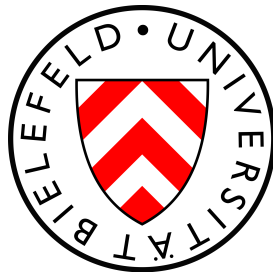


Beschleunigergetriebene Systeme zur Transmutation von radioaktivem Abfall

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades eines Bachelor of Science
der Fakultät für Physik
der Universität Bielefeld



vorgelegt von

Michael Czopnik

Universität Bielefeld
Fakultät für Physik

Betreuer & 1. Gutachter: Prof. Dr. Dominik Schwarz
2. Gutachter: Prof. Nicolas Borghini

Bielefeld, den 10. September 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Kernspaltung	3
2.1	Spontane und induzierte Spaltung	3
2.2	Spaltprodukte	3
2.3	Zerfall der Spaltprodukte	5
3	Radioaktiver Müll	8
3.1	Zusammensetzung von radioaktivem Müll	8
3.1.1	Transurane Elemente	8
3.1.2	Langlebige Spaltprodukte	9
4	Mögliche Realisierung der Transmutation	12
5	Beschleuniger getriebene Anlagen	13
5.1	Geschichte	13
5.2	Zielsetzung	13
5.3	Funktionsweise eines Beschleuniger getriebenen Reaktors . . .	14
5.4	Das Tier 1 Beschleuniger getriebene System	15
5.4.1	Design Optionen für das Tier 1 System	16
5.5	Leistungsmerkmale	16
5.5.1	Strombedarf	16
5.5.2	Reduktion des radioaktiven Abfalls	18
6	Berechnungen für die Bundesrepublik Deutschland	19
6.1	Grundlagen	20
6.1.1	Bindungsenergie	20
6.1.2	Freiwerdende Energie bei Spaltung	22
6.2	Berechnungen	23
6.2.1	Freiwerdende Energien	23
6.2.2	Benötigte Kraftwerke	24
6.2.3	Abfallbeseitigung	24
7	Fazit	25

1 Einleitung

Jedes Jahr aufs neue wird vom Umweltbundesamt eine Zunahme des Stromverbrauchs vermeldet, was auf Wachstum von Wirtschaft und Konsum zurückzuführen ist. Energie wird in unserem Zeitalter somit immer wichtiger. Die Kernenergie in Deutschland liefert ca. 12% des verbrauchten Stroms (Stand 2004 [1]). Im Gegensatz zu anderen Energiequellen wie die Windkraft oder Solarenergie, steht die Energiegewinnung aus Kernkraft in der Kritik. Die Hauptprobleme sind hierbei die Reaktorsicherheit, sowie die anschließende Entsorgung des radioaktiven Abfalls. Bisher sieht die Entsorgung von radioaktiven Abfällen eine Endlagerung für mehrere Millionen Jahre in dafür vorgesehene und für sicher befundenen Salzstöcken vor. Jedoch kann über so einen langen Zeitraum die Sicherstellung des radioaktiven Abfalls in keiner Weise gewährleistet werden. Deshalb wird schon seit langem an alternativen Entsorgungskonzepten geforscht, die sich mit einer Lösung der Endlagerung beschäftigen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Prinzip von Beschleuniger getriebenen Reaktoren, die dazu dienen hoch radioaktiven Abfall mittels eines Protonenbeschleunigers und eines unterkritischen Reaktors zu dezimieren bzw. zu vernichten.

2 Kernspaltung

Unter Kernspaltung versteht man einen Prozess in der Kernphysik, bei dem ein Atomkern unter Energiefreisetzung in zwei oder mehrere Bestandteile zerlegt wird.

2.1 Spontane und induzierte Spaltung

Manche Nuklide spalten sich ohne äußere Einwirkung. Diese spontane Spaltung ist eine Art des radioaktiven Zerfalls. Sie lässt sich quantenmechanisch ähnlich dem Alpha-Zerfall durch den Tunneleffekt erklären.

Besonders wichtig ist jedoch die induzierte Spaltung, bei der ein Neutron einen Kern trifft und von diesem aufgenommen wird. Der Kern gewinnt dadurch die Bindungsenergie dieses Neutrons, befindet sich somit in einem angeregten Zustand und spaltet sich.

Bei beiden Möglichkeiten der Spaltung werden außer den beiden Bruchstücken auch einige Neutronen freigesetzt. Diese Neutronen können eine Kettenreaktion in Gang setzen.

Beide Arten der Spaltung kommen nur bei ausreichend schweren Kernen vor, da nur dann die neu entstehenden Kerne fester gebunden sind als der ursprüngliche Kern, so dass die Spaltung dem Kern einen Energievorteil bringt. Anschaulich lässt sich die Kernspaltung anhand des Tröpfchenmodells durch Schwingung und Zerreißen des Kerns verstehen. Der Kern dehnt sich in die Länge und schnürt sich in der Mitte ein. Die langreichweitige, elektrische Abstoßung der Protonen überwiegt die anziehende kurzreichweitige Kernkraft. Die beiden Bruchstücke fliegen somit auseinander.

2.2 Spaltprodukte

Die Spaltung in nur zwei neue Spaltfragmente ist nicht die einzige, aber die am häufigsten vorkommende Möglichkeit. Viele unterschiedliche Nuklidpaare können dabei als Spaltfragmente entstehen. In jedem Fall ändern sich aber die vorhandenen Protonen sowie Neutronen zahlenmäßig nicht. Zwei Möglichkeiten der neutroneninduzierten Spaltung von Plutonium sind zum Beispiel:



In der unteren Abbildung 1 sind die hier relevanten Spaltprodukte von Uran-235 in einer Häufigkeitsverteilung zu sehen.

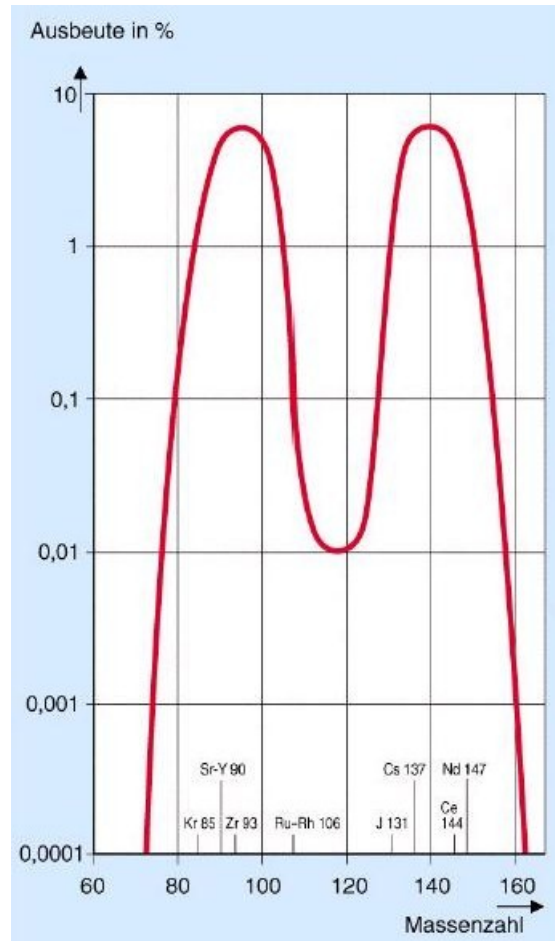


Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der Spaltprodukte von Uran [2]

2.3 Zerfall der Spaltprodukte

Um nun einen besseren Vergleich über die Gefahr der einzelnen Spaltprodukte von Uran zu erhalten ist in Tabelle ist eine Übersicht über die einzelnen Spaltprodukte gegeben.

