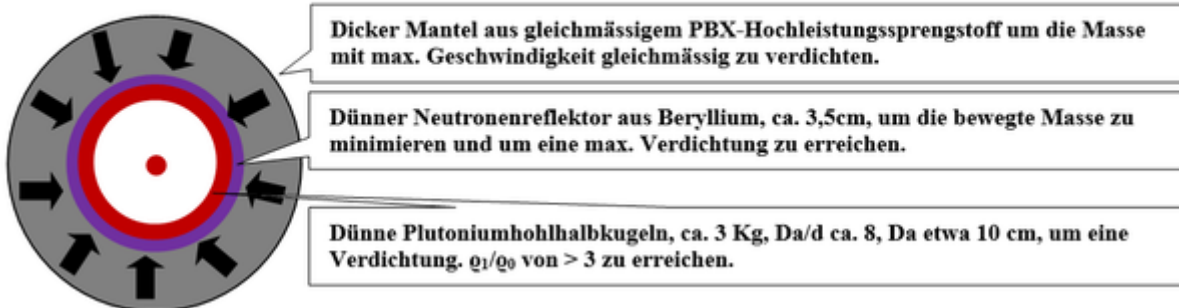


Weshalb man aus dem Plutonium kommerzieller LWR-Kernkraftwerke keine Atombomben bauen kann

Kernsprengkörper zur Nutzung von Reaktorplutonium



Zusammenfassung

- Aufgrund des schnellen Zerfalls von Pu238 müsste der Plutoniumkern der Anordnung spätestens nach jeweils 6 Monaten wieder aufbereitet, eingeschmolzen und neu vergossen werden.
- Aufgrund der großen Wärmeentwicklung müsste der vernickelte Plutoniumkern des Kernsprengkörpers separat in Wasser gelagert werden und die Bombe erst wenige Stunden vor dem Einsatz zusammen gebaut werden.
- Die sehr hohe Rate an Spontanspaltungen höherer Aktinide führen mit sehr großer Wahrscheinlichkeit zu einer frühen Frühzündung mit nicht berechenbarer, wahrscheinlich geringer Wirkung.
- Das Vergießen (Schleuderguss) und die Bearbeitung des Plutoniumkerns muss aufgrund der hohen Strahlung des Reaktorplutoniums in Glove-Boxen erfolgen.

Ökologische Atomexperten hatten regelmäßig behauptet das man mit dem Plutonium aus der Wiederaufbereitung von Kernbrennstoff aus kommerziellen KKW-Kernwaffen bauen kann. Dies war Teil der Begründung des ex. BMU Trittin die Wiederaufbereitung in Deutschland zu verbieten. Der reale Grund war wohl eher das die Wiederaufbereitung der sehr populären Ökosaga der "Ungelösten Endlagerfrage" im Weg stand.

Beispielsweise hat der grüne IANUS 1/1989 "Bericht zur Waffentauglichkeit von Reaktorplutonium" der TU Darmstadt sinngemäß festgestellt, dass man mit Reaktorplutonium eine effektive Kernwaffe bauen kann die allerdings eine max. 1 Größenordnung geringere Wirkung hat verglichen mit kernwaffentauglichem Plutonium.

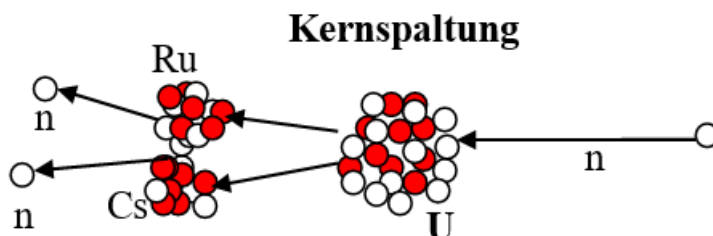
Im Text werden ein geringes Plutoniumgewicht und eine hohe Verdichtungsgeschwindigkeit benannt um der Frühzündungsherausforderung zu entgehen.

