

RC-11

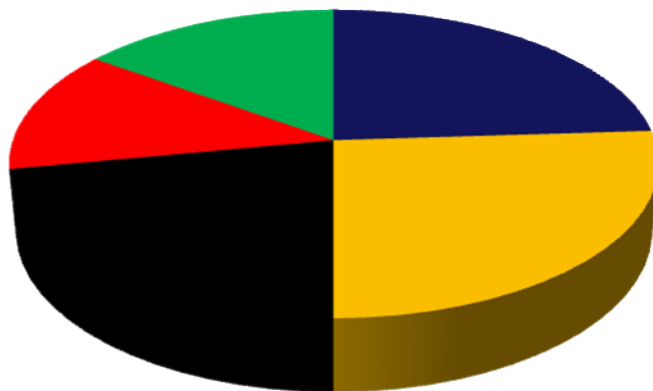


6. Nukleare Entsorgung

6.1 Kernenergie und „Ausstieg“

Bruttostromerzeugung in D., Energiewandel

2006



637 TWh

2014



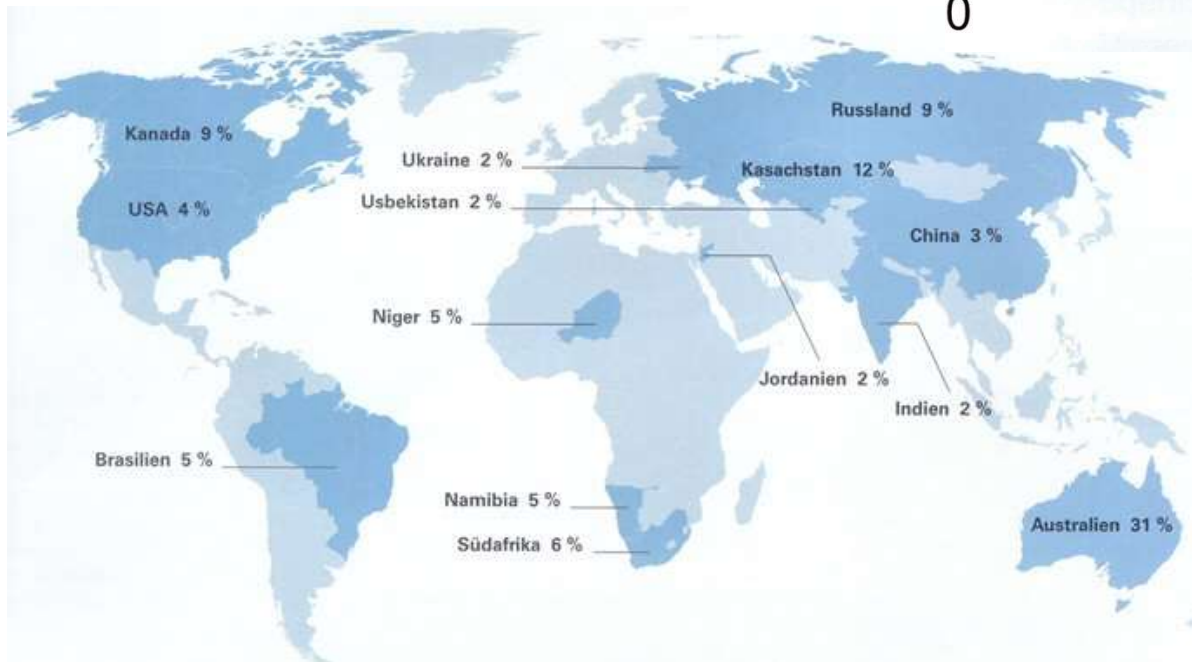
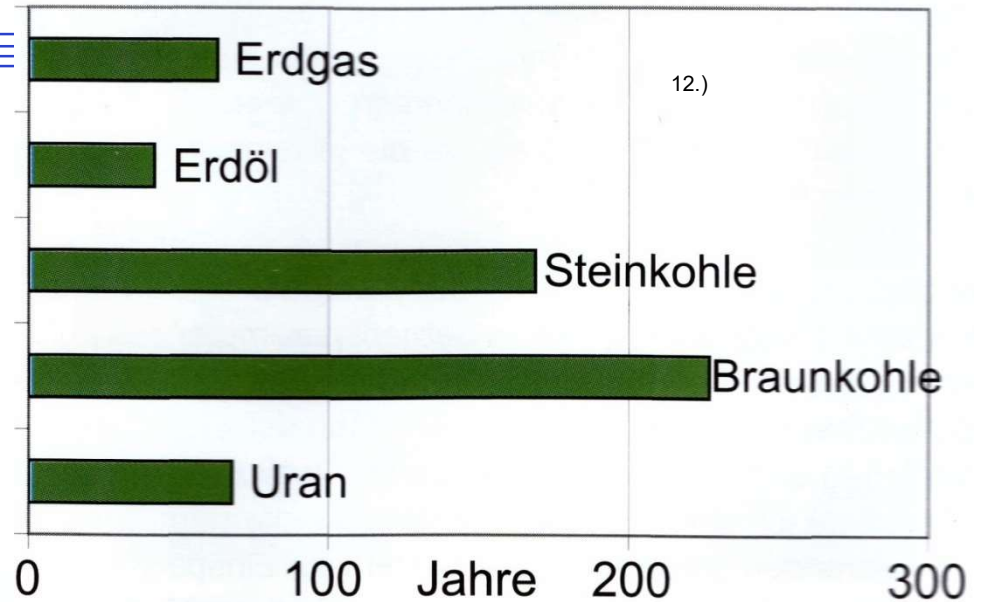
614 TWh

Statische Reichweite von Energieträgern



Sonne
2-3 Mrd. Jahre

Uranressourcen

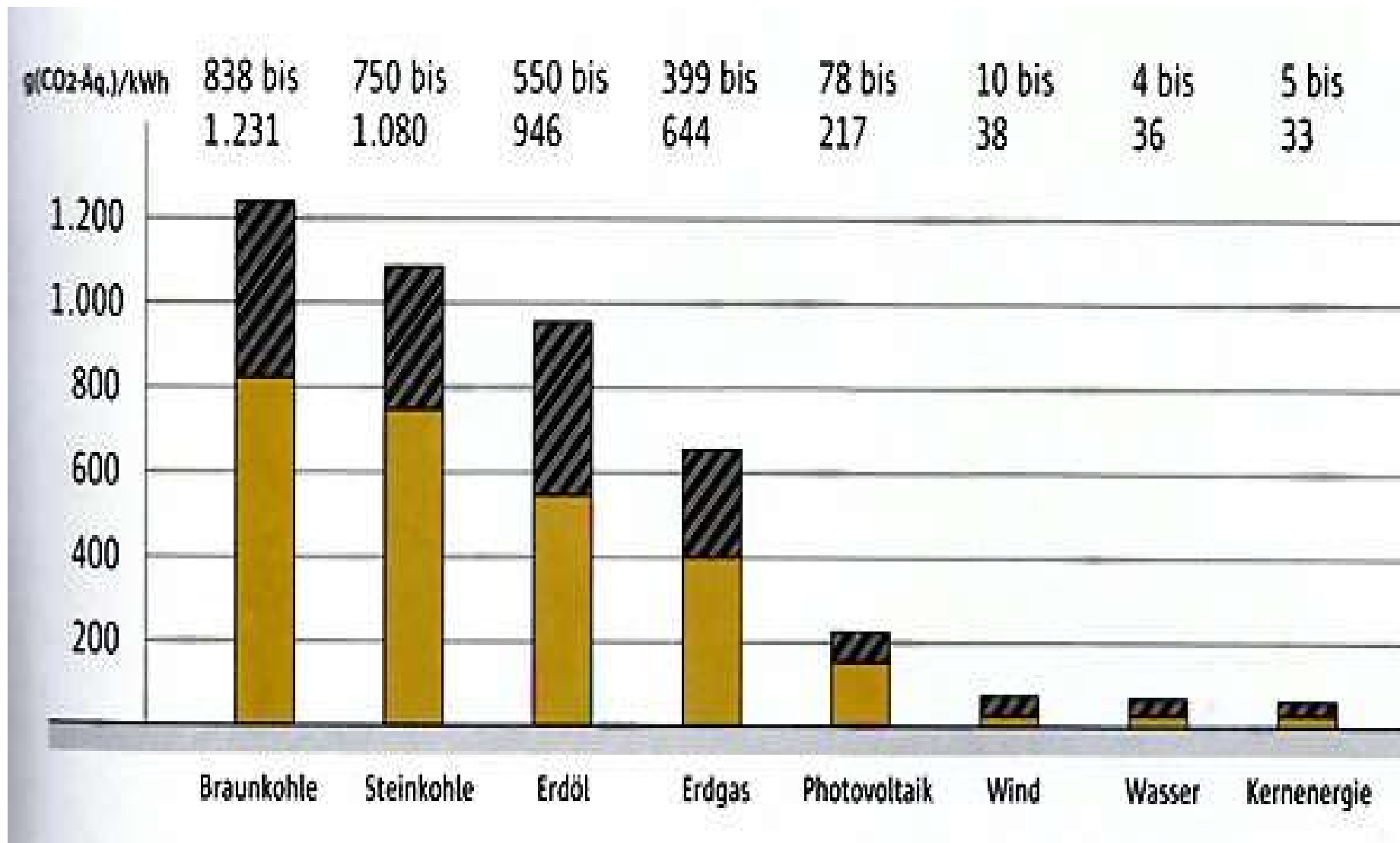


Quelle: OECD NEA/IAEA 2010

© DAIF

Kernfusion?

