anlagerung von weiteren Neutronen die höheren *Plutonium-Isotope Pu-240*, **Pu-241** usw. Das Ganze wird kompliziert durch die Tatsache, dass das Pu-239 von den Neutronen auch gespalten werden kann, so dass in Kernkraftwerken gegen Ende der Verweilzeit eines Brennstabs im Reaktor etwa gleichviel Pu-239 durch diese Prozesse zum Verschwinden gebracht wird, wie durch Neutronenanlagerung am U-238 neu entsteht. Der Pu-239-Gehalt bleibt dann fast konstant, der Gehalt an höheren Plutonium-Isotopen nimmt noch immer zu (vgl. **Figur 2**).



Diese höheren Isotope sind für Waffenzwecke unerwünscht, deshalb wird in den Plutoniumfabriken die Verweilzeit im Reaktor so optimiert, dass zwar Plutonium-239 in nennenswerten Mengen entsteht, der Gehalt an Pu-240 aber maximal bloss etwa 6% beträgt.

## 4. Die Produktion von Spaltmaterial

### Der nukleare Brennstoffkreislauf und die Kernwaffe

Das Rohmaterial ist Uranerz, aus welchem meistens an Ort und Stelle das **Natururan** in Form des "yellowcake" ( $U_3O_8$ ) extrahiert wird. Die **Figur 3** zeigt schematisch den weiteren Weg des Urans beziehungsweise des entstehenden Plutoniums im sogenannten nuklearen Brennstoffkreislauf.

### Uran in Waffenqualität (WGU)

#### Anreicherungsverfahren

Das Gasdiffusionsverfahren und die Anreicherung durch Gaszentrifugen sind die heute im industriellen Massstab hauptsächlich verwendeten Techniken, um die Konzentration des *fissilen* U-235 zu erhöhen. In beiden wird der Massenunterschied (3 Neutronen pro Kern) ausgenutzt, um die beiden *Isotope* U-235 und U-238 zu trennen. Vorerst wird das Endprodukt des Bergbaus, das pulverförmige  $U_3O_8$  auf chemischem Weg in das Gas Uranhexafluorid ( $UF_6$ ) umgewandelt.

Bei der **Gasdiffusion** trifft das leichtere und beweglichere Molekül ein bisschen häufiger auf Wände des Behälters und hat damit die ein bisschen grössere Wahrscheinlichkeit durch eine leicht permeable Membran hindurch zu diffundieren.

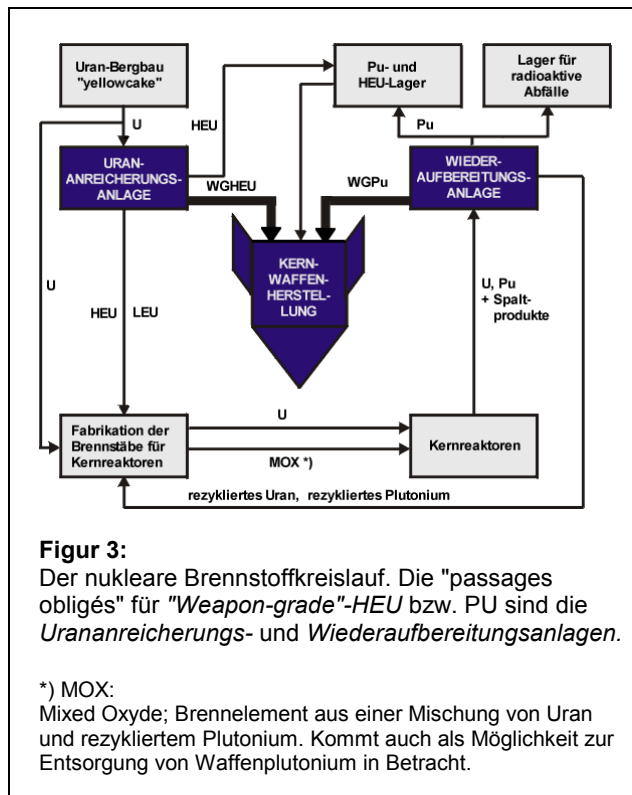
Bei der **Zentrifuge** wird das schwerere Molekül rascher an die Aussenwand des rotierenden Behälters gedrängt, die Konzentration der leichteren Moleküle wird gegen das Zentrum des Behälters etwas grösser.

