

# **Transmutationsprozesse zur Verbesserung der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle**

**Univ.-Prof. Dr. Bruno Thomauske**

**Kerntechnisches Symposium**

**Dresden, 19. Oktober 2011**



1. Entsorgungspolitische Randbedingungen
2. Handlungsoptionen
3. Technische Möglichkeit zur Reduzierung des langfristigen Gefährdungspotentials radioaktiver Abfälle
4. Auslegung einer Transmutationsanlage
5. Bedeutung für die Entsorgung





< 2002: unbefristete Genehmigung für die Laufzeit der Kernkraftwerke

≥ 2002: keine Befristung der Laufzeit aber:

- Beschränkung der Strommengenproduktionsrechte pro Anlage (Basis: 32 Jahre)
- Regelung der Übertragung der Stromproduktionsrechte auf andere Anlagen

≥ 2011: Erhöhung der Stromproduktionskontingente (Laufzeitverlängerung)

2011: Rücknahme der Erhöhung der Stromproduktionsrechte  
Beschränkung der Laufzeiten aller Kernkraftwerke





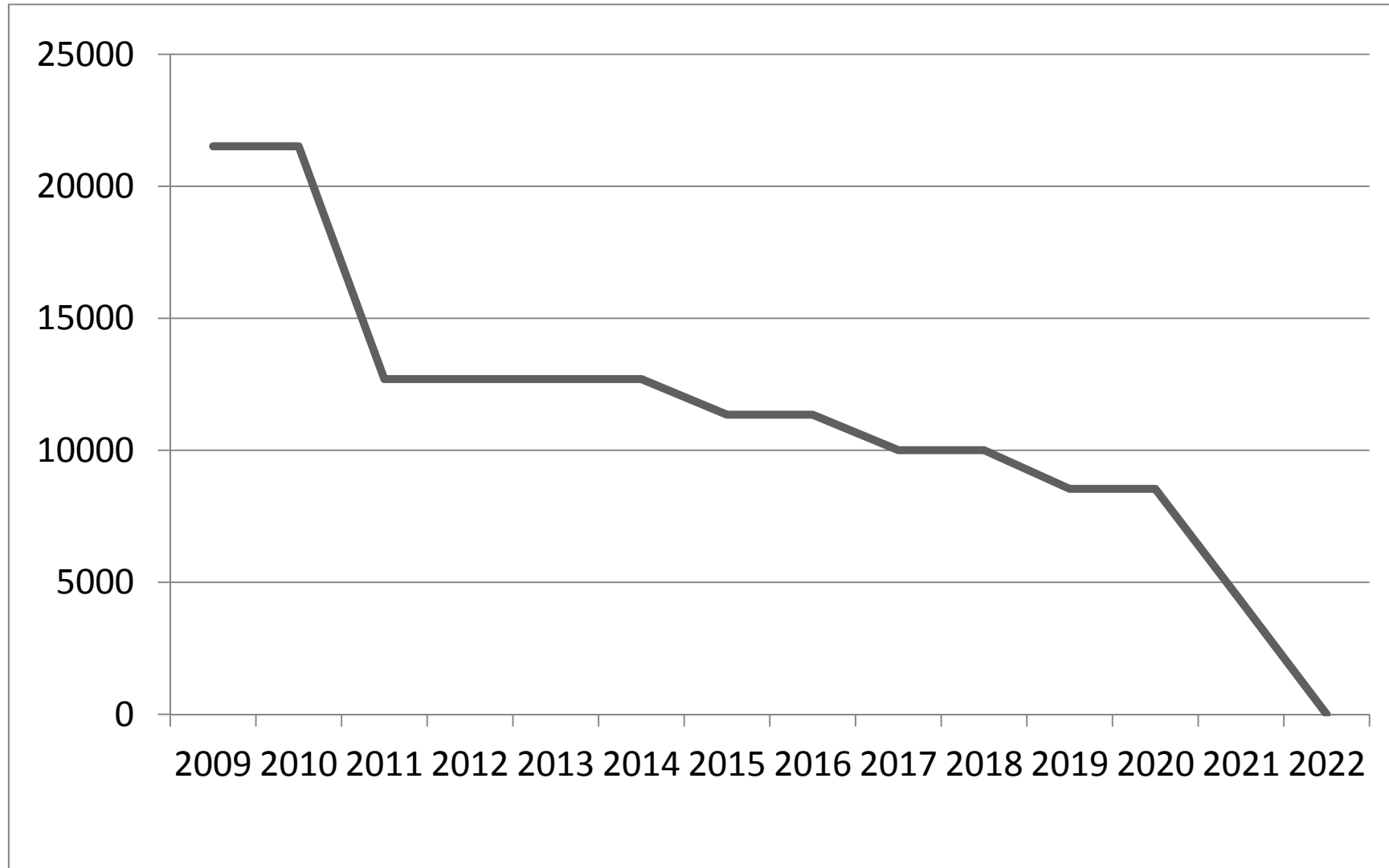
Laufzeitverlängerung:	01.01. 2011
Fukushima Ereignis:	11.03.2011
Moratorium: 3 Monate	15.03.2011
Bericht Reaktorsicherheitskommission:	14.05.2011
Bericht Ethikkommission:	30.05.2011
Entscheidung Bundesregierung Laufzeitbefristung:	01.06.2011
Ende des Moratorium:	15.06.2011
Entscheidung des deutschen Parlaments:	30.06.2011
Entscheidung des Bundesrats:	08.07.2011
Unterzeichnung Bundespräsident	01.08.2011