Treibhausgasemissionen verschiedener Energieträger unter Berücksichtigung der Lebenszyklus-Analyse



Kernenergienutzung in D

- Derzeitiger Stand -

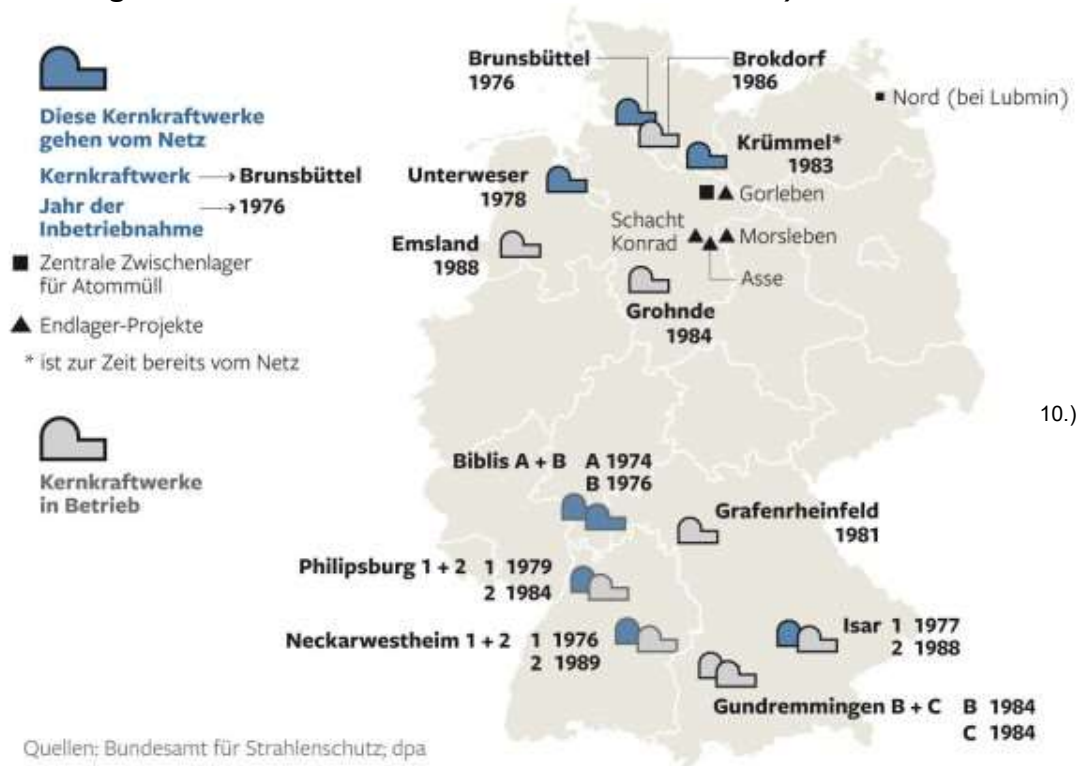
Konsequenz aus Reaktorkatastrophe in Fukushima :

Beschlüsse des Bundeskabinetts :

- 2011 Änderung des Atomgesetzes
- 2012 Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen.
- Die sieben ältesten Kernkraftwerke und das Kernkraftwerk Krümmel dürfen seit 6. August 2011 nicht mehr betrieben werden,
- Übrige Kernkraftwerke gehen, zeitlich gestaffelt, bis spätestens 2022 vom Netz
(Bundesgesetzblatt Nr. 43 vom 05.08.2011, Seite 1704)



Fukushima Daiichi Reaktoren
(Spiegel.de)



Atomausstieg

Fakt:

Als erste Industrienation der Welt,
die Kernenergie anwendete,
will Deutschland auf Kernenergie verzichten.
Das letzte Kernkraftwerk soll bis spätestens
2022 vom Netz.

Konsequenzen?

Kernkraftwerk Neckarwestheim I und II



Aktuelle Problematik

Energiewende/Kernenergieausstieg

- Endlagerung Nuklearer Abfälle weiter zeitlich gestreckt, damit Probleme der Zwischenlagerung
- Technik des Abbaus von KKW weiter entwickeln
- D. weiter von KKW umgeben

- Grundlasterzeugung
- Schnellstartende und leicht regelbare Kraftwerke erforderlich
- Ausbau des Stromnetzes, Nord-Süd-Trassen
- Energiespeicher
- Funktionierender Energiemarkt und Verbund

Im Jahr 2013 wurden insgesamt 77,3 TWh Strom von Deutschland in benachbarte Länder (NL, A) exportiert, importiert hingegen 43,0 TWh. (Nettoimport aus Tschechien Schweden und Polen)

6.2 Radioaktiver Abfall und Abbau von Kernanlagen

Ausstieg: Stilllegung kerntechnischer Anlagen

- Erreichen der Auslegungsbetriebszeit
- Unwirtschaftlichkeit
- Sicherheitsbedenken
- Störfall
- „politischer Wille“

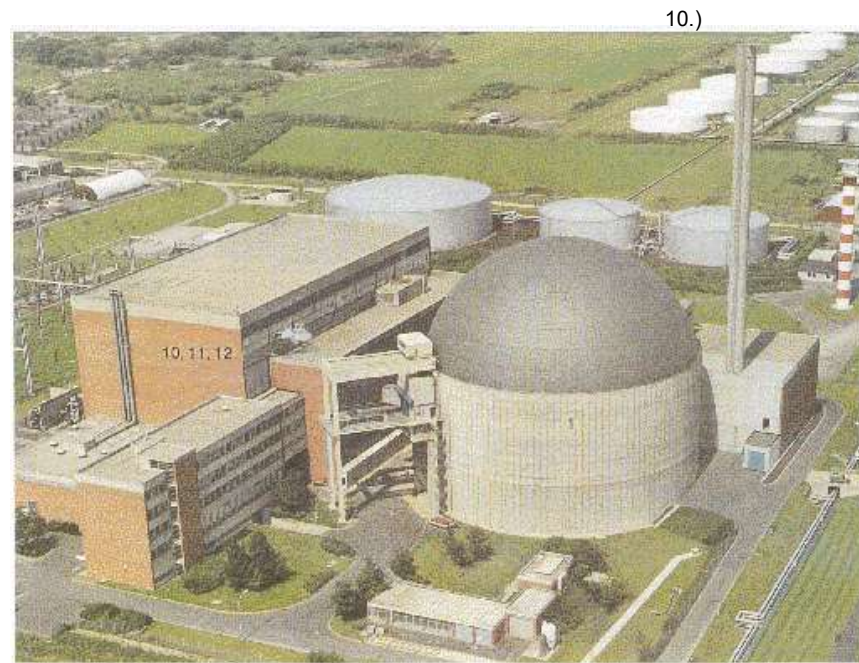


Bild 23: Kernkraftwerk Stade (Druckwasserreaktor)

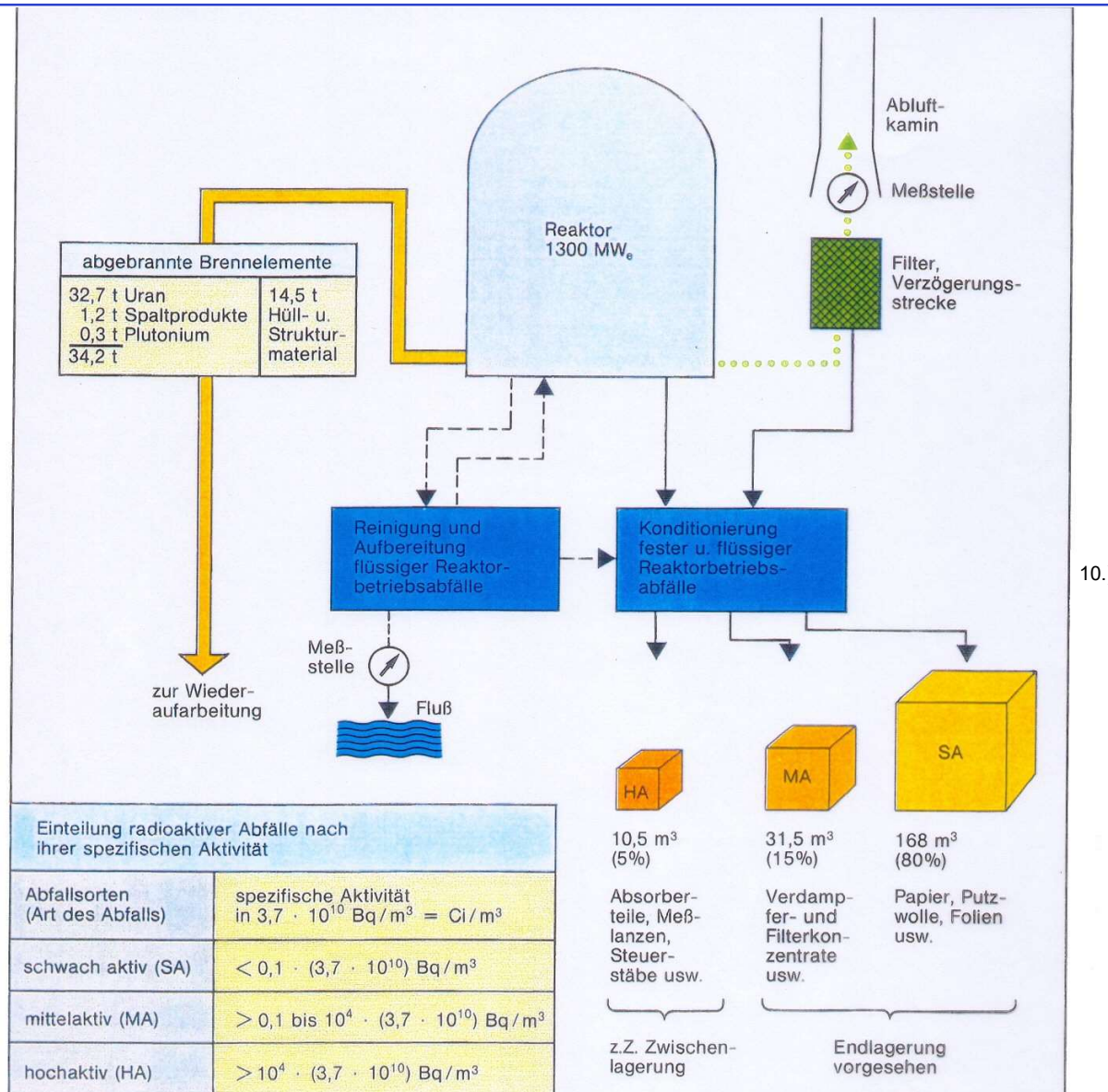


Radioaktive Abfälle bei Betrieb und Stilllegung

Stilllegung und Abbau von kerntechnischen Anlagen

- Stilllegung ist bei konventionellen wie auch bei kerntechnischen Anlagen eine betriebliche Notwendigkeit
- Unterschiede zu konventionellen Anlagen bestehen im Aufwand für den radiologischen Schutz der Bevölkerung und Umwelt (Strompreis beinhaltet bei KKW Rückstellungen für sachgerechte Entsorgung)
- dem Rückbau der Anlage ist meist der „Sichere Einschluss“ vorgeschaltet
 - *sicherer Einschluss: sichere Verwahrung der Anlage für längere Zeiträume
- Stilllegung im rechtlichen Sinne
 - * dauernde und endgültige Betriebseinstellung
- Stilllegung im technischen Sinne
 - * alle technischen und genehmigungsrechtlichen Maßnahmen nach der endgültigen Abschaltung einschließlich der Beseitigung

Jährlicher Anfall von festen Reaktorbetriebsabfällen und abgebrannten Brennelementen (vereinfachtes Schema)



10.)

Stilllegung KK Niedereichbach

- **Demonstration des vollständigen Rückbaus eines aktivierten Leistungsreaktors**
- **CO₂-gekühlter, D₂O moderierter Druckröhrenreaktor für Natururan**
- **Errichtung von 1966-1972, Mitte 1974 abgeschaltet**
- **100 MW, nach 1,5 Jahren abgeschaltet**
- **Sicherer Einschluss 1983 hergestellt**
- **Ab 1987 Abbau, Abschluss „Grüne Wiese“ 1997**
- **Kosten ca. 280 Mio DM, Modellcharakter, bei anderen KKW mit ca. 500 Mio DM Kosten zu rechnen**

„Atommüll“

Was ist Radioaktiver und Nuklearer Abfall?

Radioaktiver Abfall:

jegliche radioaktiv kontaminierte, bei Betrieb und Abbau von Kernanlagen und den Umgang mit radioaktiven Stoffen anfallenden Reststoffe, die nicht dekontaminierbar und damit nicht wiederverwendbar sind.

