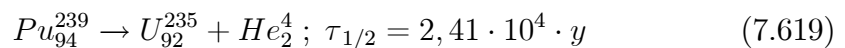


Abb. 32 Massenzahlverteilung der Spaltprodukte bei der Uranspaltung (Quelle: Wikimedia-Commons; das Bild unterliegt der License CC BY-SA 3.0; der Autor ist Mubs)

4. Pu_{94}^{239} zerfällt spontan, aber mit einer sehr langen Halbwertszeit:



Die übrigen Pu_{94}^{239} -Kernen sind entweder noch als solche in dem abgebrannten Brennstab vorhanden oder sie sind bereits in andere Transurane umgewandelt worden.

(XXX: Der weitere diese Abb. erläuternde Text ist noch nicht verfügbar.)

Risiken des Kernspaltungsreaktors (-/-)

(XXX: Der Text des Absatzes *Risiken des Kernspaltungsreaktors* ist noch nicht verfügbar.)

7.17.4 Die Lagerung radioaktiver Abfälle (-)

Jede kernphysikalische Aktivität erzeugt radioaktiven Abfall: Jedes Experiment in einem kernphysikalischen Labor, jeder Einsatz einer kernphysikalischen Methode der medizinischen Diagnostik oder Therapie, jede Forschungstätigkeit zur Entwicklung neuer Technologien zur kommerziellen oder militärischen Nutzung der Kernenergie. Von der Menge an anfallendem radioaktiven Abfall primär relevant ist aber

der **Betrieb** der bereits im technischen Einsatz befindlichen Kernkraftwerke (s. Abschnitt 7.17.3), aber genau so die bergmännische Gewinnung von uranhaltigen Erzen sowie deren Aufarbeitung zu ausreichend reinem Uran und dessen Weiterverarbeitung zu den sog. *Brennstäben*. Insbesondere die zuletzt genannten kernphysikalischen Prozesse erzeugen in den für sie entwickelten Apparaturen ständig neues radioaktives Material. Außerdem verändern die radioaktiven Bestrahlungen das Arbeitsmaterial des Prozesses in einer Weise, dass es ständig oder zumindest im Zuge einer regelmäßigen Wartung aus der Apparatur entfernt werden muss, um die typgemäße Funktion der Apparatur wieder gewährleisten zu können. Alle diese Abfälle sind i.a. hoch-radioaktiv. Außerdem muss die Umwelt auf Dauer verlässlich gegenüber der in dieser Apparatur auftretenden radioaktiven Strahlung abgeschirmt werden. Diese die gesamte Apparatur umschließende Abschirmhülle ist während des gesamten Betriebs der Apparatur dieser radioaktiven Strahlung ausgesetzt und wird daher, zumindest in ihrer innersten Schicht, im Laufe der Betriebszeit zunehmend selbst radioaktiv. Bei jeder Stilllegung und bei jedem darauf folgenden Abriss fällt also ebenfalls radioaktiver Abfall an. Dieser aus der kontrollierten Stilllegung von Anlagen herrührende Abfall ist i.a. nur mäßig radioaktiv. Schließlich existiert aktuell weltweit eine nicht unerhebliche Menge von radioaktivem Abfall, der durch verschiedene Sünden der Vergangenheit entstanden ist und wohl auch in der Gegenwart neu entsteht und in der nahen Zukunft weiter entstehen wird:

- Radioaktiv verseuchte Böden auf dem Gelände früherer kernphysikalischer Forschungs- und Produktionsstätten. Als ein typisches Beispiel nenne ich die sog. *Hanford Site* im Staat Washington (USA), ein Gelände von ca. $1,5 \cdot 10^3 \cdot km^2$. Dort wurde ab 1943 Plutonium zur Herstellung von Kernspaltungsbomben produziert. Seit einigen Jahren ist ein Konsortium privater Firmen damit beauftragt, das Gelände soweit zu sanieren, dass es wieder zur allgemeinen Nutzung freigegeben werden kann. Diese Einzelmaßnahme kostet z.Zt. ca. $2 \cdot 10^9 \cdot US\$/y$. In welcher Form die dabei entstehenden radioaktiven Abfälle gelagert/entsorgt werden, ist mir nicht bekannt.
- Radioaktiv verseuchte Böden und Pflanzen auf dem Gelände früherer Atomwaffen-Tests. Als typisches Beispiel nenne ich das Muroroa-Atoll, eine zu Französisch-Polynesien gehörende unbewohnte ca. $300 \cdot km^2$ große Insel im Süd-Pazifik. Frankreich führte hier in der Zeit von 1966 bis 1996 insgesamt 188 Kernwaffen-Tests durch, davon 41 in der Atmosphäre. Die Insel ist bis heute Sperrgebiet, eine Sanierung ist b.a.w. nicht vorgesehen. Überdies lagern in unterirdischen Schächten dieser Insel wahrscheinlich große Mengen an radioaktiven Abfällen.
- Radioaktiv verseuchte Abraumhalden neben den Bergbaugeländen zur Gewinnung von Uran-haltigen Erzen. Als ein typisches Beispiel nenne ich das Gelände der früheren *SDAG* (Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft) *Wismut* im südlichen Sachsen und Thüringen. Während des von 1945 bis 1990 andauernden

Betriebes einer Vielzahl von Förderstellen und Aufbereitungsanlagen wurden insgesamt ca. $2,3 \cdot 10^5 \cdot t$ Uran dargestellt und dabei $3,1 \cdot 10^8 \cdot m^3$ Abraum und $1,5 \cdot 10^8 \cdot m^3$ Aufbereitungsrückstände erzeugt. Das hiervon betroffene Gelände umfasst ca. $37 \cdot km^2$. Seit 1990 wird das Gelände durch die staatliche Wismut GmbH saniert. Die hierfür bisher (2010) angelaufenen Kosten betragen $6,2 \cdot 10^9 \cdot Euro$.

- Unsachgemäße Lagerung von radioaktiven Alt-Abfällen. Als ein typisches Beispiel nenne ich das stillgelegte Salzbergwerk Asse II nahe Wolfenbüttel (Niedersachsen). Dieses wurde in den Jahren 1967 bis 1978 zur Einlagerung von (angeblich) schwach bis mittel-radioaktiven Abfällen eingesetzt. Heute ist bekannt, dass insgesamt etwa 16.100 Stahlfässer von jeweils $0,2 \cdot m^3$ unter z.T. chaotischen Umständen (s. Abb. 33) in diese Schachtanlage eingelagert wurden. Die



Abb. 33 Lagerung von Stahlfässern mit radioaktiven Abfällen in das Salzbergwerk Asse II (Wolfenbüttel/Niedersachsen)

Mehrzahl dieser Fässer wurde nicht ordnungsgemäß erfasst, so dass ihr genauer Inhalt nicht bekannt ist. Den Inhalt an Plutonium in diesen Fässern schätzt man auf insgesamt ca. $28 \cdot kg$. Heute wird an einem Rückholungskonzept für diese Abfälle gearbeitet. Die Behörden veranschlagen die dafür erforderlichen Kosten auf $2 \cdot 10^9 \cdot Euro$, andere Experten veranschlagen bis zu $6 \cdot 10^9 \cdot Euro$.

- Der Verbleib sämtlicher bisher verschrotteter atomarer Waffen, insbesondere der Raketen-Sprengköpfe, ist der Öffentlichkeit weitgehend unbekannt. Dies gilt sowohl für die im Zuge einer Modernisierung **ausgemusterten** Waffen als auch für die auf Grund von Abrüstungs-Abkommen **verschrotteten** Waffen.

Es gibt gute Gründe anzunehmen, dass der daraus entstandene hochradioaktive Abfall immer noch in Zwischenlagern versteckt ist, deren Ort und Umfang der Öffentlichkeit nicht bekannt ist.