Spaltprodukt	Zerfallsart	Zerfallsenergie in keV	Halbwertszeit
Zirkonium-93	β	$91,37 \pm 1,57$	$1,53 \cdot 10^6 \text{ a}^1$
Technetium-99	β	$293.651 \pm 1,417$	$2,111 \cdot 10^5 \text{ a}$
Cäsium-137	β	$1175,63 \pm 0,17$	30,07 a
Strontium-90	β	$545,99 \pm 1,41$	28,79 a
Krypton-85	β	$687,08 \pm 1,94$	10,78 a
Ruthenium-106	β	$39,40 \pm 0,21$	373,59 d ²
Cerium-144	β	$318,66 \pm 0,83$	284,89 d
Noedymium-147	β	$896,00 \pm 0,90$	10,98 d
Jod-131	β	$970,84 \pm 0,61$	8,02 d

Tabelle 1: Spaltprodukte von Uran und deren Eigenschaften

Wie man leicht erkennen, kann besitzt Zirkonium unter allen anderen Spaltprodukten die größte Halbwertszeit, gleich gefolgt von Technitium und Cäsium. Dies allein sagt jedoch noch nicht sehr viel über die Gefahr der einzelnen Spaltprodukte aus. Um eine genauere Untersuchung durchzuführen, wird die Aktivität pro Kilogramm $A_{kg}(t)$ der Spaltprodukte in Becquerel, logarithmisch gegen die Zeit aufgetragen. Dies geschieht nach:

$$A_{kg}(t) = \frac{\ln(2)}{1u} \left[\sum_i^{N_A} \frac{1}{T_{1/2,i}} \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2,i}} t} \cdot \frac{h_i}{A_i} \right] \cdot \left(\sum_i^{N_A} h_i \right)^{-1} \quad (2.1)$$

Hierbei beschreibt $T_{1/2,i}$ die Halbwertszeit, N_A die Anzahl der Atome ($6 \cdot 10^{23}$), h_i die Häufigkeit des Spaltproduktes und A die Massenzahl. u gibt die Atommasse an und beträgt in etwa $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg. In der Abbildung 2 ist jeweils das Ergebnis zu sehen.

¹Jahre

²Tage

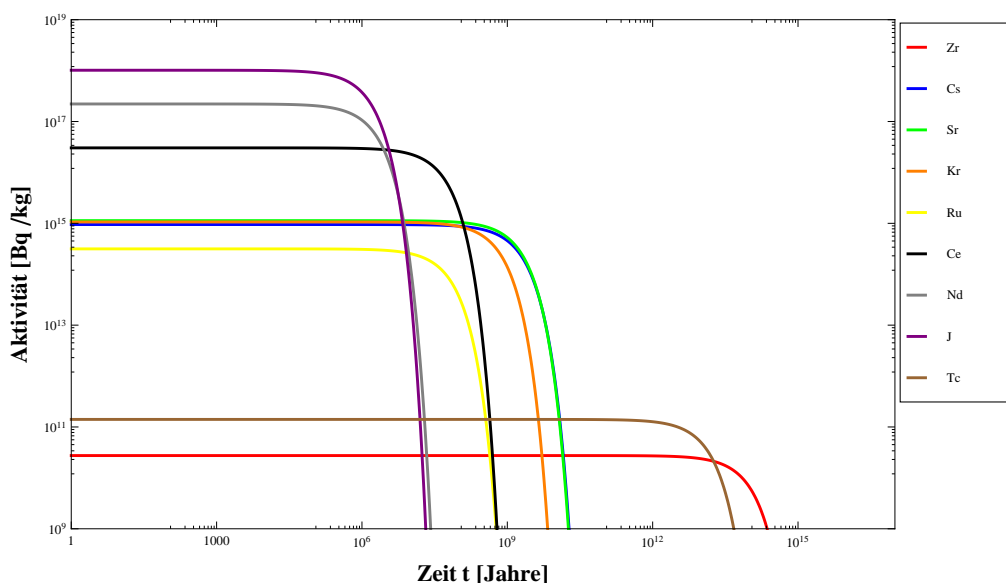


Abbildung 2: Aktivität pro kg einiger Spaltprodukte von Uran

Beim Vergleich der Graphen der Aktivität in Bezug auf ihre Halbwertszeit, ist zu sehen, dass Zirconium sowie Technetium zwar die größten Halbwertszeiten aufweisen, jedoch mit die geringste Aktivität. Dennoch liegt das Hauptaugenmerk bei Zirconium und Technetium, da diese beiden Spaltprodukte über mehrere Milliarden Jahre hinaus eine konstante Aktivität von etwa 10^{12} Bq/kg besitzen. Somit gehören Zirconium und Technetium zu den gefährlichsten Spaltprodukten die es zu beseitigen gilt. Andererseits sollte auch das Jod berücksichtigt werden, da es über ca. 10^8 Jahre eine sehr hohe Aktivität von etwa 10^{18} Bq/kg aufweist.

Um diese Aussage zu bestätigen ist in Abbildung 3 die abgegebene Energiemenge der Spaltprodukte mittels

$$P = \sum_i A_{\text{kg},i} \cdot B_{\beta_i} \quad (2.2)$$

logarithmisch aufgetragen.

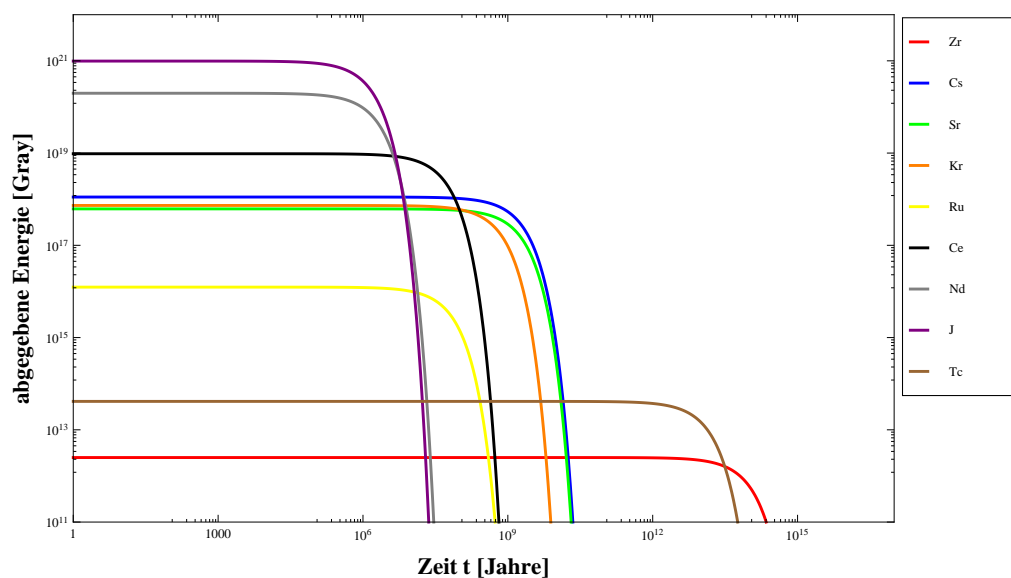


Abbildung 3: abgegebene Energie pro kg

Zu erkennen ist, dass der Graph der abgegebenen Energiemenge kaum von dem Graphen der Aktivität abweicht. Die Energieabgabe bei Zirkonium und Technitium, ist wie bei der Aktivität zwar am geringsten, dennoch bei weitem über viele Jahre hinaus konstant. Ebenso ist das Jod mit seiner hohen Energieabgabe wieder zu beachten. Dies bestätigt die zuvor gemachte Aussage über die Gefahr der Spaltprodukte.