Beim **aerodynamischen** Verfahren, von Brasilien und Südafrika bevorzugt, wird ein schneller Gasstrom um eine scharfe Kurve auf eine Weggabelung geführt. Dabei hat das leichtere Molekül die etwas grössere Chance, die Kurve auf der Innenbahn zu erwischen. In diesem Zweig ist dann die U-235 Konzentration etwas höher als auf der Aussenbahn.

Verschiedenerorts wurden und werden weitere Anreicherungsverfahren untersucht, modern ist das Laser-Isotopentrennverfahren, "uralt" das elektromagnetische aus den vierziger Jahren, welches klammheimlich vom Irak (fast) zur industriellen Reife gebracht wurde.

Bei all diesen Verfahren wird das in einer ersten Stufe um einen kleinen Betrag angereicherte

Uranhexafluoridgas in eine grosse Anzahl weiterer Stufen geführt. Man spricht dabei von Anreicherungskaskaden. Alle diese Verfahren sind technisch sehr anspruchsvoll und aufwändig; industrielle Anlagen haben Fabrikgrösse und verschlingen riesige Mengen an Energie; Bau und Betrieb sind entsprechend teuer.



**Figur 3:**

Der nukleare Brennstoffkreislauf. Die "passages obligés" für "Weapon-grade"-HEU bzw. PU sind die Urananreicherungs- und Wiederaufbereitungsanlagen.

\*) MOX:

Mixed Oxide; Brennelement aus einer Mischung von Uran und rezykliertem Plutonium. Kommt auch als Möglichkeit zur Entsorgung von Waffenplutonium in Betracht.

### Anreicherungsgrade

Niedrig angereichertes Uran mit einer U-235 Konzentration von weniger als 20 Prozent wird **Low-Enriched Uranium** oder **LEU** genannt. Dieses Uran ist für Kernspaltungswaffen ohne Bedeutung. Höhere Anreicherungsgrade als 20 Prozent werden als **Highly Enriched Uranium** oder **HEU** bezeichnet und spielen sowohl im zivilen Bereich, bei Forschungs- und Schiffsreaktoren, vorwiegend aber im militärischen Bereich eine Rolle. Mit **Anreicherungen** zwischen 20% und 90% trifft man dort **HEU** vorwiegend in Antrieben von Unterseebooten. Auf über 90% angereichertes **HEU** wird als **Waffenqualität (WGU)** bezeichnet und findet sowohl in reinen Spaltwaffen wie auch in den "primaries" und "secondaries" von Wasserstoffbomben, nebst dem Fusionsbrennstoff, Verwendung.

### Produktion von WGU (vgl. Tabelle 1)

1996 hat Frankreich als letzter Kernwaffenstaat die Produktion von **HEU** in **Waffenqualität** eingestellt. Weltweit gibt es heute von diesem **WGU** knapp **1700 Tonnen**. Von den inoffiziellen Kernwaffenstaaten, Indien, Israel und Pakistan, hat Pakistan, dessen Kernwaffen auf **Uran** beruhen, nach eigenen Aussagen im Jahre 1991 einen Produktionsstopp beschlossen. Das Land wäre aber weiterhin in der Lage, dieses Material in Mengen von 10-50 kg/Jahr herzustellen. Es wird allgemein angenommen, dass

**Israel** und **Indien**, deren Kernwaffenprogramme zwar auf **Plutonium** basieren, auch über **Urananreicherungs**möglichkeiten verfügen, allerdings geringerer Leistungsfähigkeit als diejenigen Pakistans. Ob damit auch **HEU** in **Waffenqualität** hergestellt wird, beispielsweise für eine Anwendung in Kernwaffen höherer Technologie oder zur

Verwendung in Schiffsreaktoren ist nicht bekannt. Damit ist klar und eindeutig, dass von einem Verbot der Produktion von **HEU** ausser heimlichen Proliferanten vor allem Pakistan betroffen wäre, denn kein anderer Staat stellt hochangereichertes Uran (mehr) her.