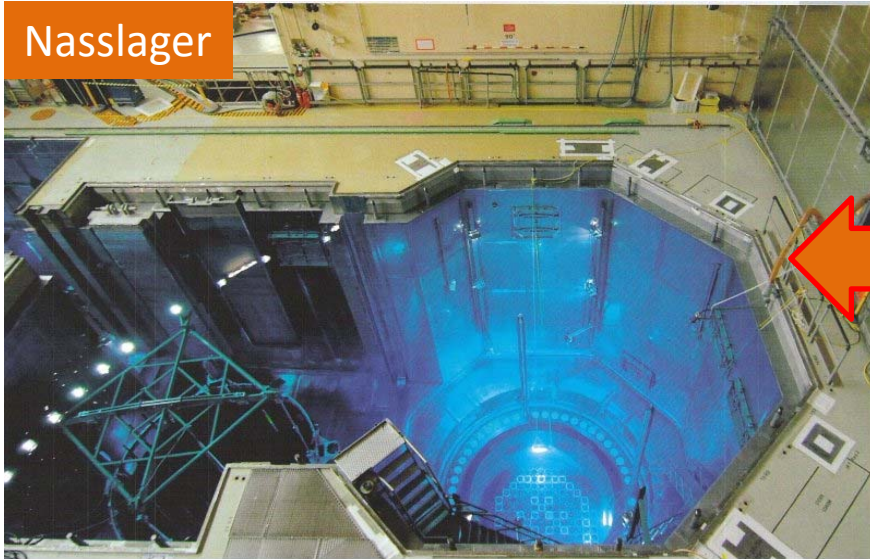
Abschaltdatum	Kernkraftwerk
06.08.2011	Neckarwestheim1, Isar1, Brunsbüttel, Biblis A, Biblis B, Unterweser, Philippsburg1, Krümmel
Ende 2015	Grafenrheinfeld
Ende 2017	Gundremmingen B
Ende 2019	Philippsburg 2
Ende 2021	Grohnde, Brokdorf, Gundremmingen C
Ende 2022	Isar 2, Neckarwestheim 2, Emsland