3 Radioaktiver Müll

3.1 Zusammensetzung von radioaktivem Müll

Der primäre Zweck der Beschleuniger getriebenen Reaktoren ist es, die meisten radiotoxischen und langlebigen Komponenten der nuklearen Abfälle zu zerstören. Nuklearer Abfall wird primär in high-level (HLW) und low-level waste (LLW) aufgeteilt. HLW besteht aus hochradioaktiven Spaltprodukten, die im radioaktiven Brennstoff, während des Betriebes eines Kraftwerkes entstehen. LLW bezeichnet Abfälle, die beim Betrieb von kerntechnischen Anlagen anfallen, z.B. Schutzbekleidung oder Rückstände aus der medizinischen und industriellen Verwendung von Radionukliden. Nach einigen Klassifikationen gibt es noch eine dritte Kategorie, der mittelradioaktive Abfälle, verstrahlte Maschinen und Materialien, zugeordnet sind.

Das Konzept der Beschleuniger getriebenen Transmutation von nuklearen Abfällen ist für HLW ausgerichtet, oder genauer gesagt, für die radioaktiven Produkte, die in den abgebrannten Brennelementen enthalten sind. Die Bestandteile des HLW sind wiederum oft in zwei Gruppen eingeteilt: Die Transuranelemente (TRU) und die Spaltprodukte.

3.1.1 Transuranelemente

Als Transurane werden Elemente mit einer höheren Ordnungszahl als Uran bezeichnet. Alle Transurane sind dabei künstlich erzeugte radioaktive Elemente, die nicht natürlich auf der Erde auftreten. Der wichtigste Beitrag der langlebigen Radiotoxizität von nuklearen Abfällen ergibt sich durch TRU. Representativ für die TRU Kategorie sind die Pu-Isotope und die minoren Aktiniden (MA) Np, Am und Cm. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die TRU Massen abgebrannter Brennelemente in Druckwasserreaktoren nach 15 Jahren Abkühlzeit. [3]

Transuranelemente werden durch Neutroneneinfang sowie durch Alpha- und Beta-Zerfall erzeugt. Abbildung 6 zeigt die wichtigsten Transmutationsprozesse, die für die Entstehung von Transuranelementen verantwortlich sind. Ausgehend von dem Brutmaterial ^{232}Th in (a) und ^{238}U in (b).

In (c) ist der Beginn der MA-Kette beginnend von ^{241}Am und ^{243}Am gezeigt. Spaltungs- und Einfangsquerschnitte sind hierbei ebenso dargestellt wie die Halbwertszeit des β -Zerfalls. In den Fällen von ^{242}Cm , ^{243}Cm und ^{244}Cm ist der α -Zerfall, wegen der besonderen Wichtigkeit dieser Zerfallsprozesse für die Herstellung von Pu-Isotopen, angegeben.

Nuklid	Häufigkeit [g/Tonnen]	Nuklid	Häufigkeit [g/Tonnen]
Np-236	$5,3 \cdot 10^{-4}$	Am-242	2,5
Np-237	$6,5 \cdot 10^2$	Am-243	$1,4 \cdot 10^2$
Pu-238	$2,3 \cdot 10^2$	Cm-242	$5,9 \cdot 10^{-3}$
Pu-239	$5,9 \cdot 10^3$	Cm-243	$4,3 \cdot 10^{-1}$
Pu-240	$2,6 \cdot 10^3$	Cm-244	$3,1 \cdot 10^1$
Pu-241	$6,8 \cdot 10^2$	Cm-245	2,3
Pu-242	$6,0 \cdot 10^2$	Cm-246	$3,2 \cdot 10^{-1}$
Pu-244	$4,2 \cdot 10^{-2}$	Cm-247	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Am-241	$7,7 \cdot 10^2$	Cm-248	$2,4 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 2: Transurane Elemente im Brennstoff eines Kernkraftwerkes nach 15 Jahren Abkühlzeit [3]

3.1.2 Langlebige Spaltprodukte

Die beiden Kerne, die sich aus der Kernspaltung ergeben, werden als Spaltfragmente bezeichnet. Abbildung 7 zeigt die Verteilung der Fragmente nach ihrer Massenzahl, d.h. die Spaltausbeute einiger wichtigen spaltbaren Kerne. Die Mehrheit der Spaltfragmente sind kurzlebig und zerfallen rasch in stabile oder langlebige Kerne, die als Spaltprodukte bezeichnet werden. Darüber hinaus können auch Fragmente die langsam zerfallen als Spaltprodukte eingestuft werden.

Einerseits sind die stabilen Endprodukte aus reiner radiotoxischer Sicht relativ unproblematisch, andererseits sind die langlebigen Spaltprodukte eine große Herausforderung für die Beseitigungstechnologie. Den größten Beitrag zur Gefahr der langlebigen Spaltprodukte liefern ^{93}Zr , ^{99}Tc sowie ^{131}I . Diese Nuklide machen den größten Teil des Gefahrguts aus, das eine langfristige Lagerung erfordert.

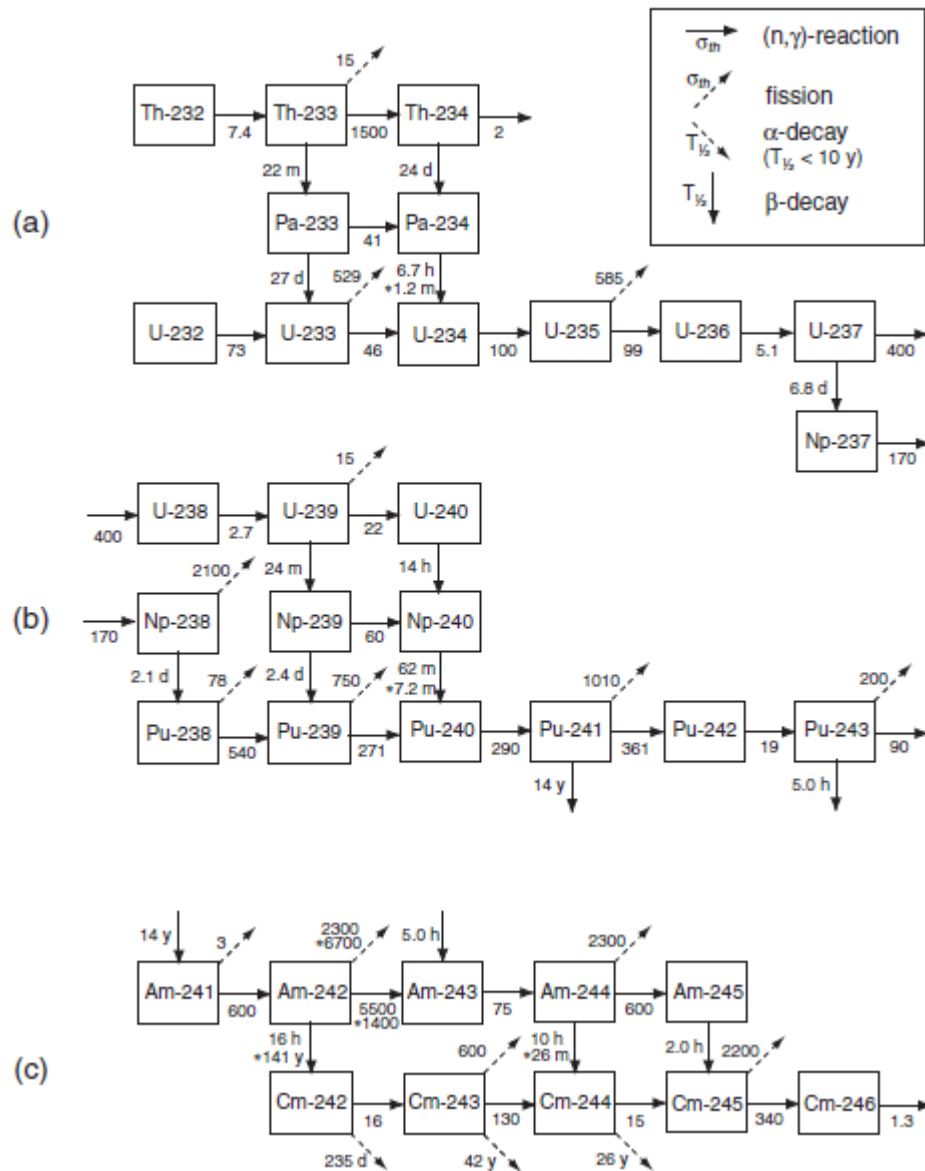


Abbildung 4: Zerfallsketten [3]