Land	HEU *) in Waffenqualitätsäquivalent		Plutonium in Waffenqualität (WGPu)	
	Inventar	Produktionsstand	Inventar	Produktionsstand
USA	635 t	Eingestellt 1964	100 t	Eingestellt 1988
Russland (R)	970 t	Eingestellt 1988	130 t	*)
GB	15 t	Eingestellt 1963	7.6 t	Option offen **)
Frankreich (F)	24 t	Eingestellt 1996	5 t	Eingestellt 1992
China (CHN)	20 t	Eingestellt 1989	4 t	Eingestellt 1991
<b>Total Kernwaffenstaaten</b>	<b>ca. 1664 t</b>	---	<b>ca. 246.6 t</b>	---
Indien	---	---	310 kg	Produktion dauert fort
Israel	---	---	510 kg	Produktion dauert fort
Pakistan	690 kg	Eingestellt 1991	5 kg	---
<b>Total "de-factos"</b>	<b>ca. 690 kg</b>	---	<b>ca. 825 kg</b>	---
Nordkorea	---	---	30-40 kg	Eingefroren
Südafrika	(ca. 400 kg)	Unter IAEA-Safeguards	---	---

**Tabelle 1:**  
Inventar an HEU und Plutonium in Waffenqualität; Stand 2000

\*) Aus wirtschaftlichen Gründen (Wärme- und Elektrizitätsproduktion) werden noch drei der ehemals 13 russischen Plutonium-Fabriken betrieben. Das entstehende Pu wird nicht für Waffenzwecke verwendet (bilaterale Vereinbarung mit den USA).

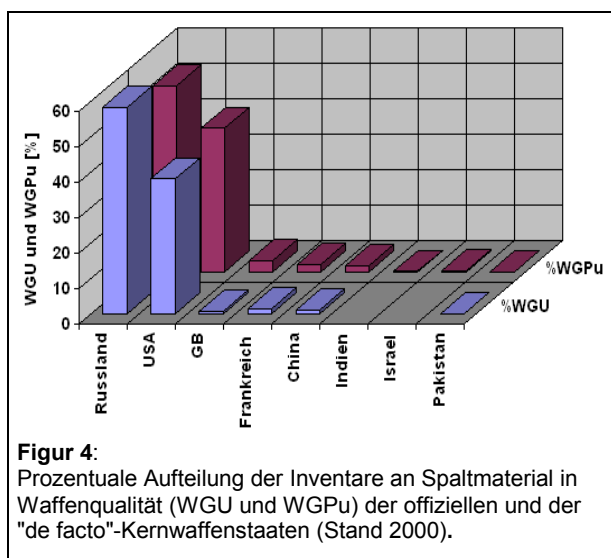
\*\*\*) Die noch in Betrieb stehenden Plutonium-Fabriken sind seit 1964 vorwiegend für die Elektrizitätsproduktion optimiert.

Quelle: Institute for Science and International Security

## 5. Die Inventare an Spaltmaterial in Waffenqualität

In der **Tabelle 1** sind Zahlenangaben über das aktuelle Inventar an **Spaltmaterial** in **Waffenqualität** bei den offiziellen Kernwaffenstaaten, den "de facto"-Kernwaffenstaaten und bei den Schwellenmächten Nordkorea und Südafrika zusammengestellt. Alle Angaben über **HEU** sind in **Waffenqualitätsäquivalenz** umgerechnet. Diese Zahlen sind Schätzungen, die anhand von nicht klassifizierten Unterlagen erarbeitet wurden und dementsprechend mit beträchtlichen Unsicherheiten (von  $\pm 10\%$  bis  $\pm 30\%$  und mehr) behaftet sind.

Die aus der **Tabelle 1** abgeleitete **Figur 4** stellt das trockene Zahlenmaterial in Prozenten der jeweiligen Gesamtmenge graphisch dar. Die "Balkenanteile" widerspiegeln auch in etwa die Größenverhältnisse der jeweiligen Nukleararsenale.



**Figur 4:**  
Prozentuale Aufteilung der Inventare an Spaltmaterial in Waffenqualität (WGU und WGPu) der offiziellen und der "de facto"-Kernwaffenstaaten (Stand 2000).

Ein Teil dieser Inventare befindet sich in den einsatzbereiten Kernwaffen, der Rest ausserhalb. **Tabelle 2** liefert hierzu Zahlen. Von diesem "Rest", es handelt sich nota bene um rund drei Viertel des Gesamtinventars, stecken geringe Mengen in Reservewaffen oder werden für Unterhalts- und Ersatzzwecke sowie für den Betrieb von Schiffsreaktoren oder für Forschungszwecke benötigt. Der Löwenanteil jedoch ist **Überschuss**.

Die grossen Überschüsse, vor allem bei den USA und Russland sind unter anderem auch eine direkte Folge der in den START-Verträgen ausgehandelten Abrüstungsmassnahmen. Zwangsläufig stellt sich hier auch die Frage nach Weiterverwendung bzw. Entsorgung dieser Spaltmaterialien.