- aktivierte, bzw. kontaminierte Bauteile von Reaktoren, Kernanlagen und Produktionsanlagen für radioaktive Isotope
- anfallende radioaktive Abfälle aus nuklearmedizinischer, industrieller und forschungsseitiger Anwendung
- konzentrierte Prozessabfälle bei der Urangewinnung und Aufarbeitung

Nuklearer Abfall:

- abgebrannte Brennelemente der Reaktoren
- radioaktive Prozessabfälle (Glaskokillen), die bei der Wiederaufbereitung von Brennelementen entstehen

Radioaktiver Abfall (Charakteristik)

- Toxizität ist im wesentlichen durch die von den radioaktiven Nukliden ausgesandte Strahlung (Art, Energie) bestimmt
- Radioaktivität nimmt nach physikalischer Gesetzmäßigkeit im Laufe der Zeit ab, Halbwertszeit für endlagerrelevante Radionuklide von wenigen Jahren bis mehrere zehntausend Jahre
- Charakterisierung nach Radioaktivitätsinventar, Radiotoxizität Actinidgehalt und Wärmeentwicklung
 - ⇒ **hoch-, mittel- und schwachradioaktiv**
- durch geeignete Konditionierung Überführung in zwischen- und endlagerfähige Form (Behandlung, Fixierung, Verpackung)
 - ⇒ **Abfallgebinde**
- Abgabe, Zwischen- und Endlagerung geregelt

Klassifizierung radioaktiver Abfälle I

- *(Radio-) Toxizität ist im wesentlichen durch die von den radioaktiven Nukliden ausgesandte Strahlung (Halbwertszeit, Art, Energie, Höhe der Radioaktivität) und dem Bioverhalten bestimmt*

- Niedrig aktiver Abfall (NAA):**
- geringere Aktivität
 - keine Alpha-Strahler
 - keine zusätzliche Strahlenabschirmung notwendig
 - Unterteilung in kurz- und langlebigen Abfall
 - Angabe in m³

Grenze: 10¹⁰ bis 10¹¹ Bq/m³

- Mittel aktiver Abfall (MAA):**
- erhöhte Aktivität
 - Alpha-Strahler können vorhanden sein
 - Wärmeentwicklung vernachlässigbar
 - Strahlenabschirmung notwendig
 - Unterteilung in kurz- und langlebigen Abfall
 - Angabe in m³

Grenze: 10¹⁴ bis 10¹⁵ Bq/m³

- Hoch aktiver Abfall (HAA):**
„Nuklearer Abfall“
- hohe Aktivität
 - Alpha-Strahler
 - **deutliche Wärmeentwicklung**
 - Strahlenabschirmung notwendig
 - langlebiger Abfall
 - Angabe in t SM (Schwermetall)

Klassifizierung radioaktiver Abfälle II

Kategorie	Radioaktivitäts-Inventar	Aktinidengehalt	Radiotoxizität	Wärme-entwicklung
hochradioaktiv <u>HAW</u> langlebig	sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
mittelradioaktiv <u>MAW</u> langlebig	bedeutsam	bedeutsam	mittelmäßig	gering
schwachradioaktiv <u>LAW</u> langlebig	sehr gering	niedrig	niedrig	vernach- lässigbar
Weitere Unterteilung				
mittelradioaktiv kurzlebig	mittelmäßig	sehr gering	mäßig	gering
schwachradioaktiv kurzlebig	gering	vernachlässigbar	niedrig	vernach- lässigbar

Beseitigung von radioaktiven und Nuklearabfällen

- Oberflächennahe Lagerung
- **Tiefenlagerung**
 - Lagerung untertätig in geologischen Formationen
 - * mit Option Rückholbarkeit
 - * keine vorgeplante Rückholbarkeit
- Transmutation langlebiger Nuklide
- Transport in den Weltraum
- Meeresverkipfung, Versenkung
- Freisetzung, Verteilung, Verdünnung

Konzept in D:

- Kurzzeitlagerung beim Verursacher
- Abgabe, Zwischenlagerung in Landessammelstelle (keine Nuklearabfälle)
- Zwischenlagerung im KKW oder in zentralen Lagern (Nuklearabfälle)
- **Endlagerung in untertägigen geologischen Formationen**

Zwischenlagerung (niedrig und mittel aktiver Abfall)

Zwischenlagerung Standardfässer



de.scibd.com



Endlagerung.de

Zwischenlagerung Container



Lager für radioaktive Abfälle: KIT Campus Nord
ka-news.de



Quelle:  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

DBE



- Zwischenlagerung in
Landessammelstellen



- Tiefenlagerung
Schacht Konrad

Bewertungskriterien für Abfallgebinde (Produktkontrolle)

- Technologie

- * Einschusses der Radionuklide in einer Matrix

- Charakteristika der Produkte

- * Zusammensetzung
- * Aktivitätsinventar
- * Homogenität
- * Chemische Stabilität
- * Mechanische Stabilität
- * Reaktion mit Behältermaterial

- Weitere Betrachtungen

- * Korrosion des Behälters
- * Auslaugungsbeständigkeit der Abfallform
- * Reaktion mit Korrosionsprodukten des Behälters
- * Verbindungsbildung oder Adsorption mit Verfüllmaterialien
- * mögliche Reaktion und Migration der Radionuklide im Geomedium



Messanlage zur Dosisleistungsmessung an 200 / 400 l-Fässern

sea-duelmen.de

Nuklearer Abfall

- Brennelemente (BE)

Daten (Druckwasserreaktor):

193 Brennelemente

ca. 225 Brennstäbe/BE, Ø 1,0 cm, Länge 3,3 m

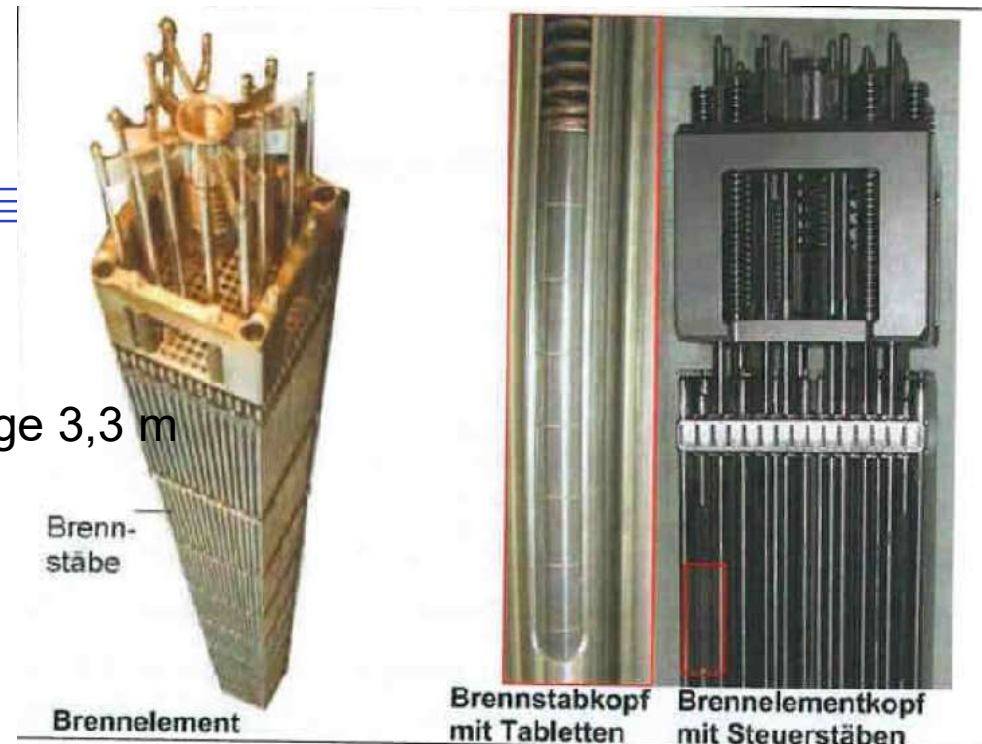
ca. 100 t Urandioxid Beladung

pro Jahr Entladung 1/3 der BE:

ca. 32,7 t Urandioxid

ca. 1,2 t Spaltprodukte

ca. 0,3 t Plutonium



DBE

- Kokillen

Daten:

1,34 m Höhe

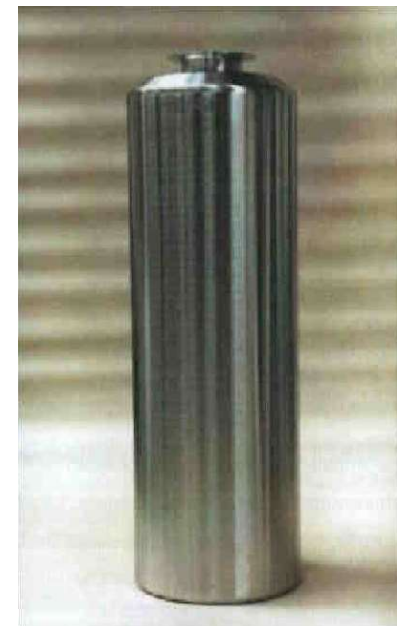
40 cm Durchmesser

400 kg, 150L Glasprodukt (Spaltprodukte, minore Actiniden)

Material: Borsilikatglas, Edelstahlbehälter

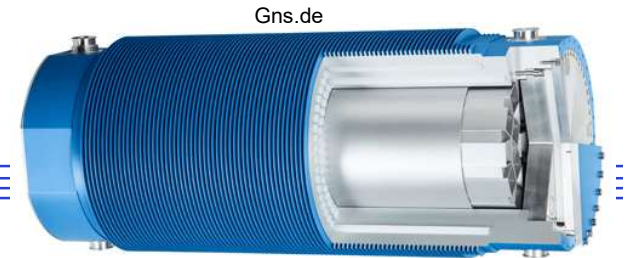
entspricht Material aus 3-4 BE

etwa 4700 Glaskokillen werden nach D zurückgeführt



Castor Cask for Storage and Transport of Radioactive Material

Lager- und Transportbehälter für hochradioaktives Material (BE, FP)



- Gewicht:

120 t Spezialguss, Wandstärke 44 cm

- Prüfungen:

* Fallprüfung

aus 9 m Höhe auf Beton-Stahl-Fundament aus 1 m auf Dorn von 15 cm

* Erhitzungsprüfung

0,5 h auf 800°C, Feuertest bei 1100°C, 90 min

* Wassereindringprüfung

8 h auf 15 m Tiefe, 30 min auf 200 m Tiefe

* Kollision

Straßenfahrzeug, Lokomotive mit ca. 130 km/h,

* Simulation Flugzeugabsturz,

Beschuss mit Stahlprojektil (1t) , Schallgeschwindigkeit



→ keine Radioaktivitätsfreisetzung



- Auslegungswerte:

Aktivität: $3,0 \times 10^{16}$ Bq

Gammastrahlung: 100 $\mu\text{Sv/h}$

Neutronenstrahlung: 25 $\mu\text{Sv/h}$

Nachzerfallsleistung: 825 W

Behälter einzeln aufstellen

Kontaminationen: Alpha-Strahler: 0,4 Bq/cm²,

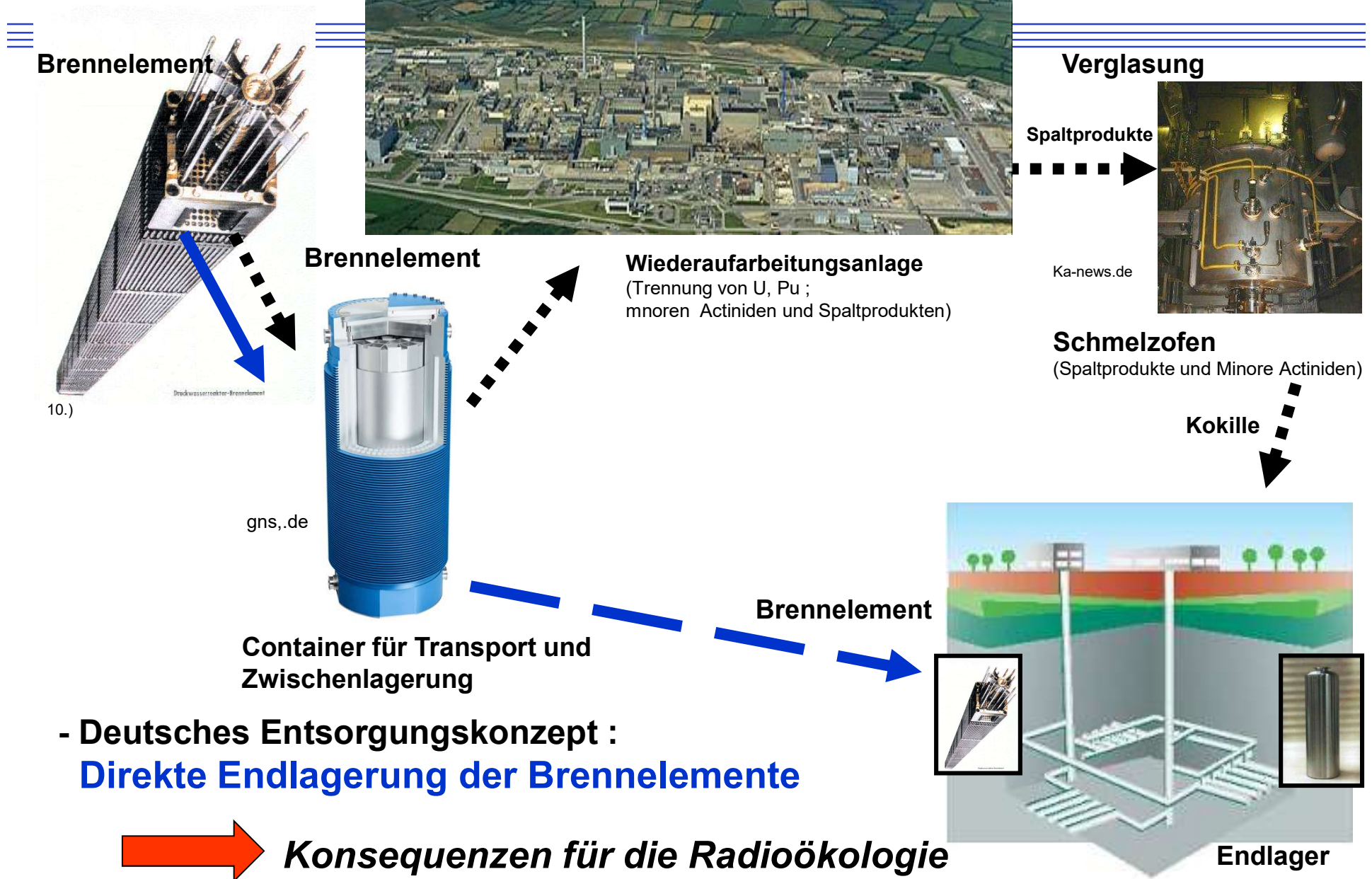
Beta-Strahler: 4,0 Bq/cm²



Transportbehälter auf dem Weg nach Gorleben
(9. November 2008)
Wikipedia.org

Weg der Brennelemente (Überblick)

<http://www.aveva.com>



Zwischenlagerung von radioaktiven und Nuklearabfällen in D

- derzeit werden Abfälle an ca. 50 Standorten in D aufbewahrt

Radioaktive:

- * in den entsprechenden Landessammelstellen
- * in Großforschungszentren
- * in Tiefenlagern (Asse 47.000 m³, Morsleben 37.000 m³)
- * zukünftig Schacht Konrad 303.000 m³



Schacht Morsleben
DBE

Nukleare:

- * bei Kernkraftwerken an 18 Standorten
- * in drei externe Zwischenlagern (Ahaus, Gorleben , ZL Nord-Lubmin)

DBE



Ahaus:

ca. 370 Stellplätze,
weiterhin Plätze für BE aus Forschungsreaktoren



Gorleben

ca. 420 Stellplätze



ZL Nord Lubmin

ca. 80 Stellplätze

Konzept zur Entsorgung von radioaktiven und Nuklearabfällen (D)

Zusammenfassung:

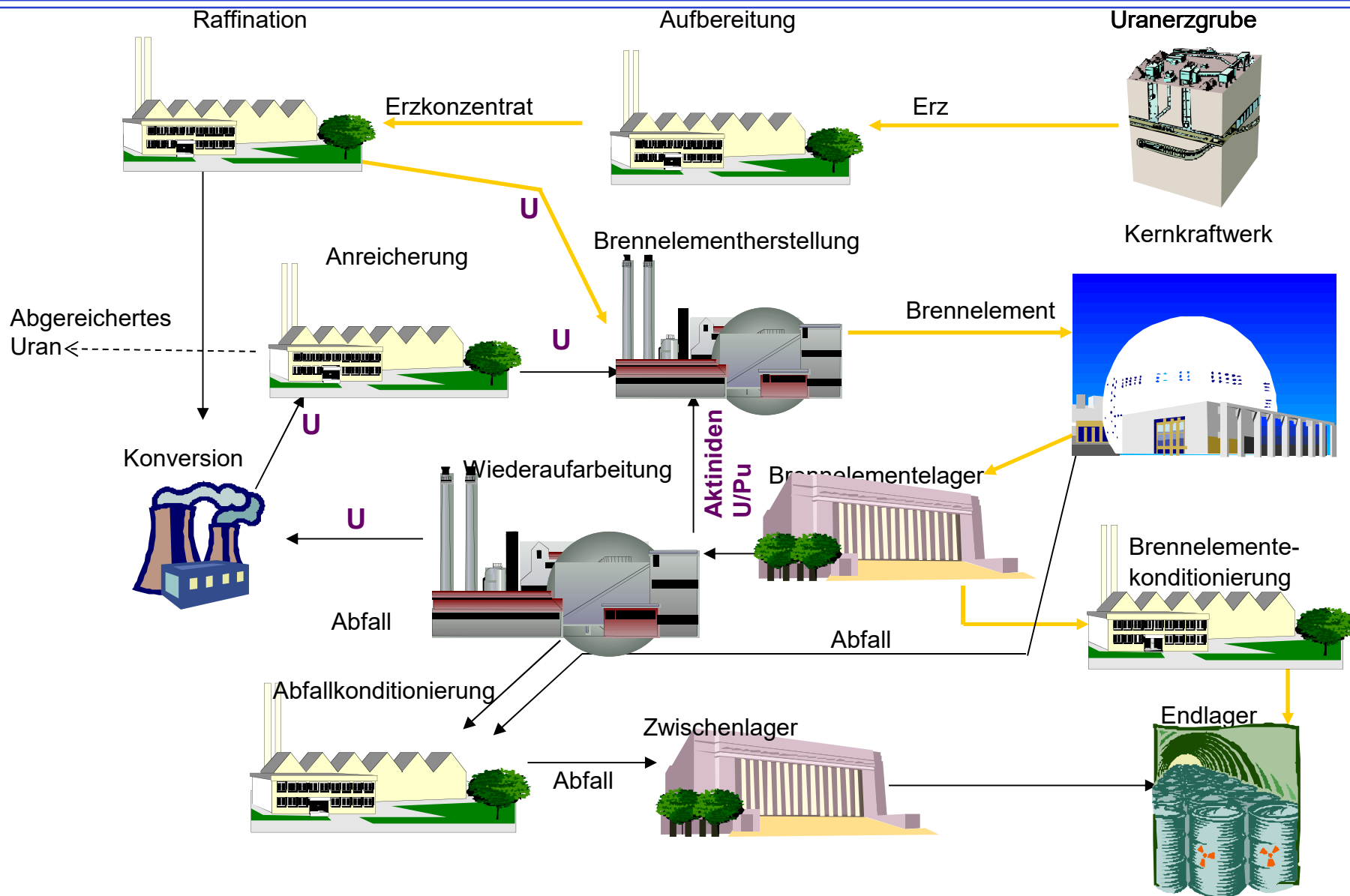
- Kurzzeitlagerung beim Verursacher
- Abgabe an Landessammelstelle (kein Kernmaterial)
- Zwischenlagerung (radioaktiver...nuklearer Abfall)
- Endlagerung in untertägigen geologischen Formationen (Salz ? Granit ? Tongestein ?)



- Ausstieg aus der Nutzung von Kernenergie!
- Endlagersuchgesetz
- Förderung der Forschung und Technik zu Endlagersystemen
- Suche nach tragfähigem politischen Konsens
- Klare Strukturierung der Verantwortlichkeiten (Antragsteller...Genehmigungsbehörde)
- breite Öffentlichkeitsbeteiligung
- Bau des Endlagers (Etappen definieren)