- Es gibt berechtigte Zweifel, ob die derzeit in Betrieb befindlichen Anlagen zur Wiederaufbereitung abgebrannter Brennstäbe von Kernspaltungs-Reaktoren alle während dieses Betriebes anfallenden mehr oder weniger stark radioaktiven Abfälle einer ordnungsgemäßen, auf unbegrenzte Dauer angelegten Lagerung zuführen und in Zukunft zuführen werden. Es handelt sich insbesondere um die Anlagen in La Hague in der Normandie (Frankreich), Sellafield an der irischen See (England) und Majak und Tomsk (Russland). Z.B. ist sowohl von Sellafield wie von La Hague bekannt, dass die dortigen Betreiber in erheblichem Umfang radioaktiv verseuchte Flüssigkeiten in das Meer ablassen.
- Schließlich ist in vielen Fällen nicht klar, wo und unter welchen Bedingungen die (noch) nicht einer Wiederaufbereitung zugeführten abgebrannten Brennstäbe von Kernspaltungs-Reaktoren gelagert werden. Dieser Aspekt ist sehr ernst zu nehmen, zumal in den meisten Ländern keine Wiederaufarbeitungsanlage (mehr) betrieben wird. So wurde 2009 bekannt, dass der Betreiber der französischen Kernspaltungs-Reaktoren, die Fa. EDF (**E**lectricité **d**e **F**rance) einen signifikanten Anteil (ca. 13%) seiner abgebrannten, nicht aufgearbeiteten Brennstäbe nach Russland versandt hat. Dort lagern sie z.Zt. ungesichert unter freiem Himmel im Zentrum der sibirischen Stadt Sewersk (früher Tomsk 7) ([32]).

Kernphysikalische Prozesse laufen auf einer Energieskala $\geq 1 \cdot \text{MeV}$ ab, während die typischen Energien chemischer Umwandlungen im Bereich $10 \cdot \text{eV}$ und die mit konventionellen verfahrenstechnischen Methoden verfügbaren Energien im Bereich $0,05 \cdot \text{eV}$ liegen. Es ist daher nicht überraschend, dass bis heute keine Möglichkeit gefunden wurde, die radioaktiven Zerfallsprozesse in radioaktiven Abfällen durch derartige konventionelle Techniken auch nur geringfügig zu beeinflussen. Die einzige heute verfügbare Technik der sog. *Entsorgung* besteht also darin, diese Abfälle kontrolliert zu lagern und gegenüber der vor einer radioaktiven Kontaminierung zu schützenden Umwelt ausreichend abzuschirmen. Mit dem Wort *kontrolliert* meine ich an dieser Stelle, dass

- die genaue Zusammensetzung einer jeden eingelagerten Verpackungseinheit dokumentiert ist;
- der genaue Ort der Einlagerung einer jeden dieser Einheiten ebenfalls dokumentiert ist;
- insbesondere jede dieser Einheiten gezielt wieder aus diesem Lager entnommen werden kann, z.B. um deren schadhaft gewordene Umhüllung zu erneuern.

Diese Vorgehensweise ist jedoch gerade **keine** Entsorgung, sondern lediglich eine Verschiebung der Problemlösung in die (ferne) Zukunft. Überdies werden diese 3 Voraussetzungen, die aus meiner Sicht unverzichtbar sind für eine als kontrolliert qualifizierbare Langzeitlagerung, von den aktuell benutzten oder auch nur diskutierten Lagerstätten **nicht erfüllt**. Die Mindestdauer, über die diese Abfälle auf diese Weise kontrolliert gelagert werden müssen, ergibt sich aus der Zusammensetzung und den relativen Anteilen der in diesen radioaktiven Abfällen jeweils vorhandenen radioaktiven Isotope. Diese Daten hängen stark von der Art der Apparatur ab, die diesen Abfall erzeugt hat. So enthalten die Abfälle, die bei der medizinischen Anwendung kernphysikalischer Techniken entstehen, meist ausschliesslich kurzlebige radioaktive Isotope. Abfälle, die beim Betrieb von Kernreaktoren entstehen, enthalten dagegen immer die ganze Breite der möglichen Quellen für radioaktive Strahlung. Allerdings lässt sich durch eine geschickte Wahl der eingesetzten Materialien in gewissen Grenzen Einfluss nehmen auf die relativen Anteile der jeweils vorhandenen radioaktiven Isotope. Man hat also grundsätzlich die Möglichkeit, Abfälle, die ausschließlich kurzlebige radioaktive Isotope enthalten, auszusortieren und getrennt zu lagern. Für sie ist dann z.B. eine Dauer der kontrollierten Lagerung von $20 \cdot y$ ausreichend.