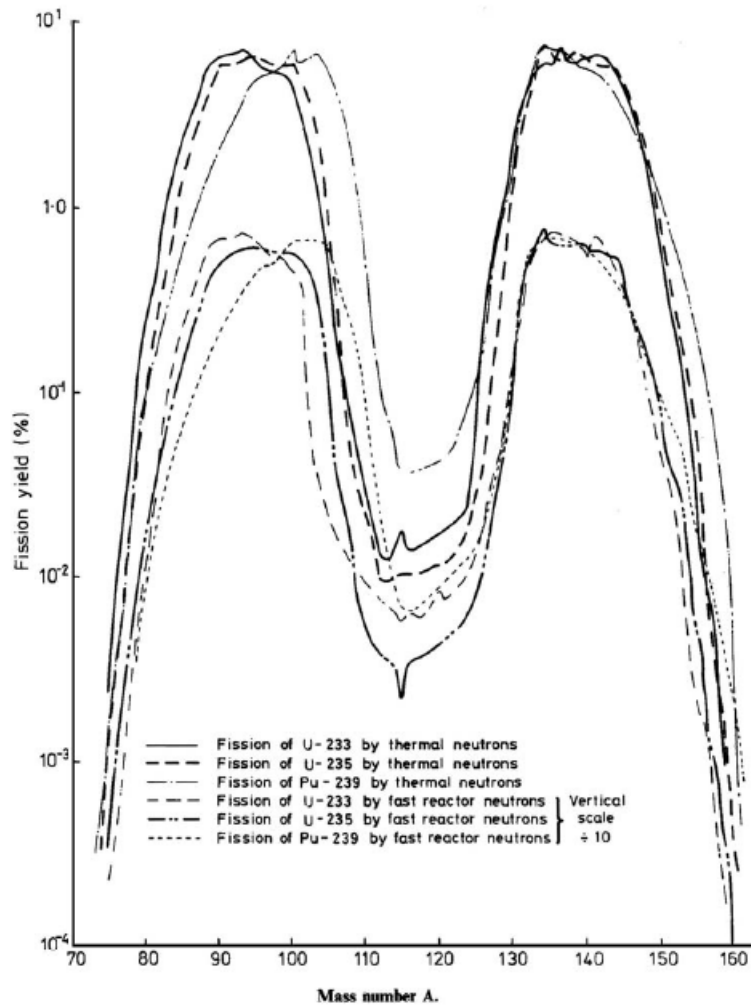


Abbildung 5: Spaltungsausbeute von ^{233}U , ^{235}U und ^{239}Pu [3]

4 Mögliche Realisierung der Transmutation

Die Verwandlung von Actiniden in weniger langlebige Isotope kann nur durch neutroneninduzierte Spaltung verwirklicht werden und zwar aus dem Grunde, dass einerseits Neutronenquellen mit genügend hoher Wirkung zur Verfügung stehen und andererseits die Spaltwirkungsquerschnitte ausreichend hoch sind. Am Ende des Transmutationsprozesses bleiben von den Actiniden nur noch die Spaltprodukte (Spaltfragmente der Atomkerne) zurück. Es sind unterschiedliche Neutronenquellen mit verschiedenen Vor- und Nachteilen zur Transmutation verwendbar:

1. Bei vorhandenen Kernkraftwerken (Druckwasserreaktoren, Siedewasserreaktoren) kann der Brennstoff so verändert werden, dass zum einen die zu transmutierenden Actiniden besser gespalten werden und zum anderen der weitere Aufbau von Actiniden vermindert oder ganz verhindert wird. Jedoch kann hier nur eine Reduktion der Menge erreicht werden und nicht eine vollständige Umwandlung stattfinden.
2. Schnelle Brüter haben das höchste Potential zur kompletten Umwandlung. Dies geht aus dem besseren Verhältnis der Spalt- zu den Aufbauwirkungsquerschnitten der häufigsten Actiniden im schnellen Neutronenenergiebereich hervor. Hier führen somit mehr Reaktionen zur einer Spaltung als zu einem weiteren Aufbau an Actiniden. Diese Sorte von Kernkraftwerken ist aber heutzutage nicht mehr in Betrieb, und wird aus technologischen Gründen nicht mehr verfolgt.
3. Eine weitere Möglichkeit der Transmutation bieten Beschleunigergetriebene Anlagen (ADS). Diese Art von Kraftwerken bietet aus sicherheitstechnischer und neutronenphysikalischer Sicht im Vergleich zu den anderen Anlagen die größten Vorteile. Es wird wie bei den schnellen Brütern ein schnelles Neutronenspektrum zur Umwandlung genutzt. Der wesentliche Unterschied liegt jedoch in der nicht vorhandenen Selbsterhaltung der nuklearen Kettenreaktion („unterkritisch“). Im Gegensatz zu kritischen Reaktoren, wo jede Neutronengeneration durch Spaltung wieder zur Freisetzung einer gleich großen Anzahl freier Neutronen führt, sinkt bei der unterkritischen Methode die Anzahl der freien Neutronen mit jeder Neutronengeneration. Zum Betrieb einer solchen Anlage wird eine externe Neutronenquelle benötigt. Dazu werden mit einem Beschleuniger Protonen auf ein unterkritisches, neutronenmultiplizierendes Material (Blanket) geschossen, was zu einer genügend großen Neutronenquellstärke führt. Um eine solche Anlage betreiben

zu können, ist jedoch noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig.

5 Beschleuniger getriebene Anlagen

5.1 Geschichte

Schon im Jahre 1938 wurde die kontrollierte Kernreaktionen zur Herstellung von spaltbarem Material durch Otto Hahn und Fritz Straßmann untersucht. Dazu wurde mit hochenergetischen Protonen aus einem Beschleuniger ein Target aus Uran beschossen und so Neutronen hergestellt, mit denen Folgereaktionen z.B. Plutonium erbrütet werden konnte. In den Jahren 1950 bis 1954 wurde mit dem Materials Testing Accelerator Programm am Lawrence Livermore Research Laboratory, USA, an Beschleunigern die Produktion von spaltbarem Material genauer untersucht und als nicht wirtschaftlich und unpraktikabel eingestuft. 1990 wurde das Accelerator Transmutation of Waste Programm der USA ins Leben gerufen, das sich mit der Vernichtung oder Transmutation von spaltbarem Material beschäftigt. Die Untersuchung eines Accelerator Driven System, wie sie aktuell in Europa durchgeführt wird, beruht unter anderem auf den Ideen des Energy Amplifiers, welcher von C. Rubbia und Mitarbeitern 1995 am Cern entwickelt wurde. Seit 1999 werden am Karlsruher Institut für Technologie Untersuchungen zu einem Accelerator Driven System durchgeführt.