6.3 Kernbrennstoffkreislauf

Uran im Kernbrennstoffzyklus



Chemie des Kernbrennstoffzyklus I

- Uranerzbergbau



Wikipedia.org

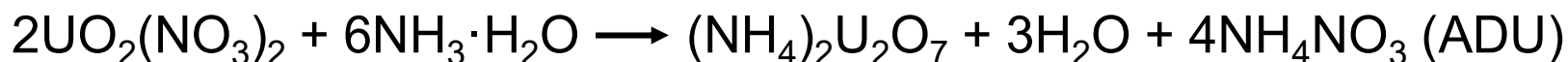


WISMUT GmbH

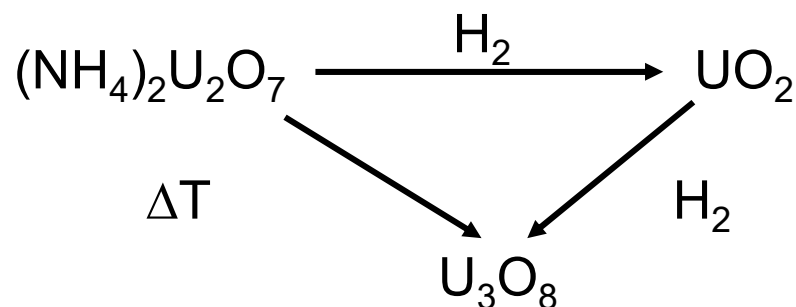
- Laugung



- Fällung

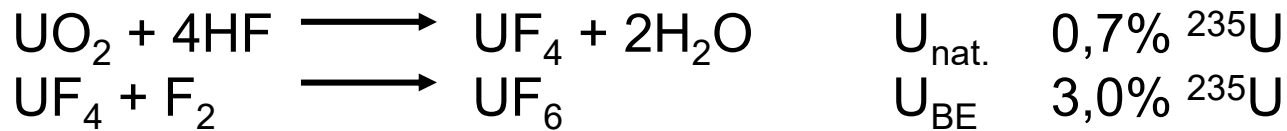


- Kalzination

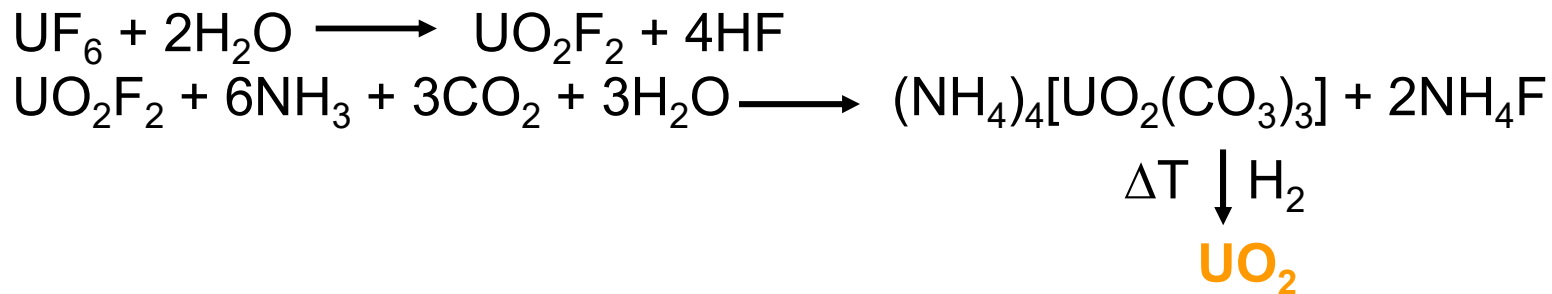


Chemie des Kernbrennstoffzyklus II

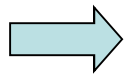
- Anreicherung



- UO_2 -Herstellung (AUC-Verfahren)



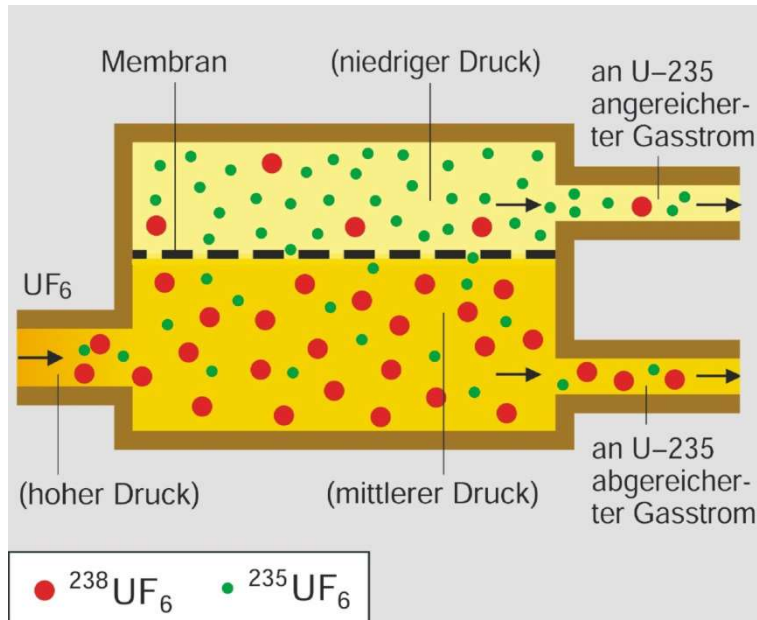
UO_2 als Pellet



Reaktorbrennelement

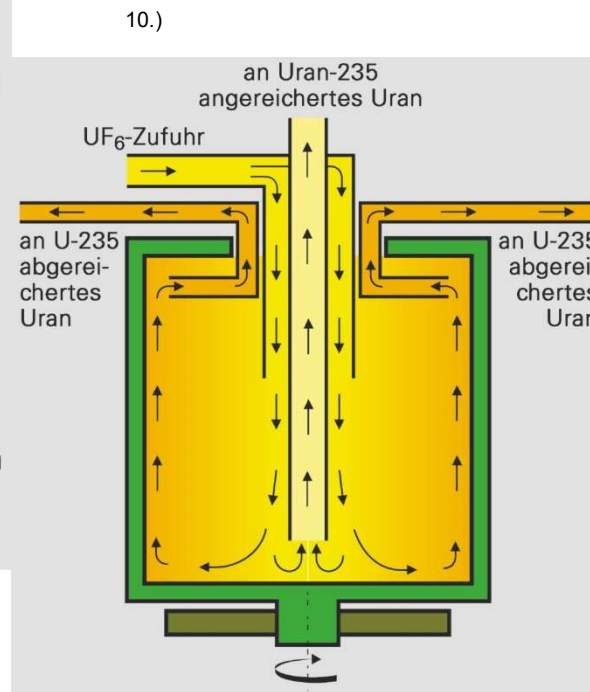
Isotopentrennverfahren/Anreicherung

- Methoden zur Anreicherung:



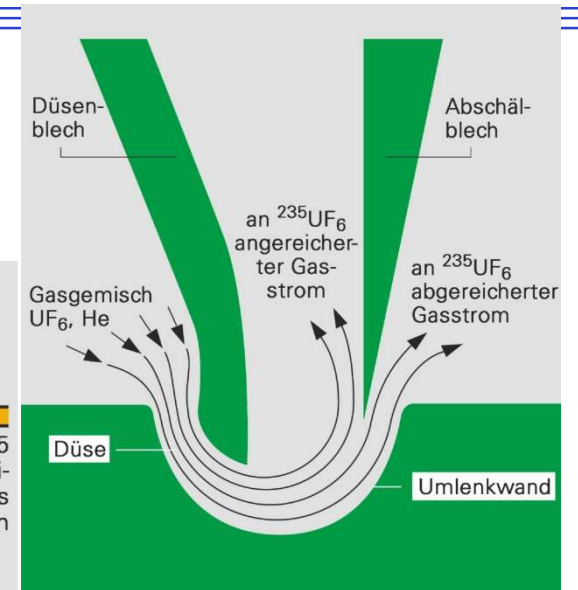
Gasdiffusionsverfahren

Quelle: Informationskreis KernEnergie



Zentrifugenverfahren

Quelle: Informationskreis KernEnergie



Trenndüsenverfahren

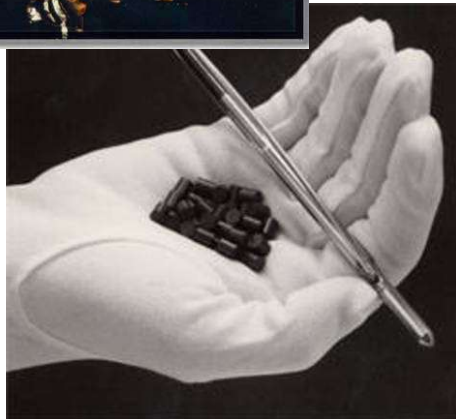
Quelle: Informationskreis KernEnergie

Pellet - Brennstab - Brennelement - Reaktor

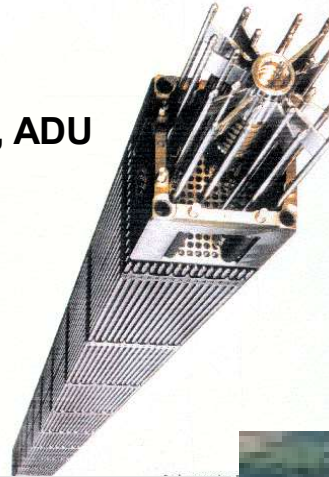


Ammoniundiuranat, ADU

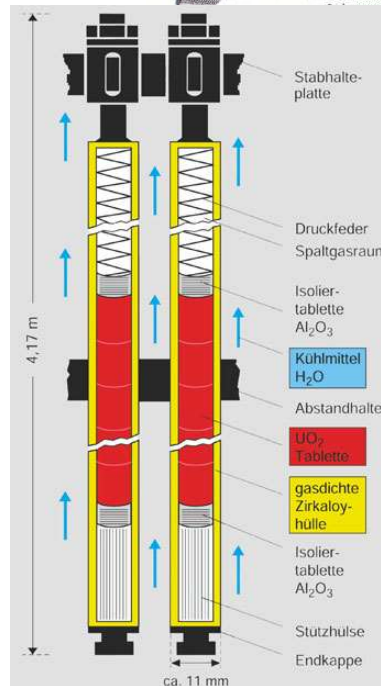
Wikipedia.org



Brennstoffpellets, UO_2



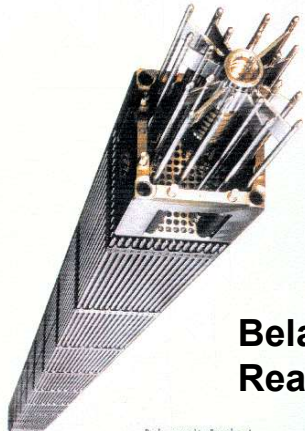
Brennelement



Kernkraftwerk Philippsburg

enbw.com

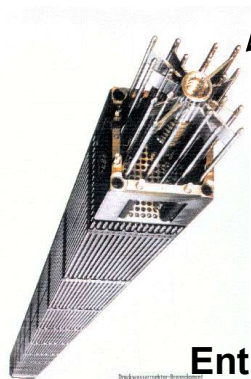
Brennelemente Reaktor / Zwischenlagerung



**Beladung
Reaktorcore**



ENBW.com



**Entladung
Reactorcore**

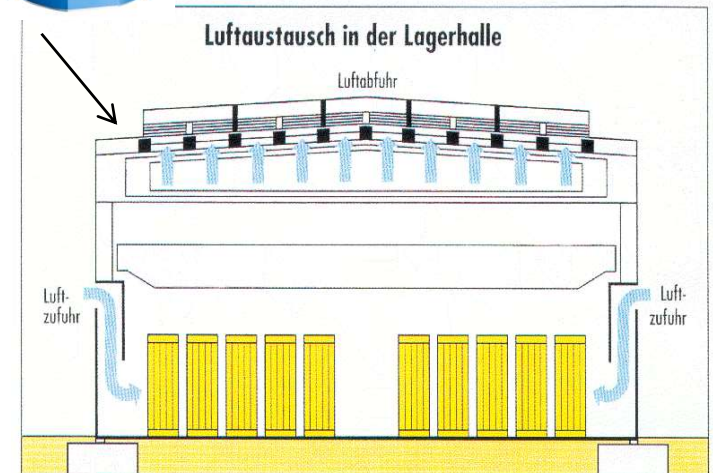
**Kurzzeitzwischenlagerung
Abklingbecken im KKW**



gns.de

**Behälter für
Transport
und Zwischenlagerung**

gns.de



Zwischenlager

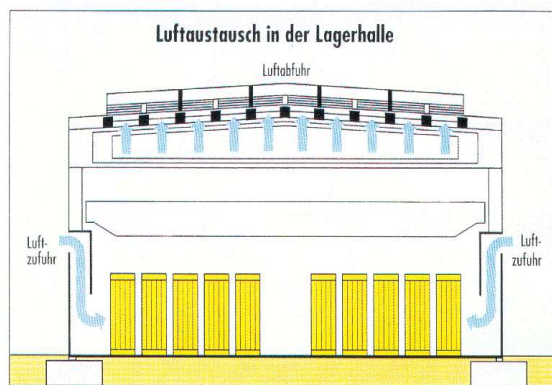
Entsorgungskonzept für gebrauchte Brennelemente