Analog anderer Ökowissenschaftler, beispielsweise "Klimawissenschaftler" haben sich auch diese Ökowissenschaftler wenig Mühe gegeben. Es wurden viele ältere Quellen genutzt. Gerechnet haben sie, obwohl Physiker, anscheinend wenig. Ökologische Studien sind eine Gelegenheit für Naturwissenschaftler um mit wenig Arbeit Brot, Titel und Bekanntheit zu erlangen.

Der Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren hat sich mit der Zeit gegenüber den in der Studie genutzten Quellen stark verändert. Die Abbrände sind von etwa 25 MWd/Kg HM Ende der 1960ziger Jahre auf gut 45 MWd/Kg Ende der 1980ziger Jahre als der Bericht entstand und heute > 60 MWd/Kg gestiegen. Dadurch haben sich neue und größere Herausforderungen ergeben, wie die Wärmeentwicklung des Pu 238 die zu geringe Aufmerksamkeit fand. Die Herausforderung durch höhere Aktinide wie Curium, Californium findet in der Studie keine Erwähnung. Der hohe Anteil an Pu242 der die kritische Masse erhöht setzt der Verkleinerung des Pu Kerns und Erhöhung der Verdichtungsgeschwindigkeit Grenzen.

Grundlagen

Grundlagen Reaktorbetrieb und Aktinidenaufbau

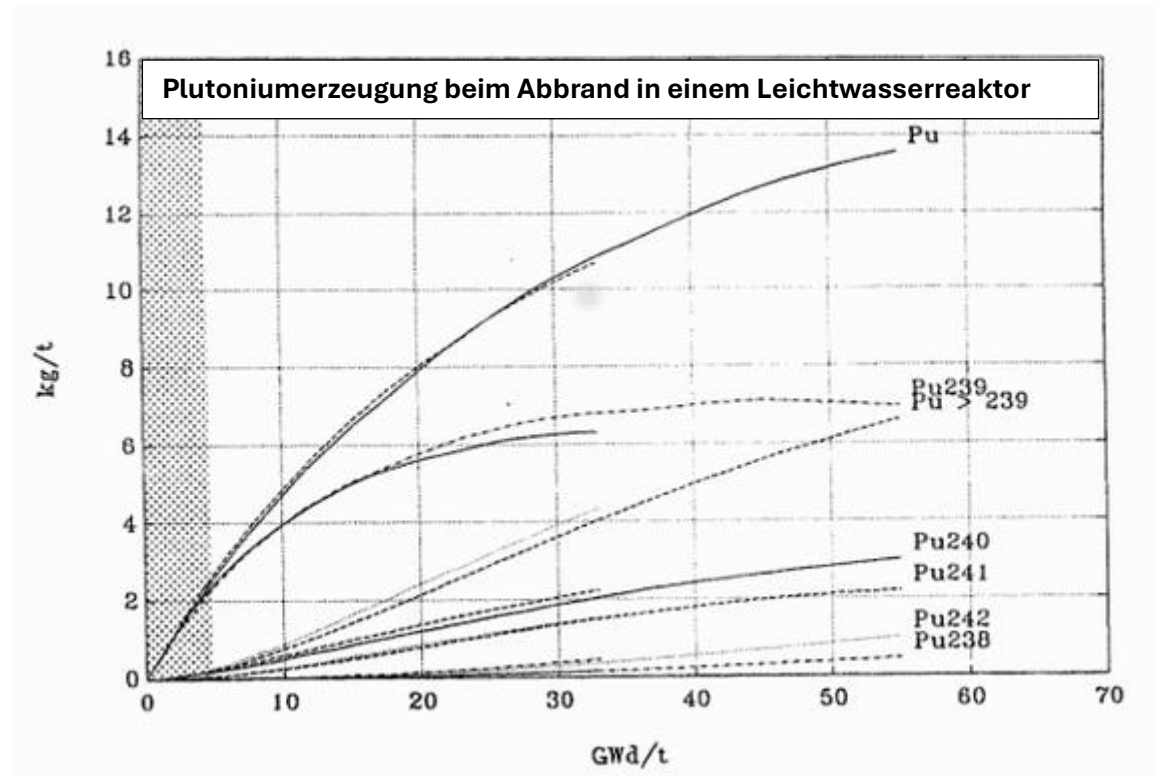


Wenn ein Neutron in einem Kernreaktor auf einen schweren spaltbaren Atomkern trifft, dann kann es zu einem Stoß, einem Neutroneneinfang durch den Atomkern und ggf. zu einer Spaltung kommen. Nicht jeder Neutroneneinfang eines spaltbaren Atomkerns führt zu einer Spaltung. Vielfach entsteht durch den Einfang ein neues Nuklid. Diesen Vorgang nennt man Aktinidenaufbau. Bei einem Leichtwasserreaktor beträgt der Anteil der Neutroneneinfänge von Plutonium 239 die nicht zu einer Spaltung, sondern zu einem Aktinidenaufbau führen bei 26 – 27%.

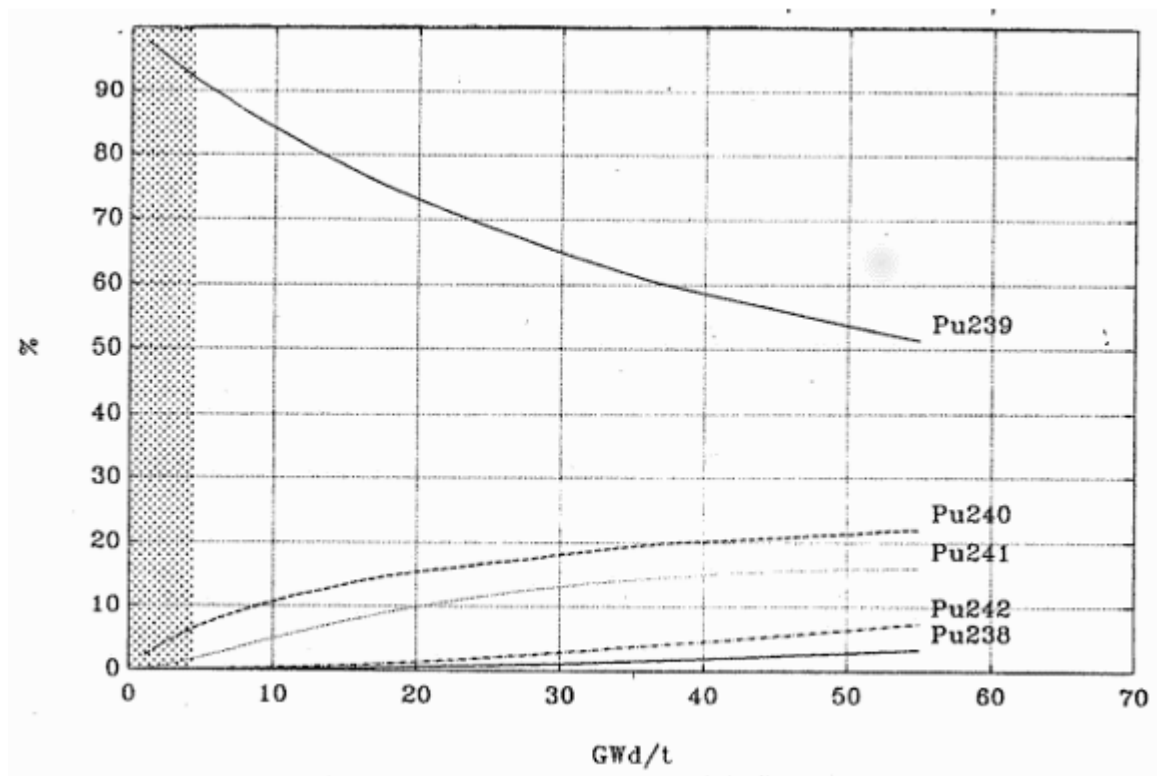
Uran 235 + n -> U236 + n -> Np237 + n -> Pu238...