5.2 Zielsetzung

Das Ziel eines Beschleuniger getriebenen Reaktors ist die Transmutation von langlebigem, radioaktiven Müll und somit die Schließung des Brennstoffkreislaufs. Der in einem Accelerator-Driven System verwertbare radioaktive Abfall unterteilt sich, wie oben schon angesprochen, in zwei Gruppen: Die minoren Aktiniden wie zum Beispiel Neptunium, Americium und Curium und einige langlebige Spaltprodukte wie Jod 129. Dieses kann langfristig in unsere Biosphäre gelangen und dort von Organismen aufgenommen werden. Das Accelerator-Driven System soll somit als Ergänzung oder gar als Ersatz zu dem bestehenden Park an Druckwasserreaktoren angesehen werden. Durch den Einsatz von Beschleuniger getriebenen Reaktoren reduziert sich die Menge und die Radiotoxizität an radioaktivem Abfall, der in Endlager gebracht werden muss.

5.3 Funktionsweise eines Beschleuniger getriebenen Reaktors

Ein Beschleuniger getriebener Reaktor besteht hauptsächlich aus drei Komponenten: einem Beschleuniger für Protonen, einem Target, in welchem durch Spallationsreaktion Neutronen erzeugt werden (externe Neutronenquelle) und einem unterkritischen Blanket, in dem unter Freisetzung von Spaltungsneutronen (interne Neutronenquelle) und von Wärme die Spaltungsreaktion stattfindet. Die Protonen werden durch ein evakuiertes Strahlrohr, das am Ende durch ein Strahlfenster abgeschlossen ist, in das Target eingebracht. Das Target besteht zumeist aus einem schweren Flüssigmetall, in etwa Blei. Die Spallationsneutronen, die im Target erzeugt werden, dienen zur Transmutation und sind nicht abhängig vom unterkritischen Blanket. Eine Abschaltung des Protonenstrahls führt zu einer Unterbrechung der Spaltungsreaktion im Blanket, so dass keine weiteren Spaltvorgänge mehr stattfinden können (unterkritischer Reaktor). Eine schematische Anordnung eines Accelerator Driven System ist in Abbildung 6 [4] zu sehen.

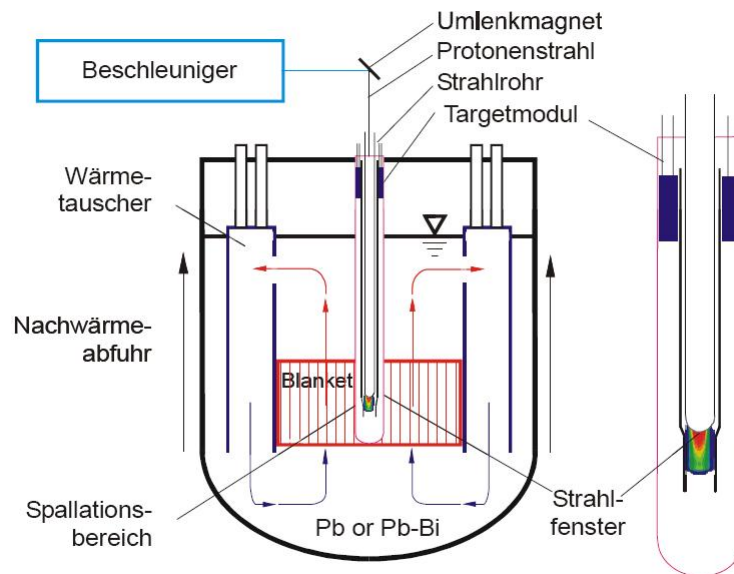


Abbildung 6: Schematische Anordnung eines Accelerator-Driven System [4]

5.4 Das Tier 1 Beschleuniger getriebene System

Das Tier 1 System nach Rubbia et. al. [5] wird für die Zerstörung von radioaktivem Abfall, wie er in Kernkraftwerken anfällt verwendet. Es benötigt lediglich Uran und die Spaltprodukte, die im Kernkraftwerk entstehen. Das System ist in Abbildung 6 dargestellt, welche ein Beschleuniger getriebenes System mit flüssigem Abfall aus Kernkraftwerken zeigt. Die transmutierten und nun weniger gefährlichen Produkte werden entfernt und in Stollen zur Endlagerung gebracht. Die Hitze, die bei der Spaltung entsteht, wird dazu benutzt um elektrischen Strom zu produzieren, der in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist wird. Der einzige Schritt, der nötig ist um das Laden des Reaktors vorzubereiten, ist das Fluorieren des Abfalls, welches dazu dient das Uran und die Spaltprodukte zu trennen. Das Plutonium und die minoren Actinide (PMA), sowie die Zirkonium Hülle werden mit Natriumfluorid kombiniert. Eine flüssige eutektische Mischung aus Natriumfluorid-Zirkoniumfluorid wird als Träger verwendet um PMA in den Reaktor zu laden.

Im Beschleuniger getriebenen System kann nahezu die gesamte Spaltungsenergie von Plutonium und den minoren Actiniden umgewandelt werden. Lediglich 20% der Actinidladung eines Kraftwerks bleiben nach der Spaltung übrig. Falls keine Energie mehr aus dem Abfall gewonnen werden kann, wird er zu Endlagerung in Stollen gebracht. Durch ein solches Beschleuniger getriebene System soll sich die Actinidladung um den Faktor 5 verkleinern, der Plutoniumgehalt um den Faktor 7 zurückgehen und das Neptunium um den Faktor 10 verringern. Die Reduktion des Neptuniums spielt dabei die wichtigste Rolle, da es eines der Actinide mit der größten Aktivität ist. Für die Entwicklung dieses Systems werden 750-MWt Einheiten vorgeschlagen [8], die für den Abfall eines typischen 3000-MWt Kernkraftwerk zuständig sind. Mit einem Multiplikationsfaktor von $k_{eff} = 0.96$ und einem Design, das erlaubt mit der Hälfte der im Beschleuniger produzierten Neutronen eine Spaltung auszulösen, würde ein 12-mA^3 1-GeV Beschleuniger benötigt werden. Dieser könnte wahrscheinlich mit den heutzutage vorhandenen technischen Mitteln gebaut werden. Insgesamt erlaubt das Beschleuniger getriebene System zur Transmutation von radioaktivem Abfall einen Energiegewinn aus den Actiniden, sowie die Reduzierung von Actiniden, die zur Endlagerung gebracht werden, um den Faktor 5.

³dies entspricht einer Luminosität von etwa $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Zum Vergleich: Der LHC besitzt einen 0.56 A Beschleuniger mit einer Luminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

5.4.1 Design Optionen für das Tier 1 System

Das Tier 1 System wäre unpraktikabel, wenn der Einfangsquerschnitt der Spaltprodukte aus Druckwasserreaktoren zu hoch wäre. Wenn die Lebensdauer T der Spaltprodukte in einem Neutronenfluss Φ viel kleiner wäre als ihre Aufenthaltszeit R_t im Fluss, würde der große Einfangsquerschnitt zu keiner Reaktion im Transmutter führen. Die Lebensdauer T ist mit

$$T = \frac{1}{\Phi\sigma} \quad (5.1)$$

gegeben, wobei σ den Neutroneneinfangsquerschnitt der Spaltprodukte angibt und Φ den Neutronenfluss. Der effektive thermische Fluss der hier betrachtet wird, ist mit $2 \cdot 10^{14}$ Neutronen pro $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ angegeben. Für ein σ von 1000 barn, würde die Lebenszeit T in etwa $T = 5 \cdot 10^6 \text{s}$ oder ca. 2 Monate betragen. Unter der Annahme, dass die nukleare Aufenthaltszeit ca. fünf Jahre beträgt, liegt es auf der Hand, dass der effektive Einfangsquerschnitt des Nuklids um den Faktor 30 reduziert würde, somit würde der effektive Einfangsquerschnitt für einen 1000 barn Querschnitt $1000/30=33$ barn betragen. Deswegen ist der tatsächliche effektive Einfangsquerschnitt wesentlich geringer, als der der Spaltproduktmischung, die in das System eingespeist wird. Durch eine weitere Reduktion des Einfangsquerschnittes, hervorgerufen durch die fortlaufende Spaltung, betrüge im Endeffekt der durchschnittliche Einfangsquerschnitt in etwa 6 barn. Dieser Wert ist deutlich geringer als die ursprüngliche Vorstellung und macht deshalb eine bessere Neutronenwirtschaft zum zentralen Element bei der Gestaltung eines praktikablen Systems wie es in Abbildung 6 dargestellt ist. Das Tier 1 Beschleuniger getriebene System erhält Plutonium und minore Actinide aus Druckwasserreaktoren und transmutiert sie während einer nominalen Aufenthaltszeit von 4,75 Jahren im Transmutter.