I

Variante: Direkte Endlagerung

- aus Zwischenlager direkt zur Tiefenlagerung (Endlagerung)

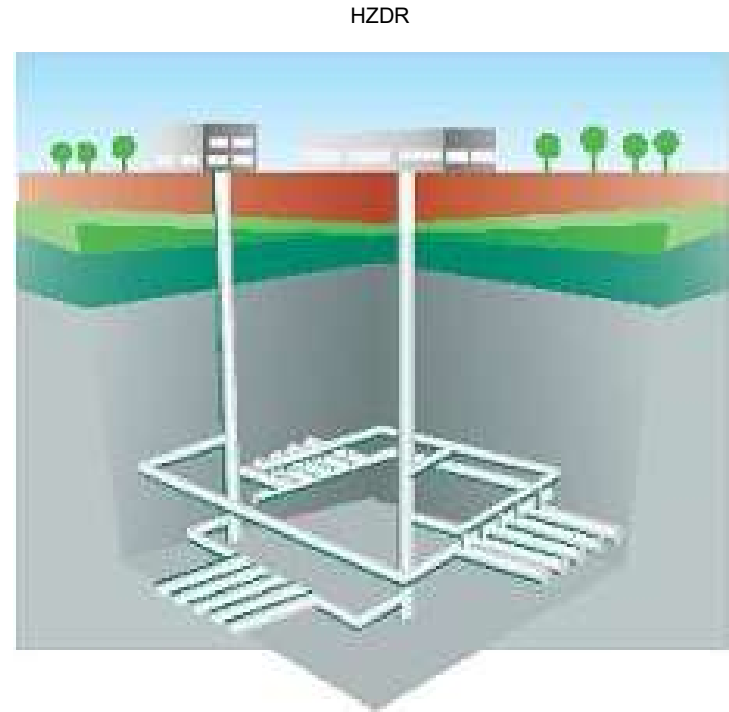
gns.de



Zwischenlager



Behälter



Tiefenlager

Entsorgungskonzept für gebrauchte Brennelemente

II

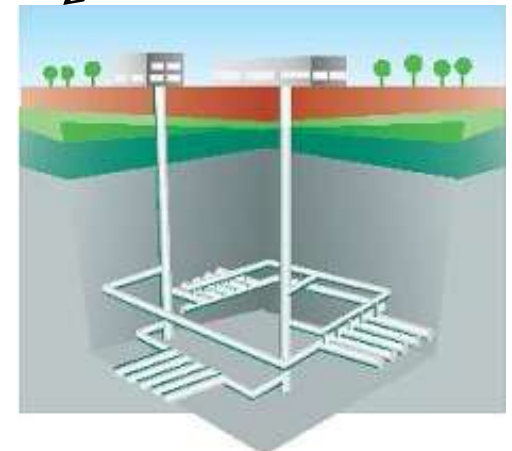
Variante: Wiederaufarbeitung

- aus Zwischenlagerung zur Wiederaufarbeitungsanlage zum Endlager



* Wiedergewinnung des unverbrauchten Kernbrennstoffes (Uran-235) und des neu gebildeten Kernbrennstoffes (Pu-239),

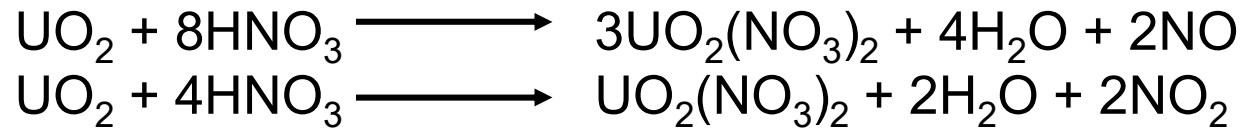
* Endlagerung der verfestigten hochradioaktiven Abfälle



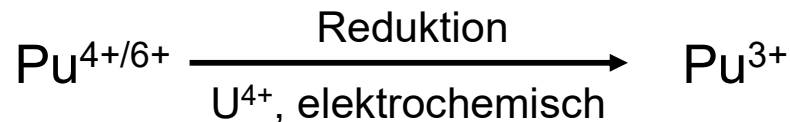
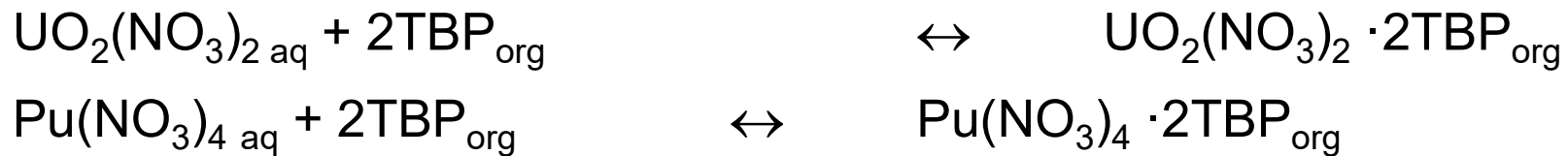
Chemie des Kernbrennstoffzyklus III

Reaktorbrennelement nach Einsatz in Reaktor (Wiederaufarbeitung):

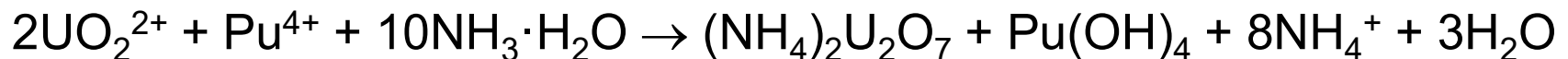
- Auflösung



- Extraktion



- Mischoxidherstellung



UO₂/ PuO₂-Mischoxid als Pellet



Reaktorbrennelement

Standorte Wiederaufarbeitungsanlagen (Beispiele)

Aufarbeitung Brennstoff Leichtwasserreaktoren:

La Hague, Frankreich

Sellafield, Vereinigtes Königreich

Majak, Russland

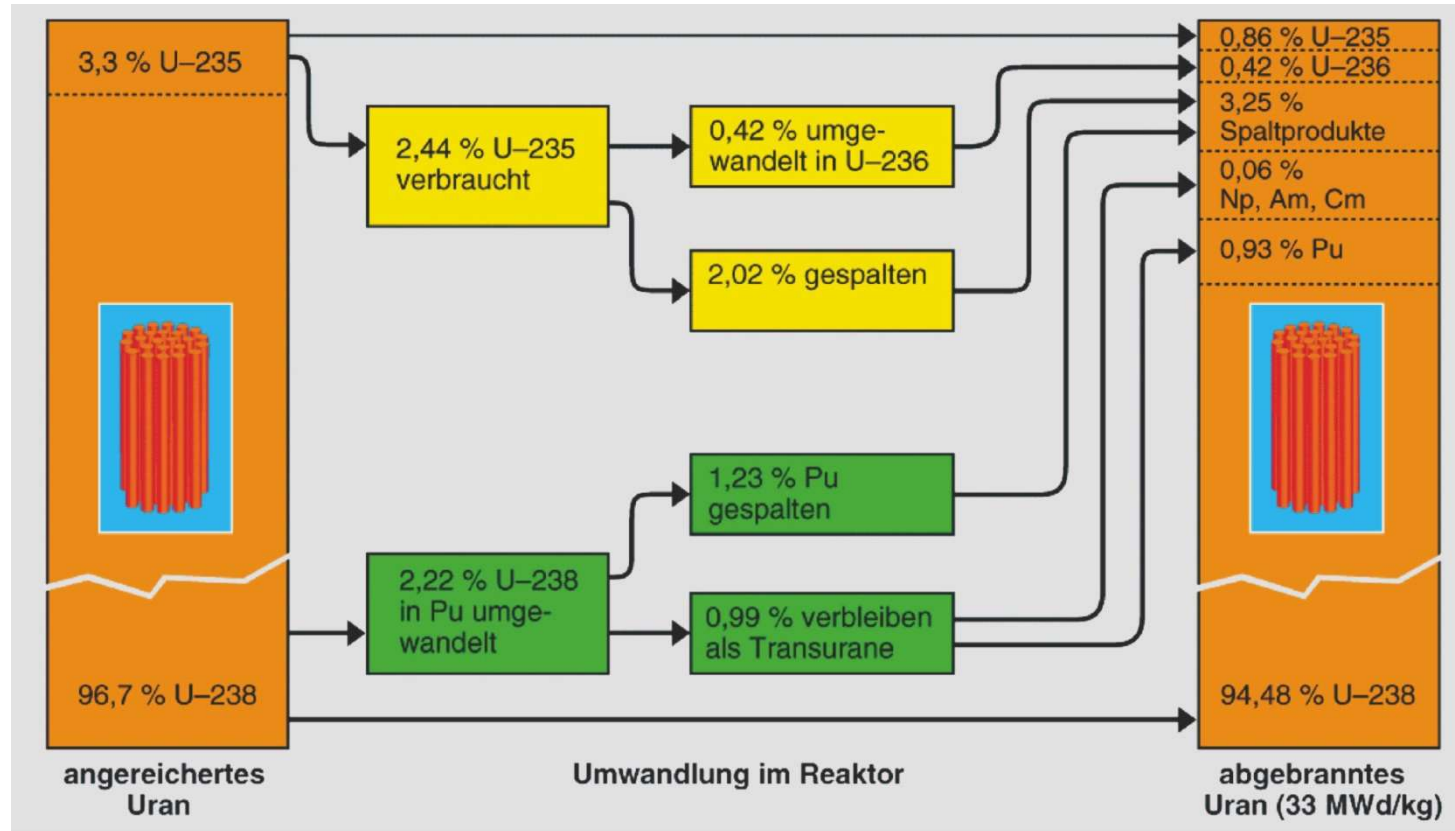
Rokkasho, Japan



Bild WAA Sellafield
Wikipedia.org

Brennstoffcharakteristik

- Brennstoffzusammensetzung (DWR) in % der Gesamtmenge Abbrand 33 000 MWd/tU



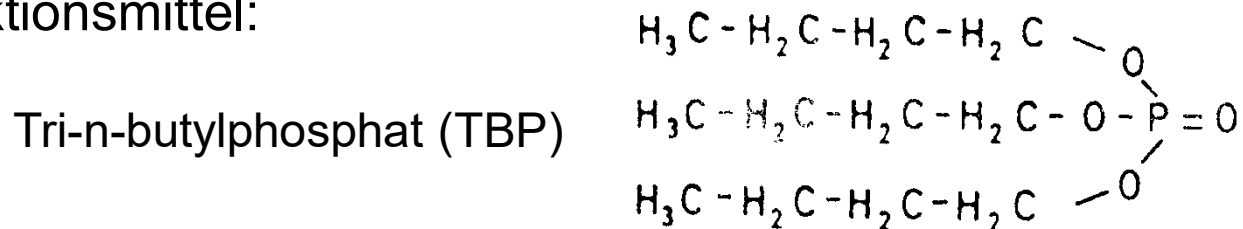
10.)