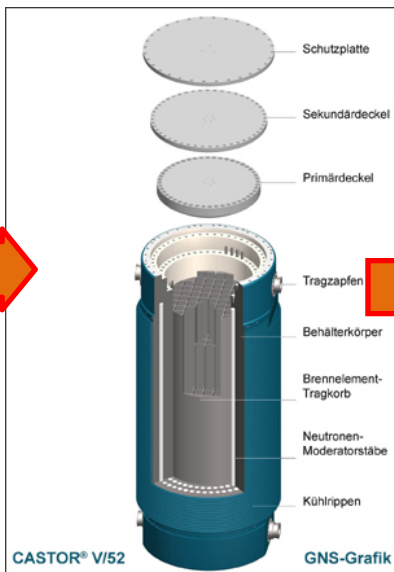
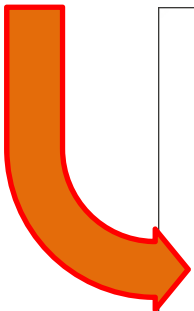




Nasslager



Kernkraftwerk



CASTOR®-Behälter Zwischenlager



Was dann ???









**vernachlässigbar wärmeentwickelnde  
Abfälle (VWA)**

**Konrad** ab 2019? für 40 – 80 Jahre

**Morsleben** 1978 – 1998 (Verfüllung)

**Asse** 1967 – 1978 (Rückholung?)

**Endlagerung für VWA gelöst?**



**hochradioaktive wärmeentwickelnde  
Abfälle**

**Gorleben** etwa ab 2035, falls geeignet?

**Alternative Standorterkundung?**

**Wait and see: Langfristzwischenlagerung?**

**Transmutation ?**

**Endlagerung für HAW nicht gelöst**





### Was sind die entsorgungspolitischen Einwände der Bevölkerung gegen die Endlagerung:

- langfristiges Gefährdungspotential für die Biosphäre durch die großen **Halbwertszeiten** einiger Radionuklide (  $\approx$  1 Mio. Jahre).
- Die Sicherheit ist für derartige Zeiträume nicht streng nachweisbar.
- weltweit gibt es **kein betriebsbereites Endlager** für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle
- ohne **Lösung der Entsorgungsfrage** ist die Kernenergie nicht verantwortbar