Beim **WGU** ist die Entsorgung relativ einfach. **HEU** kann zu **LEU** "verdünnt" werden, was im Grunde genommen nichts anderes bedeutet, als die vorgängig mit grossem Aufwand durchgeführte Isotopentrennung wieder rückgängig zu machen. Anschliessend kann dieses **LEU** in zivilen Kernreaktoren zur Energieproduktion verwendet werden. So haben beispielsweise die USA von Russland 500 Tonnen **HEU** gekauft und bringen dieses nun in Tranchen von vorerst 10 Tonnen, später 30 Tonnen pro Jahr auf den Weltmarkt.

Für die proliferationssichere Entsorgung von **WGPU** ist noch keine befriedigende technische Lösung vorhanden. Zur Zeit werden verschiedene **Entsorgungswege** geprüft. Vorgeschlagen werden beispielsweise die unterirdische Endlagerung eines verglasten Gemisches aus **WGPU** und hochradioaktiven Abfällen aus Aufbereitungsanlagen und die Weiterverwendung von **WGPU** im Brennstoffkreislauf zur Energieerzeugung (**Mixed Oxyde** oder **MOX-Technologie**).

Aufteilung	USA	R	F	CHN	GB	Total
in den Sprengköpfen						
<b>WGPU</b>	31	35	2	2	1	70
<b>WGU</b>	202	225	11	10	4.5	450
ausserhalb der Sprengköpfe						
<b>WGPU</b>	54	96	3	2	2	160
<b>WGU</b>	443	825	13	10	3.5	1300

**Tabelle 2:** Inventar an Spaltmaterialien in Sprengköpfen und ausserhalb der Sprengköpfe (in Tonnen); (Stand 1996).

Die Zahlenwerte beruhen auf der Annahme, dass ein nuklearer Sprengkopf im Mittel etwa 3.5 kg **WGPU** und 22.5 kg **WGU** enthält.

Quelle: Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996, World Inventories, Capabilities and Policies: D. Albright et al., SIPRI 1997

## 6. Die Verifikationsproblematik

Ziel der Verifikationsmassnahmen eines "Cut-Off" ist es sicherzustellen, dass **ab Datum des Inkrafttretens** bei keiner der Vertragsparteien irgendwo, irgendwie und irgendwann Spaltmaterial für Kernwaffen oder für andere nukleare Sprengkörper produziert wird.

Aufgrund der bisherigen Ausführungen scheint diese Zielsetzung zumindest vom technischen Standpunkt her einfach zu erreichen. Die "passages obligés" für die Herstellung von waffentauglichem Spaltmaterial sind (vgl. **Figur 3**) einerseits die

### **Anreicherungsanlagen für U-235 und andererseits die Wiederaufbereitungsanlagen zur Gewinnung von Plutonium**

sowohl im **militärischen** wie auch im **zivilen** Bereich der betroffenen Länder. Stehen diese Anlagen und ihre Produkte unter geeigneten Kontrollen, so ist sichergestellt, dass nur für friedliche Zwecke **Uran** angereichert wird und es wird auch verhindert, dass aus dem Brennstoffkreislauf für Waffenzwecke **Plutonium** abgezweigt werden kann.

Dass geeignete Kontrollmassnahmen existieren, beweisen die "Safeguards" der IAEA bei den **Nicht-Kernwaffenstaaten des NPT**, die genau die gleiche Zielsetzung verfolgen. Es erschien also logisch und sinnvoll, die IAEA mit einer allfälligen "Cut-Off"-Verifikation zu beauftragen.

Es gälte dann, solche "Safeguards" und die dazugehörigen Inspektionsprozeduren, auf der Basis beispielsweise des neuen erweiterten und verschärften "Safeguardsprogramms 93+2" der IAEA, auch **bei den Kernwaffenstaaten** und **vor allem** bei den de-facto Kernwaffenstaaten **Israel, Indien und Pakistan** einzuführen. Dabei wären sowohl die wenigen noch im Betrieb stehenden und insbesondere die abgestellten **militärischen Anreicherungs- und Wiederaufbereitungsanlagen**, als auch die zahlreichen **zivilen** derartigen Einrichtungen dieser internationalen Kontrolle zu unterziehen. Diese "Safeguards" sollten zudem ermöglichen, mit ähnlichen Inspektionsprozeduren, wie sie die CWC (Chemical Weapons Convention) vorsieht, "heimlich" betriebene Anlagen eventueller Proliferanten aufzuspüren. Stichwort Irak!