Quelle: 
Informationskreis
KernEnergie

- Weltweit kumulierte Menge an abgebranntem Kernbrennstoff und Plutonium bis 2010, zivile KKW: 316250 t SM und 2100 t Plutonium

PUREX – Verfahren (Plutonium-Uranium-Recovery by Extraction) I

- viele Verfahren getestet, unterschiedlichste Extraktions- und Fällungsverfahren
- Extraktionsmittel:



30%ige Lösung von TBP in Dodekan ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$) / Kerosin

Salpetersaure Lösung der zu trennenden Kernbrennstoffe und Spaltprodukte

Flußverhältnis Speiselösung / Extraktionslösung 1 : 3 bis 1 : 5

- Trennfaktoren bis 10^7 notwendig
- Mixer-Settler, Siebbodenkolonnen, gepulste Kolonnen,

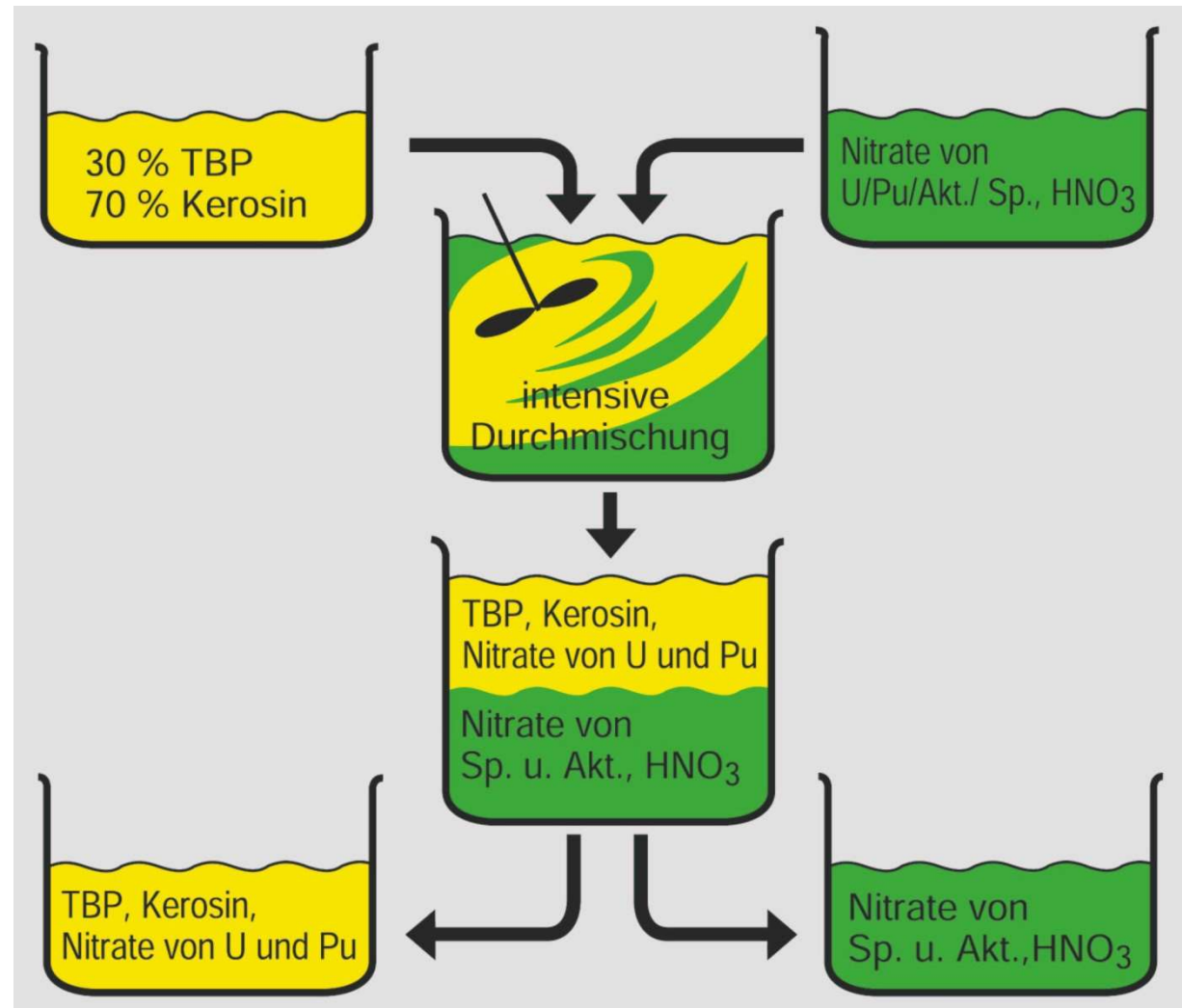
Zentrifugalextraktoren

- U/Pu Trennschritt Reduktion des $\text{Pu}^{4+ / 6+}$ zu Pu^{3+}

PUREX - Verfahren (Plutonium-Uranium-Recovery by Extraction)



Vereinfachtes Schema

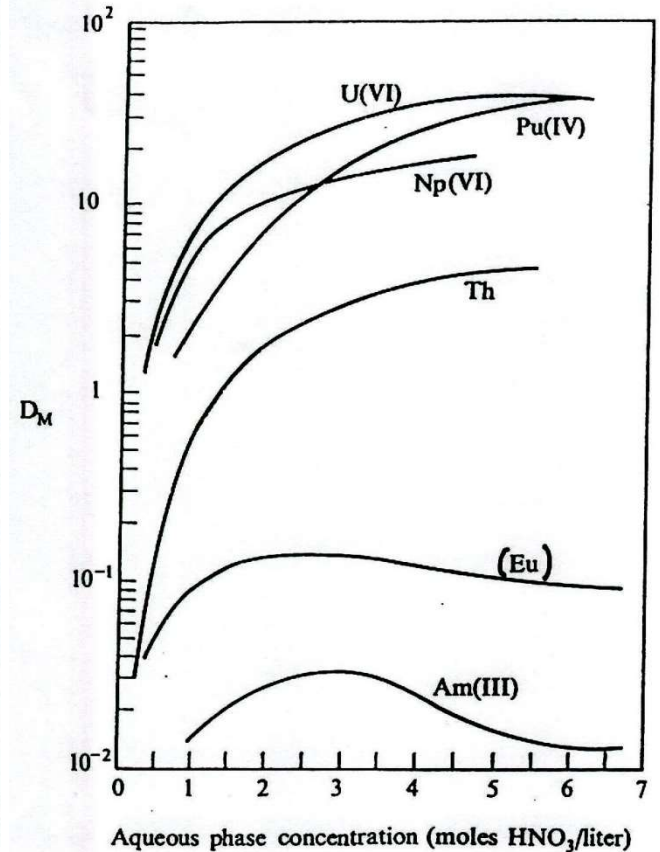
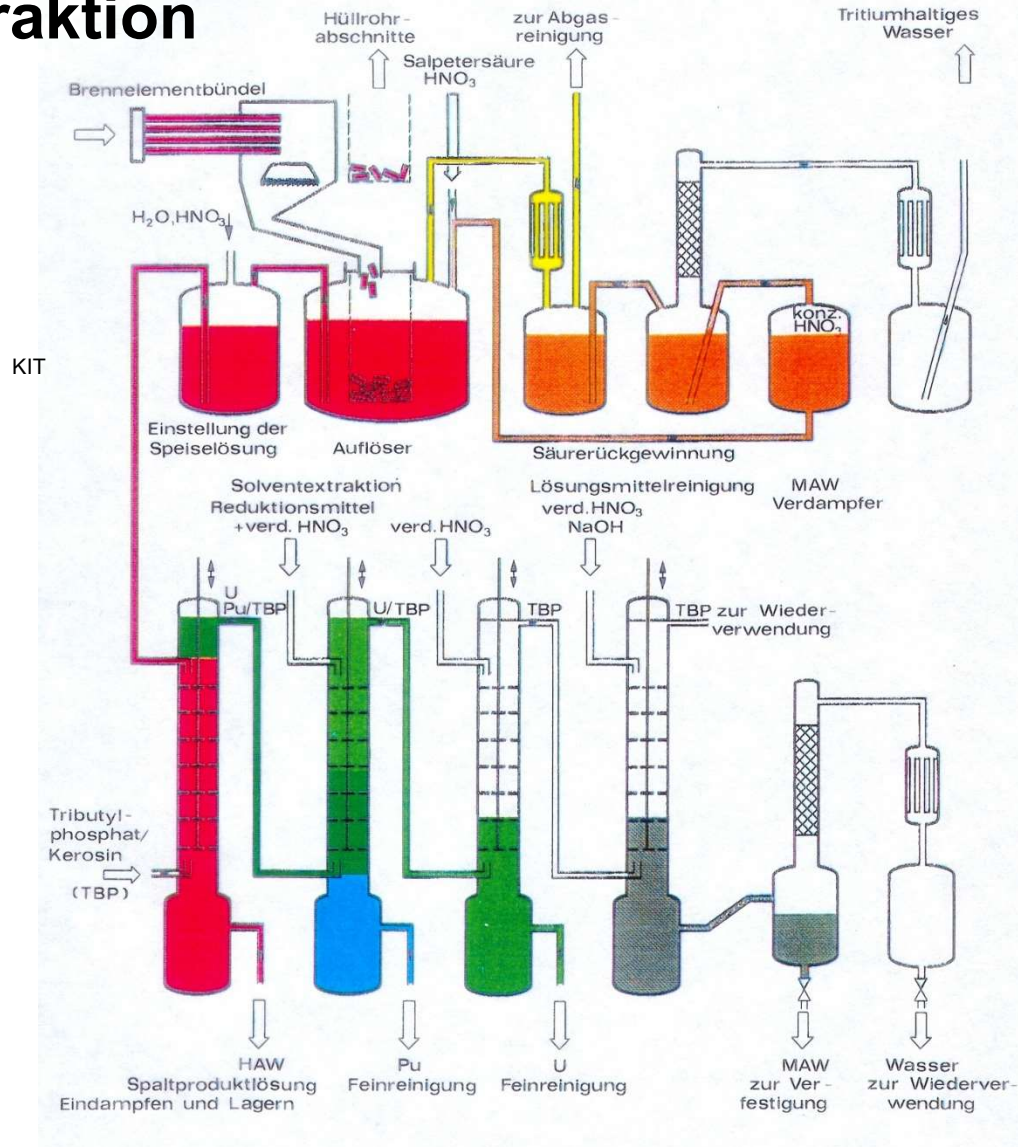


10.)