- direkte Endlagerung der abgebrannten Brennelement

→ **Minimierung der Transporte und der Nutzung der Wiederaufarbeitungsanlagen**

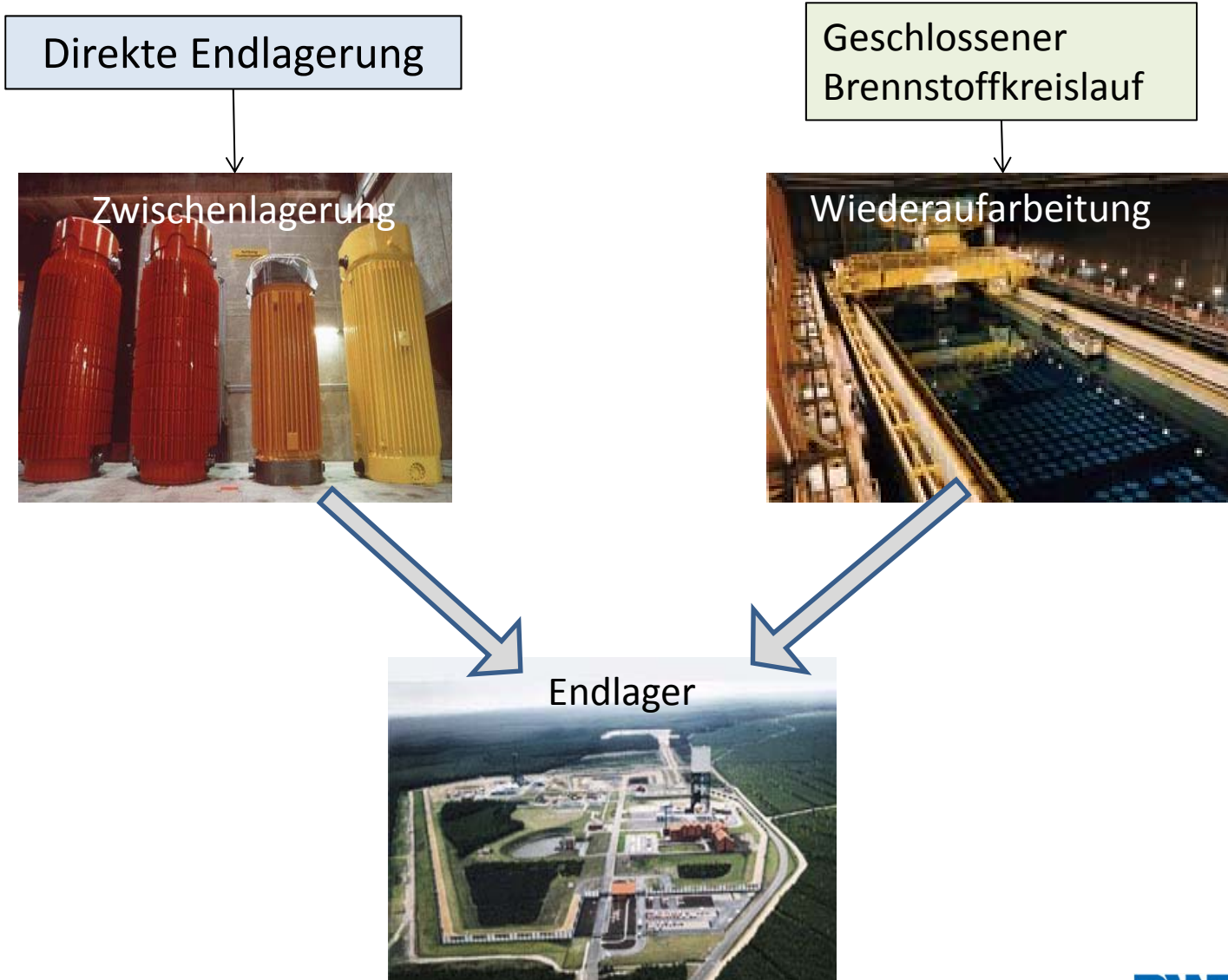
- Wiederaufarbeitung sämtlicher abgebrannter Brennelemente (Abtrennung Uran und Plutonium)

→ **Optimierung der Energieausbeute**

- Abtrennung der langlebigen Radionuklide insb. Plutonium, Americium, Neptunium und Curium (***Partitioning***) und Spaltung dieser Radionuklide in einer *kerntechnischen Verbrennungsanlage* (***Transmutation***)

→ **Minimierung des langfristigen Gefährdungspotentials**  
**Optimierung der Energienutzung**



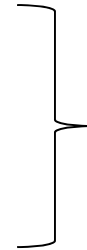




- bis 1994 ausschließlich Wiederaufarbeitung
- 1994 bis 2005 Wahlmöglichkeit:  
Wiederaufarbeitung oder  
direkte Endlagerung
- seit 2005 ausschließlich direkte Endlagerung

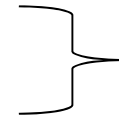


abgebrannte Brennelemente (BE)  
bis zum Ende der heute festgelegten  
Laufzeit der Kernkraftwerke