Auf den ersten Blick gesehen ist diese Verifikation eine technisch einfache, ja erprobte Sache. Die Sache hat jedoch einen Haken; sie ist mit **einem gewaltigen Aufwand** verbunden. Experten schätzen, dass eine umfassende "Cut-Off"-Verifikation eine Verdoppelung bis Verdreifachung des ohnehin bereits enormen Safeguardsaufwands der IAEA bei den Nicht-Kernwaffenstaaten des NPT zur Folge hätte. Sollen diese Kosten von allen Vertragsparteien getragen werden oder nur von den

Kernwaffenstaaten, die ja den grössten Teil des zusätzlich nötigen Aufwands verursachen? Dies wäre jedoch schwer mit der angestrebten Universalität des Vertrages in Einklang zu bringen. Oder soll die Kontrolle bestimmter Bereiche regionalen Organisationen wie EURATOM, MINATOM etc. übertragen werden?

Die "Cut-Off"-Verhandler werden aber noch weitere harte Nüsse zu knacken haben. Im Geiste des einleitend erwähnten NPT-Beschlusses – **nukleare Abrüstung und Non-Proliferation** – steht zu erwarten, dass die Forderung nach dem Einbezug der Überschüsse oder gar des gesamten Inventars an *Spaltmaterial in Waffenqualität* in die "Cut-Off"-Verifikation auf den Verhandlungstisch gelegt wird\*). Weiter könnte auch verlangt werden, dass nicht nur die *Anreicherungs- und Aufbereitungsanlagen*, sondern der gesamte **zivile und militärische** nukleare Brennstoffkreislauf nach den Spielregeln des NPT kontrolliert wird. Ob dies möglich, sinnvoll und vor allem, ob so etwas bezahlbar ist, werden die Verhandlungen zeigen.

Dazu wird es noch ein paar Sonder-"Safeguards"-Fragen zu regeln geben:

Sie betreffen **einerseits** die Produktion von *HEU* für die speziellen Kernreaktoren der atomar getriebenen Schiffe und Unterseeboote ("naval reactors"). Dies tangiert weniger die Kernwaffenstaaten, die über genügend Reserven verfügen, als möglicherweise die "de-factos". Ob Anträge für eine "Ausnahme"-klausel für diese *HEU*-Anwendung Zustimmung finden werden, scheint fragwürdig. Russland und Frankreich haben nämlich bereits bewiesen, dass mit *LEU* beladene Reaktoren anderer Technologie auch für den Antrieb von Schiffen verwendet werden können. **Zum andern** geht es um die Tatsache, dass die Verifikationsprozeduren Anlagen und Bereiche betreffen werden, in welchen sich auch militärisch sensitive, kernwaffenbezogene Aktivitäten abspielen, welche mit Sicherheit einer internationalen Kontrolle vorenthalten werden. Man stelle sich nur vor, wie Israel auf die Ankündigung einer internationalen Inspektion ihrer Plutoniumfabrik in Dimona reagieren würde, an welcher beispielsweise iranische Inspektoren teilnahmen. Ganz allgemein kann ein erhöhter Widerstand, von Seiten der Kernwaffenstaaten und den "de-factos", gegen zu weitgehende Kontrollen erwartet werden, weil gerade diese Staaten bisher, sei es als NPT-Kernwaffenstaaten oder als Nicht-NPT-Mitglieder, keinerlei Kontrollzwang unterstellt waren.

**Zum Schluss** müsste auch noch die Problematik der *Tritium*-Produktion angesprochen werden. *Tritium* ist zwar kein Spaltmaterial, mithin also vom "Cut-Off" nicht betroffen, ausser vielleicht, dass es vorwiegend in mit *HEU* betriebenen Kernreaktoren produziert wird. In modernen Kernwaffen ist jedoch *Tritium* eine unverzichtbare Komponente. Ein Verbot der Produktion dieses Materials wäre – ganz im Sinn und (Abrüstungs-)geist eines "Cut-Off" –, sowohl eine echte Massnahme gegen die vertikale

Proliferation\*\*), wie auch eine überaus wirksame Abrüstungsmassnahme, *Tritium* zerfällt nämlich mit einer Halbwertszeit von 12.3 Jahren zu Helium. In Kernwaffen wirkt sich dieser *Tritium*-Verlust von etwa 5% pro Jahr negativ auf die Funktionstüchtigkeit der Waffe aus. Ein *Tritium*-"Cut-Off" würde somit sukzessive zu einer dauernden Reduktion der Effizienz der Kernwaffenarsenale führen. Ob die Kernwaffenstaaten bereit sind, überhaupt über die *Tritium*-Thematik, geschweige denn über einen *Tritium*-"Cut-Off" zu sprechen, darf bezweifelt werden.