5.5 Leistungsmerkmale

5.5.1 Strombedarf

Der Strombedarf kann berechnet werden, indem man die Spaltungsleistung P des Systems berücksichtigt, die als Anzahl der Spaltungen pro Sekunde umgeschrieben werden kann. Unter der Berücksichtigung des Multiplikationsfaktors k für die Neutronenbilanz, kann mittels der geometrischen Reihe die durchschnittliche Spaltung mit $k/(1-k)$ Ereignissen angegeben werden. Dies geschieht aus der Annahme, dass nach jeder weiteren mittleren Lebensdauer, die Neutronenquellichte um k vervielfacht wird und gleichzeitig weitere Neutronen nachgeliefert werden.

Bei der Division der Anzahl der Spaltungen durch diesen Faktor, erhält man die Anzahl der Spaltungsketten des System, die durch den Beschleuniger gestartet werden müssen.

Für ein unterkritisches System, bei dem die Spaltung durch einen Beschleuniger ausgelöst wird, ist der Anteil der Neutronen, die eine Kettenreaktion induzieren daher k/ν_{ave} , wobei ν_{ave} die Anzahl der Neutronen pro Spaltung angibt. Wenn jedes Proton n Neutronen produzieren würde, ist der Strombedarf gegeben mit

$$\begin{aligned} I(\text{mA}) &= 5,2 \cdot \frac{(1-k)}{k} \cdot \frac{\nu_{ave}}{k} \cdot \frac{1}{n} P(\text{MW/t}) \\ &= 5,2 \cdot (1-k) \cdot \frac{\nu_{ave}}{nk^2} P(\text{MW/t}) \end{aligned} \quad (5.2)$$

wobei 5,2 einen Umrechnungsfaktor beschreibt [5].

Für eine Leistung von 750MW/t, $k = 0,96$, $\nu_{ave} = 2,96$, $n = 30$ erhalten wir für 1-GeV Protonen an Blei, $I = 16,7\text{mA}$. Wenn es das Ziel ist ein Tier 1-System für ein 3000 MW/t Druckwasserreaktor zu verwenden, um die Abfälle von einem Druckwasserkraftwerk zu zerstören, würde das Tier 1 System 80% der Abfälle zerstören und die Tier-1 Leistung würde 600MWt betragen [8]. Die Kosten für solch ein System belaufen sich schätzungsweise auf etwa 383,8 Millionen Euro (siehe Tabelle 2). Die Betriebskosten belaufen sich auf jährlich 20 Millionen Euro.

Beschleuniger	115,1 M€
Fluorieren	19,2 M€
Target-blanket	115,1 M€
Energieerzeugungsequipment	76,8 M€
Sonstiges	57,6 M€
Gesamt	383,8 M€

Tabelle 3: Kosten (in Millionen Euro) für ein Tier 1 System bei $k = 0,96$ [5]

5.5.2 Reduktion des radioaktiven Abfalls

Transmutation, zur Zerstörung von kommerziellem und militärischem Plutonium ist ein Hauptaugenmerk für den Bau und die Inbetriebnahme eines Beschleuniger getriebenen Reaktors. Die Höhe des aktinidenhaltigen Abfalls, der im System pro Jahr vernichtet werden kann, beträgt in etwa 400kg, wobei der Anteil an neu produziertem ^{233}U , das bei der Transmutation zwangsweise entsteht, etwa 175kg ausmacht. Insgesamt kann die Reduktion des Abfalls pro Jahr mit $402 - 175 = 227\text{kg}$ angegeben werden. Die Produktion von ^{233}U verringert den Anteil an Abfall, der vom System zerstört werden kann und macht somit eine Ausweitung des Systems notwendig um kommerziellen Aktinidenabfall effizienter zerstören zu können.

Gesamtleistung	
Abfallvernichtung	402 kg/Jahr
Produktion von ^{233}U	175 kg/Jahr
Nachfüllzusammensetzung	
frischer Müll	0,85 t
frisches Thorium	0,74 t
Verbleib von vorhergehenden Aktiniden	
Thorium	5,35 t
Rest	2,26 t
Insgesamt	9,20 t

Tabelle 4: Aktinidzerstörung und Produktion [5]

6 Berechnungen für die Bundesrepublik Deutschland

In der Bundesrepublik Deutschland sind derzeit 17 Kernkraftwerke in Betrieb (siehe Tabelle 2). Jedes von ihnen liefert ca. 800-1500 MW an elektrischer Leistung. Damit verbunden ist jedoch auch die gleichzeitige Produktion von radioaktiven Abfall. In Deutschland fallen jährlich etwa 300 Tonnen an radioaktiven Abfall aus Kernkraftwerken an. Die Frage, die sich dabei stellt lautet: Kann man mit Beschleuniger getriebenen Systemen den anfallenden radioaktiven Abfall ganz beseitigen, bzw. wie viele von diesen neuartigen Systemen wären dafür notwendig? Die nachfolgenden Berechnungen beschäftigen sich genau mit diesen Fragen.

Kernkraftwerke in Betrieb	Typ	Elektr. Leistung in MW (Brutto/Netto)	Jahr der Inbetriebnahme
Neckarwestheim 1	DWR ⁴	840/785	1976
Neckarwestheim 2	DWR	1365/1269	1988
Brokdorf	DWR	1440/1370	1986
Brunsbüttel	SWR ⁵	806/771	1976
Emsland, Lingen	DWR	1400/1329	1988
Grafenrheinfeld	DWR	1345/1275	1981
Isar 1, Essenbach	SWR	912/878	1977
Isar 2, Essenbach	DWR	1475/1400	1988
Krümmel	SWR	1316/1260	1983
Philippsburg 1	SWR	926/890	1979
Philippsburg 2	DWR	1458/1358	1984
Unterweser, Esenshamm	DWR	1410/1345	1978
Gundremmingen B	SWR	1344/1284	1984
Gundremmingen C	SWR	1344/1288	1984
Biblis A	DWR	1225/1146	1974
Biblis B	DWR	1300/1240	1976
Grohnde	DWR	1430/1360	1984

Tabelle 5: Kernkraftwerke in Deutschland [6]

⁴Druckwasserreaktor⁵Siedewasserreaktor

6.1 Grundlagen

6.1.1 Bindungsenergie

In der Kernphysik bezeichnet man als Bindungsenergie, die Energie, die frei wird, wenn sich Nukleonen zu einem Atomkern verbinden. Dies ist laut der einsteinschen Beziehung $E = mc^2$ mit einem kleinen Massenverlust der gebundenen Nukleonen verbunden dem sogenannten Massendefekt. Die Bindungsenergie kommt durch die anziehende Kraft der starken Wechselwirkung zustande, mit der sich die Nukleonen anziehen. Sie wird durch die gegenseitige Coulombabstoßung, der elektrisch positiv geladenen Protonen im Kern geschwächt, wodurch die maximale Bindungsenergie pro Nukleon ungefähr den Wert 8 MeV/u im Massenbereich 55-60u erreicht. Ein erstes Modell, das diesen Sachverhalt beschreibt, stammt von Hans Albrecht Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker.