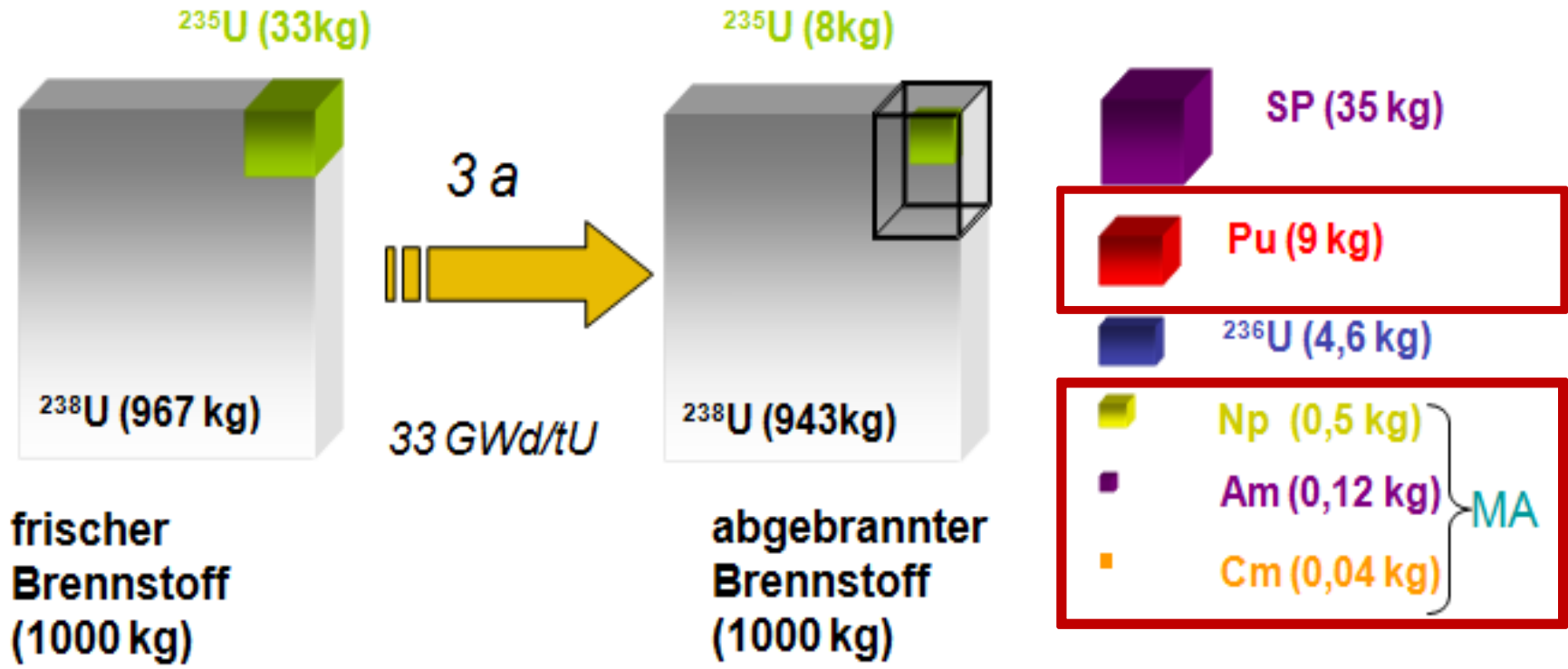
**ca. 10.000 t BE**  
**Transmutation möglich**