\*) Dazu ist zu bemerken, dass die breite Palette von Konzentrationen und Anwendungsmöglichkeiten Aussagen über Standorte und Vorräte an HEU heillos schwierig macht, besonders im tieferen Anreicherungs-bereich, der mit vergleichsmässig geringerem Aufwand zu WGU weiter angereichert werden könnte.

\*\*) vertikale Proliferation: qualitative Verbesserung und quantitative Vergrösserung des Nukleararsenals eines Kernwaffenstaates

## 7. Schlusswort

Ein "Cut-Off", der die Hunderte von Tonnen an Vorräten "*Weapon-Grade*"-Spaltmaterials der kernwaffenbesitzenden Staaten nicht in Betracht zieht, ist schon lange nicht mehr der **Abrüstungsvertrag**, als der er einst gedacht war. Indem er jedoch eine weitere (nach dem CTBT) **internationale und nicht diskriminierende** Norm schaffen würde, welche den bei der NPT-Verlängerungskonferenz von 1995 formulierten Anforderungen der Weltgemeinschaft entspricht, stellt er einen wichtigen und sinnvollen Schritt in Richtung einer besseren Kontrolle der Entwicklung zukünftiger Kernwaffenprogramme und gleichzeitig durch die erreichte Transparenz die Grundlage für weitere nukleare Abrüstungsmassnahmen dar.

Das Schwergewicht eines "Cut-Off" liegt jedoch auf der Kontrolle der nuklearen **Proliferation**, indem er die vielleicht einzige Möglichkeit bietet, die Nuklearprogramme der "unsufficiently safeguarded nations" (Indien, Israel und Pakistan) unter Kontrolle zu bringen und allenfalls zu stoppen.

Der Preis dafür ist aber

**die Anerkennung des Besitzes von "unsafeguarded" Spaltmaterial in Waffenqualität und dadurch die implizite Legitimierung ihrer Kernwaffenprogramme dieser Staaten.**

Die grosse Schwäche des auszuhandelnden Abkommens ist, wie bereits erwähnt, die Tatsache, dass nur über die Produktion und nicht über die bestehenden Inventare verhandelt werden soll. Obschon also formell nicht diskriminierend, kann deshalb das "Cut-Off" Abkommen von denjenigen Nationen als diskriminierend empfunden werden, die nur über geringe Vorräte an *Spaltmaterial*

(gesamthaft 1 Tonne) verfügen. Für diese bedeutet ein "Cut-Off" eine echte Einschränkung ihrer nuklearen Option, verglichen mit den "wohlhabenden" Kernwaffenstaaten, für welche der "Cut-Off" angesichts der gewaltigen Vorräte (ca. 2'000 Tonnen) nicht viel mehr als eine schmerzhaft Alibi-Übung darstellt. Schmerzhaft wäre für sie der "Cut-Off" deshalb, weil erstmalig ein Teil ihrer vorher geheimen militärischen Kernwaffenaktivitäten einer internationalen Kontrolle unterzogen würde, was einen nicht zu unterschätzenden Angriff auf bisher unangetastete nukleare Privilegien darstellt.

Zusammenfassend lassen sich die **Hauptfragen** im Zusammenhang mit dem "Cut-Off" wie folgt stellen und beantworten:

▪ **Ist ein "Cut-Off" technisch realisierbar und verifizierbar?**

Ohne Zweifel JA, auf der technischen Grundlage der bereits bei den Nichtkernwaffenstaaten des NPT wirksamen safeguards der IAEA. Grundsätzlich könnten die Verifikationsprozeduren auf die *Urananreicherungs- und die Wiederaufbereitungsanlagen* beschränkt werden. Weitere Optionen wären die Überwachung des gesamten nuklearen Brennstoffkreises und/oder die Kontrolle der weltweiten Vorräte an *WGU/WGPu*.

▪ **Ist ein "Cut-Off" über alles gesehen eine komplexe Angelegenheit?**

Die vielfältigen politischen Implikationen machen den "Cut-Off" zu einer komplexen Angelegenheit; kompliziert wäre die Sache im Grunde genommen nicht.

▪ **Ist ein "Cut-Off" eine teure Sache?**

Mit Sicherheit JA. In Anbetracht der grossen Anzahl und der Vielseitigkeit der zu kontrollierenden Anlagen wäre ein "Cut-Off" sehr aufwändig. Je nach Umfang der Verifikationsmassnahmen ist mit einer Verdoppelung bis Verdreifachung des bisherigen NPT-Safeguards-Aufwands zu rechnen.