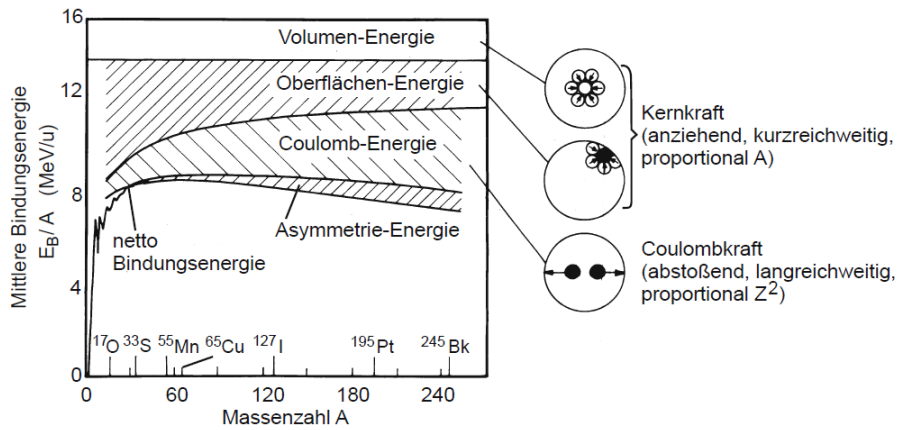


Abbildung 7: Bindungsenergie pro Nukleon als Funktion der Massenzahl [7]

Die Bindungsenergie E_B lässt sich als eine Summe von unterschiedlichen Beiträgen schreiben:

$$E_B = E_{B_1} + E_{B_2} + E_{B_3} + E_{B_4} + E_{B_5} \quad (6.1)$$

Die einzelnen Terme dieser Formel haben die folgende physikalische Bedeutung:

Volumenterm E_{B_1} . Die Kernbindungsenergie wird proportional zum Volumen V des Kerns angenommen und liefert den größten Beitrag zur Bindungsenergie:

$$E_B \sim A, \quad \text{d.h. } E_{B_1} = a_V A, \quad \text{mit } a_V > 0 \quad (6.2)$$

Da jedes zusätzliche Nukleon den gleichen Beitrag von a_V liefert, muss die Kernkraft kurzreichweitig sein und nur mit den Nachbarnukleonen wechselwirken. Daher ist auch die Nukleonendichte im Zentrum für fast alle Kerne gleich.

Oberflächenterm E_{B_2} . Die Nukleonen eines Kerns, die sich nahe der Oberfläche befinden, erfahren eine schwächere Bindung, so dass die Gesamtbindungsenergie um einen zur Oberfläche proportionalen Teil vermindert wird:

$$E_{B_2} = -a_O A^{2/3}, \quad \text{mit } a_O > 0 \quad (6.3)$$

Coulomb-Term E_{B_3} . Durch die Abstoßung der Protonen im Kern, aufgrund ihrer positiven Ladung, verringert sich ebenfalls die Bindungsenergie:

$$E_{B_3} = -a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}}, \quad \text{mit } a_C > 0 \quad (6.4)$$

Asymmetrieterm E_{B_4} . Oberhalb von ${}^{40}\text{Ca}$ werden Kerne mit gleicher Neutronen- und Protonenzahl instabil. Die stabilen Kerne benötigen eine größere Anzahl an Neutronen. Unter Berücksichtigung des Pauli-Prinzips, hat der Asymmetrieterm folgende Form:

$$E_{B_4} = \frac{-a_A(N - Z)^2}{A} \quad \text{mit } a_A > 0 \quad (6.5)$$

Paarungsterm E_{B_5} . Dieser Term ist mit verschiedenen Annahmen verbunden was zu folgenden Ausdrücken führt:

$$E_{B_5} = \pm a_P A^{-1/2} \quad \text{oder} \quad E_{B_5} = \pm a'_P A^{-3/4}, \quad \text{mit } a_P, a'_P > 0 \quad (6.6)$$

wobei a_P und a'_P jeweils unterschiedliche Konstanten sind. Kerne die eine ungerade Massenzahl A haben, haben ein ungepaartes Nukleon (sogenannte g_u - oder u_g -Kerne), demzufolge tritt hier keine Bindungsverstärkung auf. Bei u_u - bzw. g_g -Kernen erhalten wir eine Paarungsenergie, die bei geradem Z und geradem N einen positiven Wert der Konstante liefert. Bei ungeradem N und ungeradem Z wird diese Konstante negativ.

Zurzeit gelten für die Konstanten folgende Werte [7]:

$$\begin{aligned} a_V &= 15,5 \text{ MeV} & a_O &= 16,8 \text{ MeV} \\ a_C &= 0,715 \text{ MeV} & a_A &= 23 \text{ MeV} \\ a_P &= 11,3 \text{ MeV} & a'_P &= 33,4 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Diese Werte sind jeweils alles Mittelwerte, wobei viele Kerne wegen ihre innere Struktur individuelle Abweichungen davon zeigen.

6.1.2 Freiwerdende Energie bei Spaltung

Um die Energie E zu berechnen, die bei der Spaltung von Kernen frei wird, müssen zunächst die Spaltprodukte und deren Massenzahl des Ausgangsmaterials sowie die Bindungsenergien B_{S_1}, B_{S_2} der Spaltprodukte bekannt sein. Mittels

$$E = E_{B_{S_1}} + E_{B_{S_2}} - E_B \quad (6.7)$$

kann dann die Energie die bei der Spaltung freigesetzt wird abgeschätzt werden.

Beispiel: Uran-235 spaltet sich in Krypton-89 und Barium-144 auf. Mittels (6.1) wird die Bindungsenergie pro Nukleon für die einzelnen Nuklide berechnet. Wir erhalten für Uran-235 eine Bindungsenergie pro Nukleon von 7,6 MeV, für Krypton-89: 8,6 MeV und für Barium-144: 8,4 MeV. Insgesamt ergibt sich also eine freiwerdende Energie von

$$89 \cdot 8,6 \text{ MeV} + 144 \cdot 8,4 \text{ MeV} - 235 \cdot 7,6 \text{ MeV} = 198 \text{ MeV} \quad (6.8)$$

Addiert man nun noch die Energie hinzu die beim Betazerfall von Krypton (12 MeV) auftritt, so ergibt sich insgesamt eine nutzbare freiwerdende Energie von 210 MeV.

6.2 Berechnungen

6.2.1 Freiwerdende Energien

Den folgenden Ergebnissen liegen die in diesem Kapitel eingeführten Formeln zu Grunde. Unter der Verwendung von Tabelle 2, sowie typischen Spaltprodukten der Nuklide, werden einige Resultate in Näherung in der unten stehenden Tabelle 6 abgebildet. Es können nicht alle Spaltprodukte berücksichtigt werden, da für die meisten Nuklide aus Tabelle 2 keine Informationen über die einzelnen Spaltprodukte zu Grunde lagen. Es ergibt sich:

Nuklid	Spaltprodukte	Bindungsenergien [MeV]	freiwerdende Energie [MeV]
Pu-238	nicht spaltbar ⁶	k.A.	k.A.
Pu-239	Ba-144, Sr-94	7,6; 8,3; 8,6	187,2
Pu-240	nicht spaltbar	k.A.	k.A.
Pu-241	I-131, Rh-105	7,5; 8,4; 8,6	198,5
Pu-242	nicht spaltbar	k.A.	k.A.
Pu-244	nicht spaltbar	k.A.	k.A.
Am-241	Ag-111, Sb-127	7,5; 8,5; 8,4	206,1
Am-242	Ru-103, Xe-136	7,5; 8,6; 8,4	213,2
Cm-245	Ru-105, Ba-140	7,5; 8,6; 8,4	227,9

Tabelle 6: freiwerdende Energie bei Spaltung

Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen aus der Beispielrechnung, so erkennt man, dass die freiwerdende Energie der Spaltprodukte in etwa genauso hoch ist wie die freiwerdende Energie bei der Spaltung von Uran. Desweiteren wird jedoch auch deutlich, dass einige Isotope wie z.B Pu-238 nicht spaltbar sind. Hier müsste eine sehr hohe Energie aufgebracht werden um dieses Isotop zu vernichten. Führt man eine Abschätzung für diese Spaltprodukte nach dem Tröpfchenmodell aus, so erhält man für die nicht spaltbaren Produkte freiwerdende Energien die ebenfalls im Bereich von ca. 200 MeV liegen. Insgesamt beträgt somit die nutzbare freiwerdende Energie pro Spaltprodukt etwa 200 MeV.