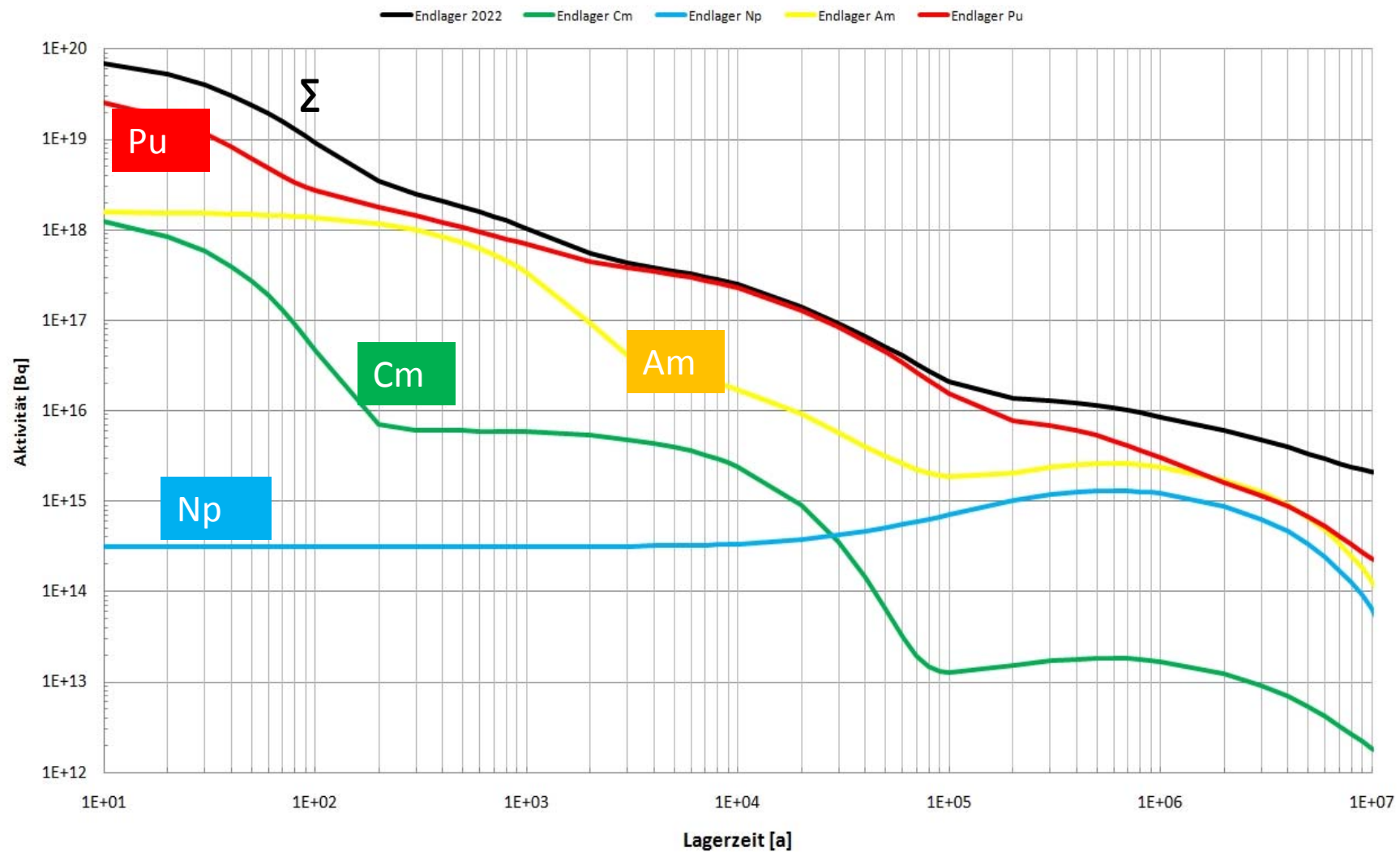
Wiederaufarbeitungsabfälle



**ca. 3 600 Kokillen**  
**(aus 6.300 t BE)**  
**Transmutation nicht sinnvoll**

**Aktuelle Lösung: Lagerung an Kernkraftwerksstandorten und in  
den Zwischenlagern Gorleben und Ahaus**





Basis: 10.000 Mg SM





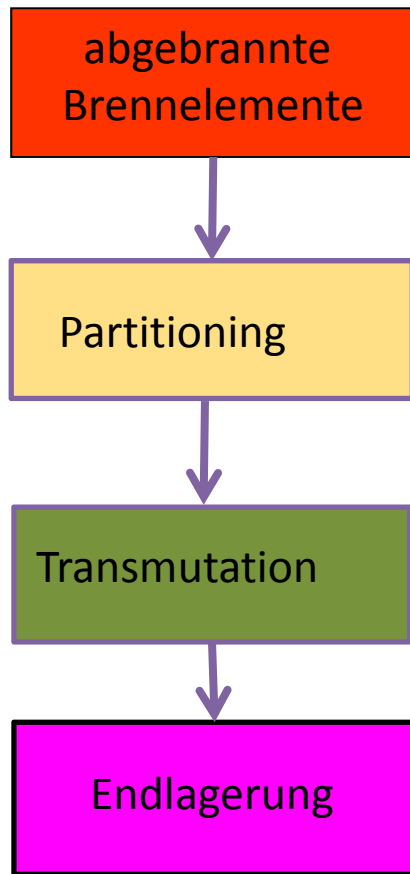


- Direkte Endlagerung
- Verbrennung im Leichtwasserreaktor
- Prinzip Schneller Brüter
- Wiederaufarbeitung (Partitioning), MOX in LWR
- Partitioning + Transmutation (P&T)