Die übrigen Abfälle, die auch radioaktive Isotope mit einer Lebensdauer von $10^2 \dots 10^9 \cdot y$ enthalten, müssen auf **unbegrenzte Dauer** kontrolliert und gegenüber der Umwelt abgeschirmt gelagert werden. Die derzeit immer noch diskutierten Konzepte, diese Abfälle in dafür geeigneten geologischen Schichten ausreichend tief unterhalb der Erdoberfläche zu **deponieren**, halte ich persönlich für **unverantwortlich**. Denn es handelt sich hierbei um eine **unkontrollierte, unumkehrbare** Lagerung. Und ich bezweifle, dass die genaue geologische Entwicklung eines bestimmten ausgewählten Bereichs der Erdkruste bis in eine Zeit der Größenordnung von (z.B.) $10^5 \cdot y$ verlässlich vorhergesagt werden kann.

Das Problem der Entsorgung oder Endlagerung radioaktiver Abfälle ist also weiterhin ungelöst. Und dies trotz der bereits ca. $60 \cdot y$ technischer und kommerzieller Nutzung der Kernenergie. Die USA planten ein Endlager für radioaktive Abfälle in den Yucca Mountains/Nevada. Als voraussichtliche Gesamtkosten für dieses Projekt wurden $58 \cdot 10^9 \cdot US\$$ veranschlagt. U.a. wegen massiver Widerstände des Gouverneurs und der Bevölkerung des Staates Nevada wurde dieses Projekt 2011 durch Beschluss der Bundesregierung gestoppt. Aktuell lagern die abgebrannten Kernbrennstoffmaterialien überwiegend in den Anlagen der Kernreaktoren der USA. Ihre Menge schätzt man aktuell (2012) auf $6,8 \cdot 10^4 \cdot t$. Dieser Wert steigt jährlich um etwa $2 \cdot 10^3 \cdot t$.

Eine der wenigen zumindest denkbaren Alternativen zum Konzept der andauernden kontrollierten Lagerung ist die sog. *Transmutation*. Dieses über lange Zeit nur als Gedankenexperiment diskutierte Konzept baut auf der Erkenntnis auf, dass es (zum Glück) nur wenige Elemente gibt, für die ein langlebiges radioaktives Isotop existiert, also mit einer Halbwertszeit von (z.B.) $> 40 \cdot y$. S. hierzu die Tab. auf S. 811 im Kapitel 7.20. Auffällig ist, dass - bis auf ganz wenige Ausnahmen - alle diese Elemente **Metalle** sind. Ich sehe mich z.Zt. nicht in der Lage, hierfür

eine plausible Erklärung anzubieten. Vermutlich hängt dies damit zusammen, dass das Prinzip des konstruktiven Aufbaus der Elektronenhülle der Atome einerseits und das der Atomkerne andererseits verwandten Regeln gehorcht. Für die nachfolgend diskutierte Abtrennung dieser Elemente dürfte sich diese Tatsache jedoch bzgl. einer technischen Umsetzung als sehr hilfreich erweisen.

Für die weitere Diskussion werde ich diese Elemente als LRE (**L**angzeit-**r**adioaktive **E**lemente) bezeichnen. Es ist daher folgende Sequenz von Schritten zur Aufarbeitung radioaktiver Abfälle denkbar:

1. Zwischenlagerung der Primär-Abfälle für eine Abklingzeit von (z.B.) $10 \cdot y$. Dieser Schritt dient primär dem Schutz des Bedienungspersonals für die Anlagen, die zur Durchführung der nachfolgenden Schritte erforderlich sind.
2. Chemische Trennung der Abfälle in den LRE-freien Anteil und in den LRE-haltigen Rest. Hier kann man vermutlich auf chemisch-verfahrenstechnische Prozesse zurückgreifen, die aus der Metallurgie bekannt sind.
3. Zwischenlagerung des LRE-freien Anteils der Primär-Abfälle für eine weitere Abklingzeit von (z.B.) $30 \cdot y$. Danach können diese Abfälle ohne Risiko wiederverwendet oder deponiert werden.
4. Bestrahlung des LRE-haltigen Anteils mit einem Neutronenstrahl geeigneter Neutronen-Energie und Strahl-Intensität, z.B. in einem speziell hierfür konzipierten Kernreaktor. Hierdurch werden (auch) die LRE-Elemente überwiegend in andere Elemente umgewandelt, also überwiegend in Nicht-LRE-Elemente.
5. Wiederaufnahme dieses derart bestrahlten Materials in das Zwischenlager für Primär-Abfälle.