⁶Energieabhängig

6.2.2 Benötigte Kraftwerke

Ein Beschleuniger getriebener Reaktor zur Transmutation von radioaktiven Abfall könnte 300 MW an Leistung in das öffentliche Netz einspeisen. Im Vergleich dieses Wertes mit den vorhandenen Kraftwerken aus Tabelle 5 kann der Beschleuniger getriebene Reaktor etwa ein Drittel der Leistung eines Kernkraftwerkes erbringen. Insgesamt erzeugen die 17 Kraftwerke der Bundesrepublik Deutschland eine Gesamtleistung von 21517 MW im Volllastbetrieb. Möchte man diese Leistung allein durch Beschleuniger getriebene Reaktoren decken so wären ca. 71 dieser Anlagen notwendig. Die Kosten für solch ein Projekt würden sich auf etwa 30 Mrd. Euro belaufen.

6.2.3 Abfallbeseitigung

Insgesamt produzieren die oben genannten Kernkraftwerke der Bundesrepublik Deutschland jährlich 370 Tonnen an radioaktiven Müll. Bei einer Reduzierung des Abfalls um jährlich 227 kg, wie es bei einem Beschleuniger getriebenen Reaktor vorgesehen ist, müssten in etwa 1630 solcher Anlagen errichtet werden um den jährlich anfallenden Müll zu beseitigen. Auf der anderen Seite, könnten die oben erwähnten 71 Anlagen ca. 285 Jahre aus dem bereits existierenden Müll, der allein in deutschen Kernkraftwerken angefallen ist, versorgt werden.

7 Fazit

Die Kernkraft stellt derzeit einen wichtigen Beitrag zur Deckung des weltweiten Energiebedarfs. Eines der wichtigsten Anliegen der Bevölkerung bei der Erzeugung von Kernenergie ist die langlebigen, hoch radioaktiver Abfälle, die bei dem Spaltungsprozess von Uran entstehen, zu beseitigen. Beschleuniger getriebene Reaktoren könnten durchaus eine Lösung für dieses Problem bieten und in naher Zukunft zur Verringerung des hoch radioaktiven Abfalls und dessen Lagerzeiten beitragen. Der Bau und Betrieb einer solchen ADS Anlage setzt jedoch weitere intensive Forschung voraus. So müssen z.B die Technologien zur Neutronenquelle verbessert und neue Verfahren zur Separation und Wiederaufarbeitung entwickelt werden, um diesen Prozess effizienter, effektiver und sicherer zu gestalten. Auch eine Optimierung der Leistung bzw. der Effizienz zur Abfallbeseitigung ist notwendig, da mit 227 kg pro Jahr eine zu geringe Menge an Abfall transmutiert werden kann.

Die Aussichten solch eine Anlage in naher Zukunft zu errichten stehen derzeit nicht schlecht, da sich verschiedene Projekte mit diesem Thema beschäftigen und schon einige neue Erkenntnisse gewonnen haben. Dennoch stehen noch immer viele wichtige offene Fragen im Raum. So wird diskutiert ob diese Technik sauber beherrschbar ist oder wie eine sichere Aufbereitung gewährleistet werden kann. Ebenso setzt die präzise Kontrolle der Kettenreaktion im subkritischen Reaktor eine genaue Kenntnis der Reaktionseigenschaft aller Nuklide voraus, welche noch zum Teil zu erforschen ist. Über die Finanzierung solch eines großen Projektes herrscht ebenfalls noch Unklarheit. Würden diese Fragen geklärt und das Konzept zu Beschleuniger getriebenen Anlagen in naher Zukunft umsetzbar sein, so könnten diese Anlagen durchaus als Ersatz für die heutigen Kernkraftwerke und zur Verringerung des radioaktiven Abfalls verwendet werden.

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt Deutschland
http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2007/01/PD07_021_p001,templateId=renderPrint.psml
Stand 30.08.2010
- [2] M. Volkmer: "Kernenergie Basiswissen", 2002. Inforum Verlag Berlin
- [3] M. Dahlfors, 2006. Studies of Accelerator-Driven Systems for Transmutation of Nuclear Waste. Acta Universitatis Upsaliensis. digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 146. x+52pp. Uppsala
http://www.bfs.de/de/kerntechnik/ereignisse/standorte/karte_kw.html
Stand 30.04.2010
- [4] J.U. Nebel, G. Heusener
Research on Transmutation an Accelerator-Driven Systems at Forschungszentrum Karlsruhe, Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Heft 6, Juni 2000
- [5] C. D. Bowman. 1998. Accelerator-Driven Systems for Nuclear Waste Transmutation. Annu. Rev. Part. Sci. 48:505-56
- [6] http://www.rp-online.de/wirtschaft/Atomkraftwerke-in-Deutschland_bid_25341.html Stand 1.09.2010
- [7] K. Bethge, G. Walter, B. Wiedmann, 2008. Kernphysik. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [8] Bundesamt für Strahlenschutz,
http://www.bfs.de/de/kerntechnik/ereignisse/standorte/karte_kw.html
Stand 30.04.2010
- [9] H. Niefenecker et al. 2001. Basics of accelerator driven subcritical reactors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 463 428-467
- [10] K. H. Neeb. 1997. The Radiochemistry of Nuclear Power Plants with Light Water Reactors. Berlin ; New York : de Gruyter
- [11] E.A.C Crouch. 1977. Fission-product yields from neutron-induced fission. Atomic data and nuclear data tables 19, 417-532
- [12] Chart of nuclides. <http://www.nndc.bnl.gov/chart/> Stand 17.05.2010

- [13] W. Cottingham and D. Greenwood 2007. An introduction to nuclear physics. second edition. Cambridge Univ. Press
- [14] W. Demtröder. 2010. Experimentalphysik 4. 3 Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [15] Transmutation und Inzineration radioaktiver Abfälle. GSI-Nachrichten 2/99. <http://www.gsi.de/documents/DOC-2003-Jun-32-2.pdf> Stand 16.06.2010
- [16] R. Brandt, W. Westmeier. 2007. Angewandte Forschung zum Thema Transmutation. Kernchemie im FB, Philipps-Universität, Marburg

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Prof. Dr. Schwarz bedanken, der mich auf das Thema gebracht und mich während meiner Bachelorarbeit betreut und umfangreich unterstützt hat. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof Borghini, für die hilfreichen Informationen. Außerdem möchte ich mich herzlich bei Herrn Straub für die Unterstützung bedanken und bei Maik Stuke für die interessanten Beiträge und Änderungsvorschläge. Ein weiterer Dank geht an Anne Wolff, die sich bereit erklärt hat diese Arbeit Korrektur zu lesen.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Bielefeld, den 10. September 2010

Unterschrift