Technologieschema Wiederaufarbeitung

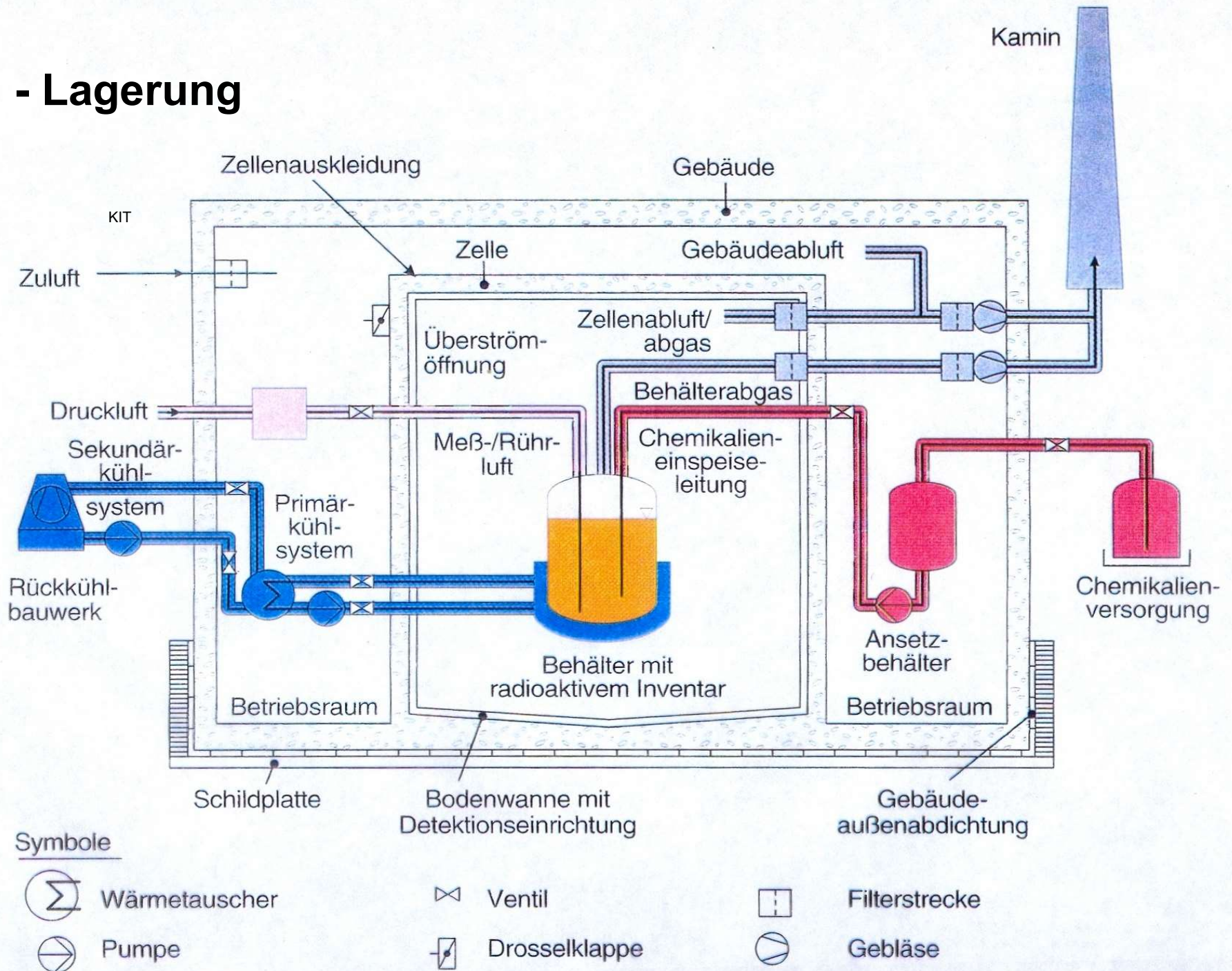
Beispiele: Extraktion, Lagerung, Verglasung

- Extraktion

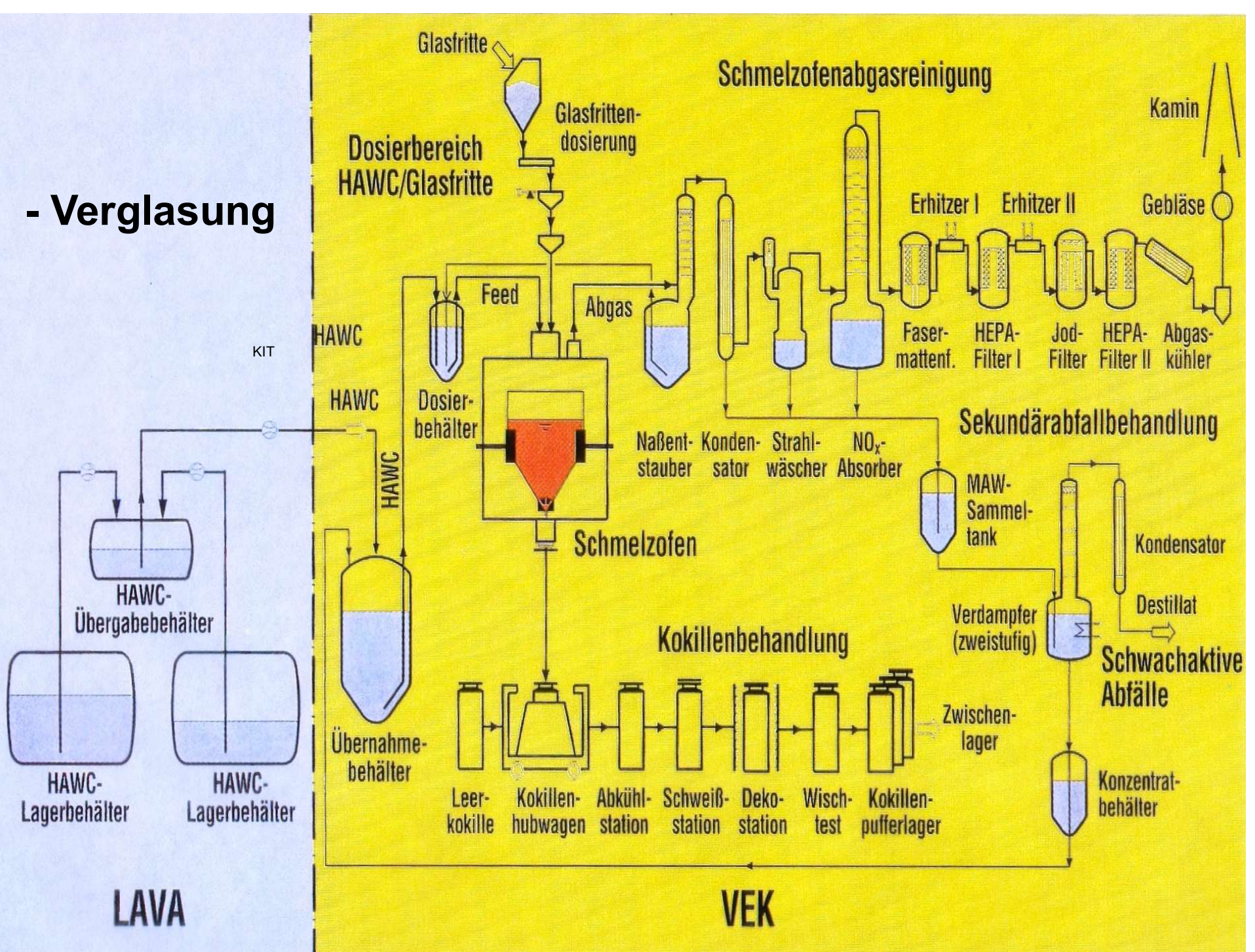


Verteilung von Actiniden
(30 Vol% TBP in Kerosin / HNO_3)

- Lagerung



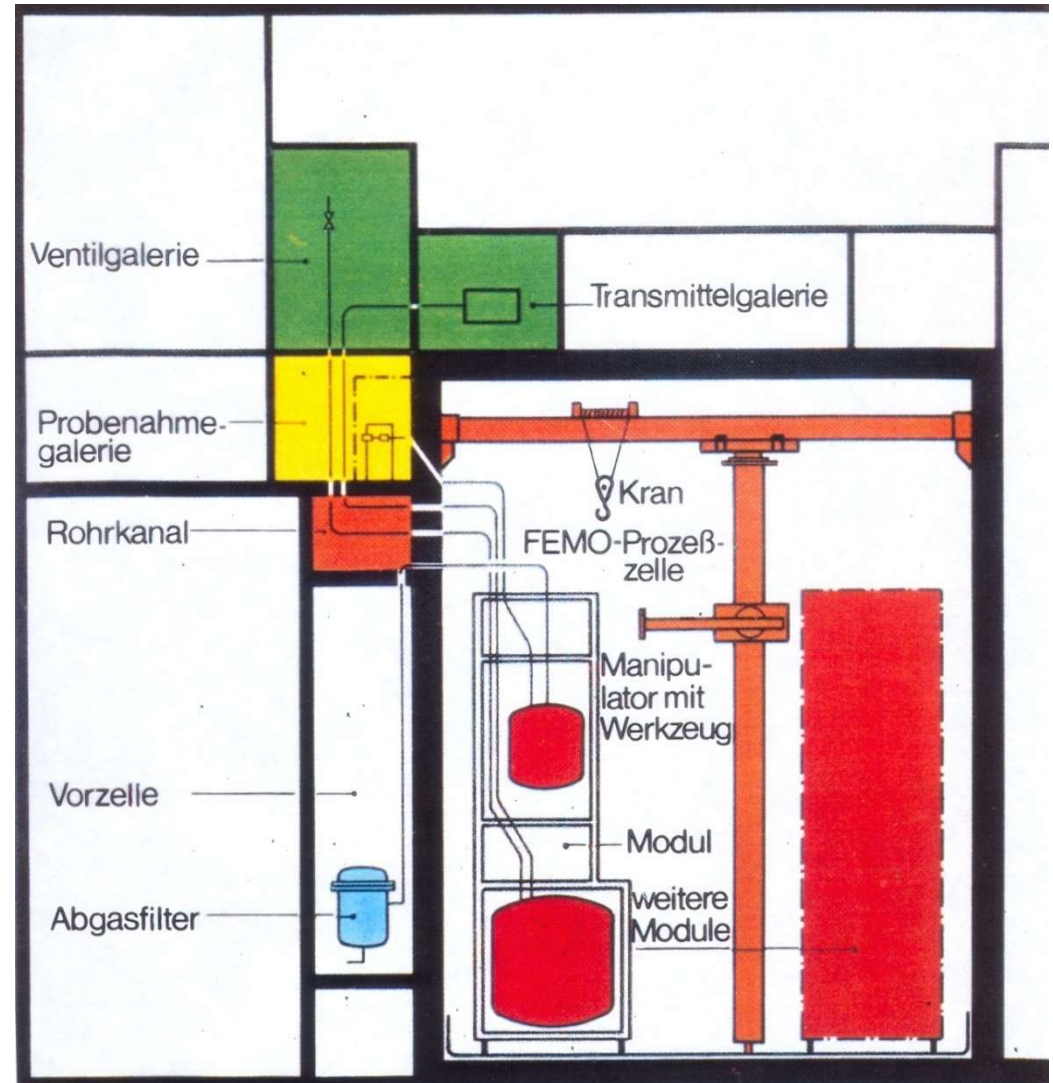
- Verglasung



Fernbediente Modultechnik (FEMO)

- Einbau der Technik in Heiße Zellen

- * redundante Apparaturen
- * Auslegung der Anlagen mit fernbedienter Auswechslung von verschlissenen Komponenten



Aufarbeitung von Plutonium (Gloveboxen)

- Bearbeitung des Plutoniums in Handschuhboxen