▪ **Kann mit einem raschen Beginn und frühen (erfolgreichen) Abschluss der "Cut-Off"-Verhandlungen gerechnet werden?**

Mit Bestimmtheit NEIN; zu sehr werden auf der einen Seite die Privilegien der Kernwaffenstaaten und auf der anderen Seite die Handlungsfreiheit der "de-factos" dadurch tangiert. Von "sofortigem Beginn und frühem Abschluss" ist auch zwei Jahre nach Abschluss der NPT-Verlängerungskonferenz nicht die Rede. Im Gegenteil: an der Genfer Abrüstungskonferenz konnten sich die betroffenen Staaten nicht einmal dahingehend einigen, die Aufnahme der Verhandlungen auf die 97'er Agenda zu setzen.

**Eine schlechte, enttäuschende Nachricht für die überwältigende Mehrheit auf diesem Planeten, die auf konkrete Schritte hofft hin zu einer kernwaffenfreien Welt**

## 8. Glossar

### **Anreicherung**

*Erhöhung der Konzentration eines Isotops, hier wichtig für U-235, dessen Konzentration von den geringen 0.7% im Natururan für Waffenzwecke auf ca. 90% oder mehr erhöht werden muss.*

### **Anreicherungsanlage**

*Anlage, in welcher eines der vielen bekannten Verfahren zur Anreicherung von U-235, wie Gasdiffusion, Gaszentrifuge, Laser, Aerodynamische Verfahren und andere mehr, verwendet wird.*

### **Brutmaterial (fertile material)**

*Isotope, die auf den Beschuss mit Neutronen nicht mit einer Spaltung reagieren, sondern ein zusätzliches Neutron im Kern anlagern und damit (über Zwischenstufen) zu Spaltmaterial werden.*

Beispiele:

Uran U-238 → U-239 → Np-239 → **Pu 239** oder  
Thorium Th-232 → Th-233 → Pa-233 → **U-233**

### **Halbwertszeit**

*Zeit, nach welcher die Hälfte der Anzahl Kerne eines instabilen Isotops eine Umwandlung durchgemacht hat. Diese Zeit ist charakteristisch für das Isotop und von Isotop zu Isotop verschieden.*

### **HEU (Highly Enriched Uranium)**

*Bezeichnung für Uran mit einem Gehalt von U-235 von mehr als 20% zur Verwendung in speziellen Schiffs- und Forschungsreaktoren und vor allem zur Verwendung in Waffen (mit einem Gehalt von über 90%).*

### **Isotope**

*Chemisch kaum unterscheidbare Atome ein und desselben Elements, also mit gleichviel Protonen im Atomkern, die sich aber in der Anzahl Neutronen und damit in ihrer Masse und in den meisten Fällen auch in ihren kernphysikalischen Eigenschaften unterscheiden. Isotope sind entweder stabil oder instabil, d.h. radioaktiv.*

### **Kritische Masse**

*Minimale Menge eines Spaltmaterials, in welcher eine selbsterhaltende Kettenreaktion ablaufen kann. Der Zahlenwert hängt vom Isotop, von dessen chemischen Form, Dichte und Konzentration, von der geometrischen Anordnung sowie bei der Bombenkonstruktion vom Vorhandensein bzw. Fehlen eines Neutronenreflektors ab.*

### **LEU (Low-Enriched Uranium)**

Angereichertes Uran mit einem U-235 Gehalt zwischen 0.7% und 20% zur Verwendung in Kernreaktoren.

### **Plutoniumisotope**

Plutonium ist in allen seinen Erscheinungsformen radioaktiv. Plutoniumisotope gibt es etwa ein Dutzend, im Kernwaffenkontext interessieren die Isotope Pu-239, Pu-240, Pu-241 und Pu-242. Praktisch alles Plutonium ist anthropogen, also von Menschenhand produziert; "natürlich" kommt Pu-239 in winzigen Spuren in Uranlagerstätten vor. Dies der Vollständigkeit halber. Mehr dazu in "[PLUTONIUM](#)", Hintergrundinformation des ACLS, Nov. 1994.

### **Radioaktive Isotope**

Instabile Isotope, die eine Kernumwandlung durchmachen und sich unter Aussendung von Strahlung in ein (eventuell wiederum instabiles) Isotop eines anderen Elements umwandeln.