Uran 238 + n -> Pu239 + n -> Pu240 + n -> Pu241 + n -> Pu242 + n -> Am243 + n -> Am244 -> Cm244

Mit zunehmendem Abbrand nimmt der Anteil des Plutoniums an den spaltbaren Atomkernen trotz Spaltungen zu. Bei höheren Abbränden entstehen überproportional viel höhere Plutoniumnuklide und Aktinide mit noch höherer Massenzahl wie Americium, Curium und Californium.



Grafik aus dem IANUS Bericht (2) ...Die Isotopenzusammensetzung des Plutoniums ändert sich.



Grafik aus dem IANUS Bericht (2)

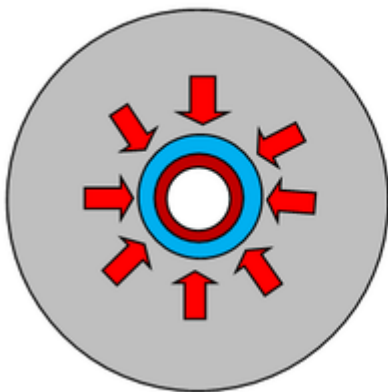
Mit zunehmendem Abbrand nimmt der Anteil des erwünschten Pu²³⁹ ab. Höhere, unerwünschte Plutoniumisotope nehmen zu. Das Equilibrium liegt bei 4.0% Pu²³⁸, 32.0%

Pu239, 34.0% Pu240, 15.0% Pu241 und 15.0% Pu 242. Es bilden sich höhere Aktinide wie Americium, Curium, Californium.

Grundlage Bombendesign

Bomben die aus spaltbaren Materialien mit hoher Spontanspaltungsrate wie Plutonium gebaut werden müssen als Implosionsbombe gebaut werden um die Frühzündungswahrscheinlichkeit zu minimieren. Eine **gleichzeitige** Verdichtung von allen Seiten minimiert die Verdichtungszeit und damit das Frühzündungsrisiko. Eine geringe kompaktierte Masse, hohe Verdichtungsgeschwindigkeit vermindern die Wärmeentwicklung und das Risiko der Frühzündung.

Konstruktionsprinzip Implosionsbombe



Das Zusammen Schießen einer Implosionsbombe ähnelt dem gleichmäßigen Zusammendrücken eines Balls. Versuchen Sie dies einmal mit einem Tennisball. Bereits kleine Risse, Ungleichmäßigkeiten führen zu einer Minderwirkung, oder Versagen der Konstruktion.

Plutoniumkern 3 Kg, Da 102mm, Di 89mm
Neutronenabsorbierende Trennschicht basierend auf Cd
Neutronenreflektor Beryllium Di 105mm, Da 175mm 4 Kg
Sprengstoff 120 Kg PBX 9011 Da 50cm

Herausforderung Alterung der des Bombenkerns Bei einem Abbrand von 60 MWd/Kg entspricht das gewonnene Plutonium etwa dem Equilibrium. Das Plutonium zerfällt entsprechend der Zerfallsgleichung.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t}$$

Nach etwa 1/2 Jahr sind 9% des Pu241 und 0,4% des Pu238 zerfallen. Dabei entsteht 5 cm³ Helium (bei 1 bar) 0,5 g U234 aus Pu238 und 41g Am241 aus dem Zerfall von Pu 241 in einem 3 Kg Plutoniumkern. Plutonium wird üblicherweise mit etwa 1% Gallium legiert in der Delta Phase vergossen. Dieses Plutonium hat eine Kubisch Flächenzentrierte Kristallgitterstruktur. Americium und Uran bevorzugen eine orthorhombische Struktur. Dadurch entstehen Spannungen und Risse im Metall. Der max. Abbrand eines mit metallischem Natururan betriebenen Magnox-Reaktors betrug anfangs 0,5, später bis zu 5 MWd/Kg. Dabei begann das metallische Uran aufgrund der Spaltprodukte und Gase in den Hüllen zu zerbröseln. **Es ergibt sich die Notwendigkeit den Plutoniumkern spätestens nach etwa 6 Monaten wieder einzuschmelzen und einen neuen Kern zu fertigen.** Andernfalls bilden sich Risse, Blasen, Lunker die eine gleichmäßige Verdichtung des Plutoniumkerns verhindern und damit zu einer drastischen Verminderung der Wirkung führen.