Ein *Endlager* im eigentlichen Sinne ist in diesem Konzept nicht mehr vorgesehen.

Dieses Konzept hat inzwischen den Status des Gedankenexperimentes verlassen. Es gibt heute (2010) 2 große Forschungsprojekte, die sich mit diesem Konzept befassen:

1. das Projekt EUROTRANS (**E**uropean **R**esearch **P**rogramme for the **T**ransmutation of High-Level-**N**uclear Waste) am KIT (**K**arlsruhe **I**nstitut of **T**echnology);
2. das Projekt MYRRHA (**m**ulti-**p**urpose-**h**ybrid **r**esearch **r**eactor for **h**igh-tech **a**pplications) am SCK/CEN (**s**tudie **c**entrum voor **k**eernenergie / **c**entre d'études de l'énergie **n**ucleaire) in Mol/Belgien ([34]). ^{‡‡}

^{‡‡}Myrrha ist aber auch eine Figur aus der griechischen Mythologie: Myrrha war die Mutter des Adonis, der aber durch Myrrhas Vater gezeugt wurde. Wegen der Verführung ihres eigenen Vaters wurde Myrrha von den Göttern bitter bestraft.

Es bleibt abzuwarten, ob und mit welchem Kostenaufwand dieses Konzept in die technische Realität umsetzbar ist, insbesondere in den erforderlichen großtechnischen Maßstab. Dabei könnte es sich als sinnvoll herausstellen, als Vorstufe zur Lösung dieser Aufgabe zunächst die Abtrennung der LRE-haltigen Abfallanteile zu erforschen. Sobald wenigstens dieser Arbeitsschritt sicher beherrscht wird, wäre man wenigstens schon in der Lage, die Menge des auf Dauer zu lagernden Abfalls deutlich zu reduzieren.

Für die Zeit bis zur erfolgreichen technischen Anwendung dieses Konzeptes (oder eines anderen) sehe ich als verantwortbare (Zwischen-)Lösung des Problems der sicheren Lagerung radioaktiver Abfälle an:

- b.a.w. unbefristete Lagerung der Abfälle in vorzugsweise oberirdisch errichteten Zwischenlagerstätten.
- Das Sicherheitskonzept dieser Zwischenlager könnte sich weitgehend an den schon jetzt z.B. in Deutschland für abgebrannte Kernreaktor-Brennelemente für die ersten 40 Jahren nach dem Ende ihres technischen Einsatzes vorgeschriebenen Lagerstätten orientieren.
- Die Kosten für diese **auf Dauer** konzipierte Lagerung sollte der Kernkraftwerksbetreiber tragen.

Ich vermute, dass bereits allein durch diese Maßnahme der aus KKW's erzeugte elektrische Energiestrom auf dem Markt nicht mehr konkurrenzfähig wäre.

Zur Problematik der Endlagerung radioaktiver Abfälle s. auch die Aufgabe 17.

7.17.5 Nuklearmedizin (-/-)

(XXX: Der Kopftext des Abschnitts *Nuklearmedizin* ist noch nicht verfügbar.)

Nuklearmedizinische Diagnostik (-/-)

(XXX: Der Kopftext des Absatzes Nuklearmedizinische Diagnostik ist noch nicht verfügbar.)

HDP-Scintigraphie (-/-) (XXX: Der Text des Unterabsatzes *HDP-Scintigraphie* ist noch nicht verfügbar. Er wird auch die nachfolgende Abb. 34 und den sie erläuternden Text enthalten.) Das jeweils linke Bild ist eine Aufnahme der Frontseite und das rechte eine Aufnahme mit Blick auf die Rückseite des Patienten.

Ist dieser Mythos wirklich ein guter Omen für ein ehrgeiziges Forschungsprojekt (und für die beteiligten Forscher)? Das Kind wird einmal allseits bewundert werden, aber deren Erzeuger werden bitter bestraft!?