### **Signifikante Menge**

Zahlenwerte für die Menge von Spaltmaterial, die gemäss der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) ein Staat für die Herstellung seines ersten nuklearen Sprengkörpers benötigen würde. Dies sind 8 Kilogramm bei Pu-239, bzw. 25 Kilogramm bei U-235.

### **Spaltmaterial (fissile material)**

Isotope schwerer Elemente, die durch Beschuss mit Neutronen irgendwelcher kinetischer Energie dazu angeregt werden in zwei (oder mehr) Teile zu zerfallen und dabei Energie und – hier wichtig – im Mittel mehr als ein Neutron pro Spaltung freisetzen. In solchen Materialien sind demzufolge selbsterhaltende Kettenreaktionen möglich. Wichtigste Vertreter der "Familie" Spaltmaterial sind U-235, Pu-239 und Pu-241. Möglich wäre auch U-233, welches aber unseres Wissens nie zur Herstellung von Waffen verwendet wurde.

### **Spaltbares Material (fissionable material)**

Isotope schwerer Elemente, die durch Beschuss mit Neutronen oberhalb einer bestimmten Schwellenergie zur Spaltung und damit (auch in Bomben) zur Energiefreisetzung gebracht werden. Der wichtigste Vertreter dieser Familie, das U-238, emittiert pro Spaltung im Mittel weniger als ein Neutron mit genügend hoher Energie um weitere Spaltungen auszulösen. Damit ist in U-238 keine selbsterhaltende Kettenreaktion möglich.

### **Spaltprodukte**

Die aus der Spaltung eines Atomkerns hervorgegangenen Kernbruchstücke, selber radioaktive Isotope eines anderen chemischen Elements.

### **Tritium**

Wasserstoffisotop, bei welchem der Kern aus einem Proton und zusätzlich zwei Neutronen besteht. Tritium ist radioaktiv d.h. der Kern wandelt sich um, sendet ein Elektron aus und wird zu einem Helium-Kern. Diese Umwandlung geschieht derart, dass nach einer Zeit von 12.3 Jahren nur noch die Hälfte der ursprünglichen Menge vorhanden ist. Tritium ist einerseits ein Material mit verschiedenen Anwendungen im zivilen Sektor, andererseits, obschon kein Spaltmaterial, eine für den Bau moderner Kernwaffen unverzichtbare Komponente.

### **Uranisotope (Natururan)**

Das in der Natur recht häufige Uran (so häufig wie Zinn) hat die Ordnungszahl 92 (92 Protonen) und setzt sich aus den drei Isotopen U-238 (99,3%), U-235 (0.7%) und (einem Hauch) U-234 (0.005%) zusammen. Diese Uranisotope sind an sich instabil, sie haben aber so lange Halbwertszeiten, dass man sie schon fast als stabil bezeichnen kann. Der Zerfall des natürlichen U-238 ist nebenbei gesagt die Quelle des Radonproblems. Weitere Uranisotope (z.B. U-233) können künstlich produziert werden.

### **Waffenqualität (engl. "Weapon Grade" oder "WG")**

Bezeichnung für die für Waffenzwecke am besten geeignete Isotopenreinheit des Spaltmaterials. Dies sind über 90% für U-235 (**WGU**) und über 93% für Pu-239 (**WGPu**). Die Zahlenwerte sind mehr oder weniger willkürlich.

### **Waffenqualitätsäquivalenz für HEU (weapon-grade Uranium equivalent oder WGU-equivalent)**

Diejenige Menge auf eine U-235-Konzentration von 93% angereicherten Urans (HEU in Waffenqualität), die aus HEU verschiedener Anreicherungsgrade hätte produziert werden können. Beispiel: 4.5 Kilogramm 20%-iges sind einem Kilo 90%-igem äquivalent.

### **Waffenfähige Spaltmaterialien**

Schwammiger Begriff, da sich Kernwaffen auch mit Spaltmaterialien in "Nicht-Waffenqualität" (z.B. Reaktorplutonium) bauen lassen, eine Option, die jedoch von keinem Staat je ergriffen wurde.

### **Wiederaufbereitungsanlage**

Anlage zur Abtrennung des in Brennstäben eines Kernreaktors entstandenen Plutoniums vom restlichen Uran und vor allem von den hochradioaktiven Spaltprodukten.

### **WGU, WGPu**

Abkürzungen für Uran bzw. Plutonium in Waffenqualität (Weapon Grade).

Die Autoren: B. Anet, M. Keller