Herausforderung Wärmeerzeugung der Bombe. Wenn man von einem Plutonium in der Equilibrium Zusammensetzung 4.0% Pu238, 32.0% Pu239, 34.0% Pu240, 15.0% Pu241 und 15.0% Pu 242 ausgeht. $Q \text{ (W/kg)} = (4 \text{ Pu-238}) \cdot 5.67 + (32 \text{ Pu-239}) \cdot 0.019 + (34 \text{ Pu-240}) \cdot 0.07 + (15 \text{ Pu-241}) \cdot 0.034 + (15 \text{ Pu-242}) \cdot 0.0015$ dann ergibt sich eine **Wärmeentwicklung von 79 W für eine 3 Kg Bombe.** 79W Wärmeerzeugung aus einer Kugel mit 10cm Durchmesser entspricht etwa der Wärmeentwicklung einer früher gebräuchlichen Glühbirne.

Die Sprengstoffe für eine Kernwaffe müssen eine hohe Leistung aufweisen und sehr gleichmäßig wirken. Risse, Blasen und dergleichen im Sprengstoff können die Wirkung einer solchen Waffe stark herabsetzen. Die ersten Kernwaffen nutzten TNT als Sprengstoff. Die Gussstücke wurden geröntgt. Die Herausforderung ist das sich durch Hitze, z.B. an einer Raketen spitze, Kälte, z.B. im Bombenschacht eines Flugzeugs, bzw. die große Wärmeentwicklung des Reaktorplutoniums zu Rissen im Sprengstoff führen können. Im Lawrence Livermore Laboratory wurden Ende der 40ziger Jahre PBX Sprengstoffe für diesen Zweck entwickelt. Dies sind Mischungen aus RDX, HMX mit Polymeren wie Styrol, Butadien und Polyurethanen. PBX 9011 bestehend aus 90% HMX und 10% Estane 5740. Die Dichte liegt bei etwa 1,7 Kg/L, die zul. max. Temperatur 167 °C. Die spezifische Wärmekapazität liegt bei cp 1,3 KJ/Kg/K, die Wärmeleitfähigkeit bei 0,379 W/m/K.

$$\dot{Q} = \frac{4\pi\lambda(T_i - T_a)}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_a}}$$

Daraus ergibt sich im Sprengstoffmantel dieser Bombe nach einiger Zeit eine Temperaturdifferenz von 124°C. Eine dauerhafte Lagerung des Sprengstoffs bei 145°C (21°C Umgebungstemperatur) führt zur schnellen Alterung, Entmischung und Zersetzung des Sprengstoffs. Der vernickelte Plutoniumkern muss in Wasser gelagert werden. **Der Kernsprengkörper kann erst unmittelbar vor dem Einsatz montiert werden.**

Herausforderung Frühzündung durch Neutronen die durch Spontanspaltungen entstehen.

Einige schwere spaltbare Nuklide haben neben dem Zerfall die Eigenschaft spontan auseinander zu brechen. Man spricht von Spontanspaltungen. Dabei werden Neutronen emittiert die bei einer kritischen Masse eine Kettenreaktion auslösen können. Je größer die Kerne werden desto instabiler sind diese. Pu240, Pu242 haben eine hohe Tendenz zur Spontanspaltung. Bei höheren Abbränden entstehen größere Mengen an Curium 242, Curium 244 und Californium 252 die eine um mehrere Dimensionen höhere Spontanspaltungsrate aufweisen.

Eine eigene Rechnung basierend auf der Analyse von mehreren Brennstäben mit 4% Anreicherung und 51 MWd/Kg Abbrand im Druckwasserreaktor (4) kommt zu folgenden Zahlen.

Nuklid	Neutron Emission n/g-s (16)	Share %	Share2* %	Total Neutrons in 3 Kg n/s	Total Neutrons2* in 3 Kg n/s
--------	--------------------------------	------------	--------------	-------------------------------	---------------------------------

Pu238	2.59E+03	2.3	2.3	178710	178710
Pu239	1.61E-02	49.8	50	24	24
Pu240	1.03E+03	25.9	26	797220	797220
Pu241	2.06E-03	8.4	8.4	0	0
Pu242	1.72E+03	2.3	2.3	118680	118680
Am241	1.14E+00	0.2	0.001	7	0
Cm242	1.98E+07	0.05	0.00025	29700000	148500
Cm244	1.1E+07	0.05	0.00025	16500000	82500
Bk249	1 E+05	0.00001	0.00005	negligible	negligible
Cf252	2.3 E+12	0.00001	0.00000005	6,9 E+8	3,45 E+6
Summe				7,36 E+8	4,66 E+6

*Die rote Variante 2 ergibt sich bei einer Abtrennung von 99,5% der höheren Transurane Np, Am, Cm mittels DIAMEX Verfahren

Cm242 entsteht aus dem Beta Zerfall von Am242 und zerfällt zu Pu238 durch Alpha Zerfall.

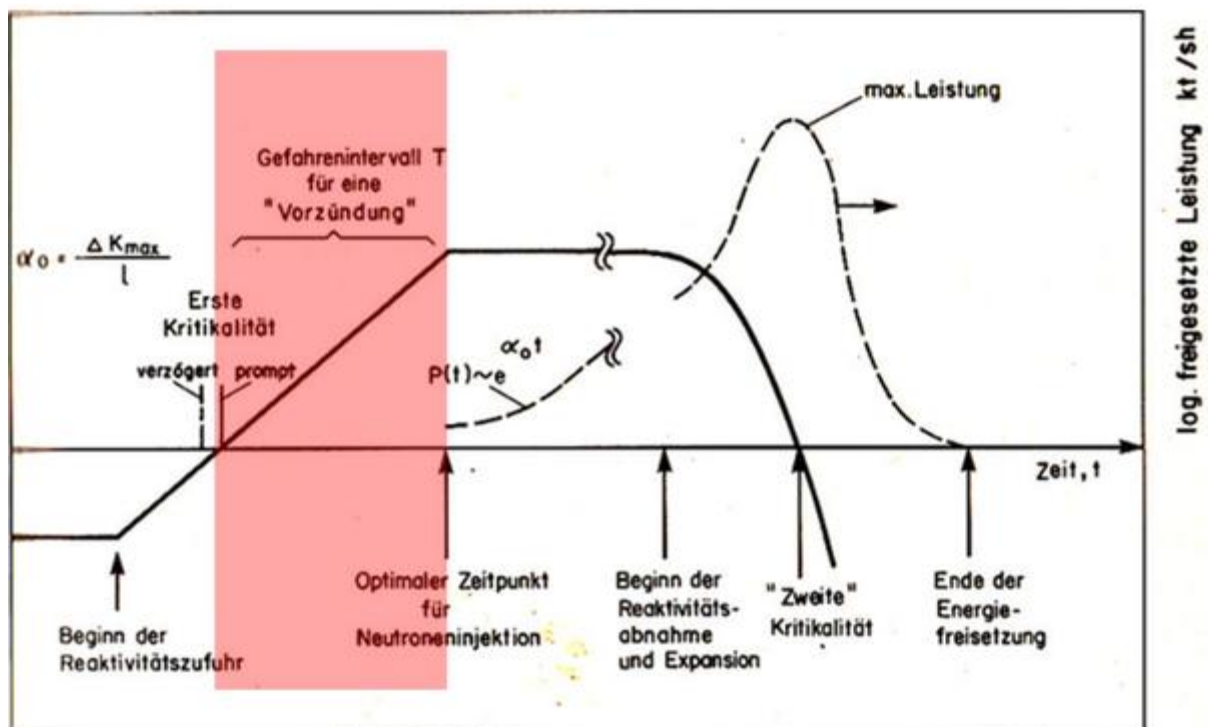
Cm244 entsteht aus dem Beta Zerfall von Am244, Cf252 HWZ 2.6 Jahre

Ein solcher Sprengkörper würde ohne Abtrennung der höheren Aktinide 736 Millionen Neutronen/s emittieren. Sofern man durch mehrfache Trennung 99,5% der Aktinide, Americium, Curium und Californium abtrennen kann emittiert dieser Plutoniumkern 4,66 Millionen Neutronen/s.

Prof Seifritz hat in seinem Buch: Nukleare Sprengkörper, folgende Daten veröffentlicht...

Plutonium-zusammensetzung	Kritische Masse (U_{nat} -reflektiert) (kg)	Inhärente Neutronen- emission (10^6 n/s)	Kommentar
99 % Pu-239/41 1 % Pu-240	4.5	0.05	waffenfähig
94 % Pu-239/41 6 % Pu-240	4.7	0.3	waffenfähig
70 % Pu-239/41 29 % Pu-240 1 % Pu-242	6.0	2	typisches LWR-Plutonium
50 % Pu-239/41 40 % Pu-240 10 % Pu-242	13	8	ziviles Reaktor- Plutonium bei sehr hohem Abbrand
20 % Pu-239/41 35 % Pu-240 44 % Pu-242 (Delta Phase)	34	40	speziell durch lange Bestrahlung denaturiertes Plutonium
5 % Pu-239/41 13 % Pu-240 82 % Pu-242	82	106	sehr stark dena- turiertes Plutonium
Zum Vergleich: U-235	15	0.0001	waffenfähig

Die kritische Zeit der Verdichtung mit einer Kritikalität > 1 ist rot gekennzeichnet.



Wenn man die meinerseits mit einem 50 MWd/Kg abgebrannten Kernbrennstoff und einer 99,5% Abtrennung höherer Aktinide zu Grunde legt werden im Brennstoff während der kritischen Verdichtungszeit 9 Neutronen emittiert. **Eine Frühzündung ist wahrscheinlich.**

Wenn man die Zahlen von Prof. Seifritz 8 Mio. Neutronen/s und Kg für einen hoch abgebrannten Kernbrennstoff mit knapp 60 MWd/Kg zu Grunde legt, dann werden während der kritischen Zeit 48 Neutronen emittiert. **Eine frühe Frühzündung mit sehr geringer Wirkung ist wahrscheinlich.**

Die kritische Masse einer Plutoniummischung wie oben genannt beträgt mit einem Uranreflektor 13 Kg. Eine effektive Kernwaffe sollte mindestens eine theoretische Kritikalität von 1,6, praktisch 1,4 erreichen. Eine 3 Kg Pu-Masse muss in diesem Fall um mindestens den Faktor 2,95 verdichtet werden.

Quellen

1.

A PHYSICAL ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF DIFFERENT ACTINIDE TRANSMUTATION SYSTEMS

**P. Wydler, Y. Kadi¹
Paul Scherrer Institute
CH-5232 Villigen PSI**

2. Bericht zur Waffentauglichkeit von Reaktorplutonium, IANUS 1/1989, Egbert Kankeleit
Christian Küppers Ulrich Imkeller
3. Nukleare Sprengkörper, Prof. Dr. Seifritz, Verlag Karl Thiemig AG München. S78-80.
1984 ISBN 3-521-06143-4
4. Analysis of high burnup spent nuclear fuel by ICP-MS S. F. Wolf,^{1*} D. L. Bowers,² J. C.
Cunnane, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 263, No. 3 (2005) 581
586