### Partitioning and Transmutation



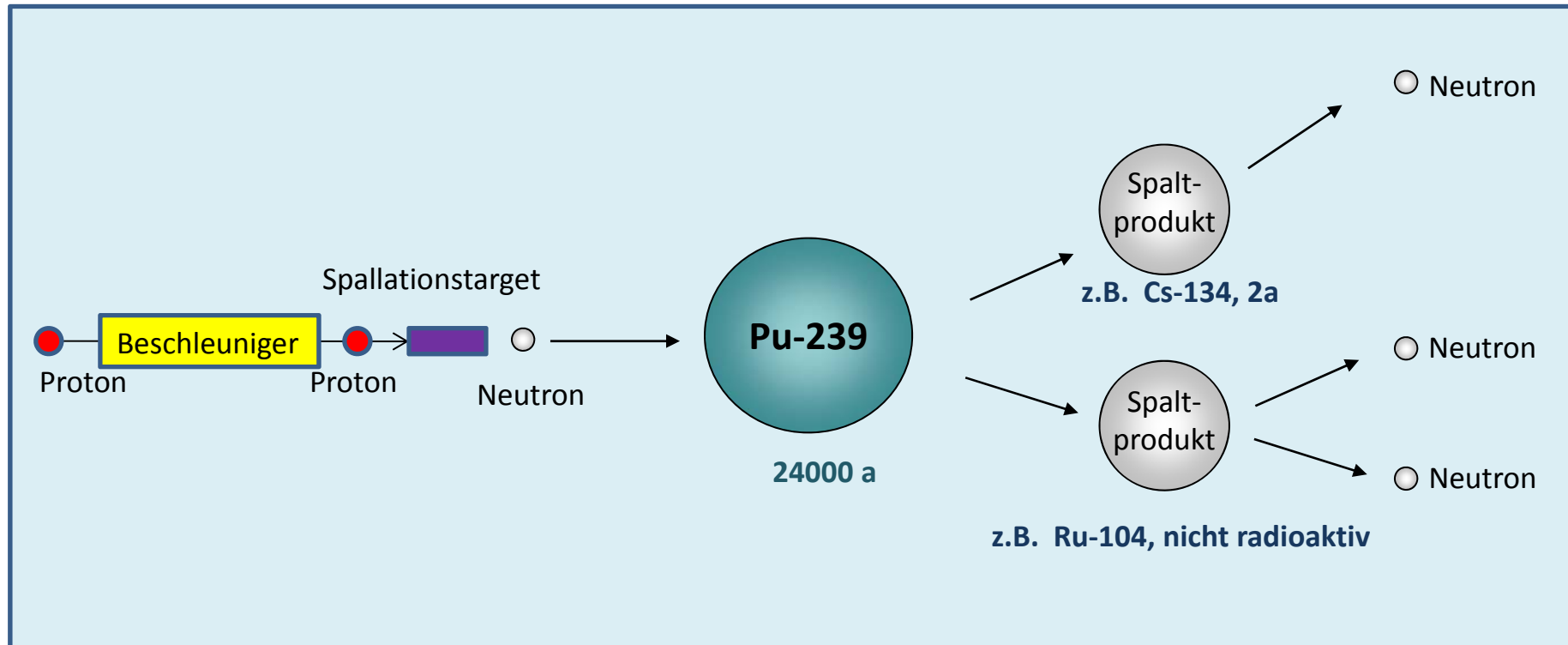
#### Partitioning:

Abtrennung der Radionuklide, die über lange Zeiträume die Radiotoxizität bestimmen

#### Transmutation:

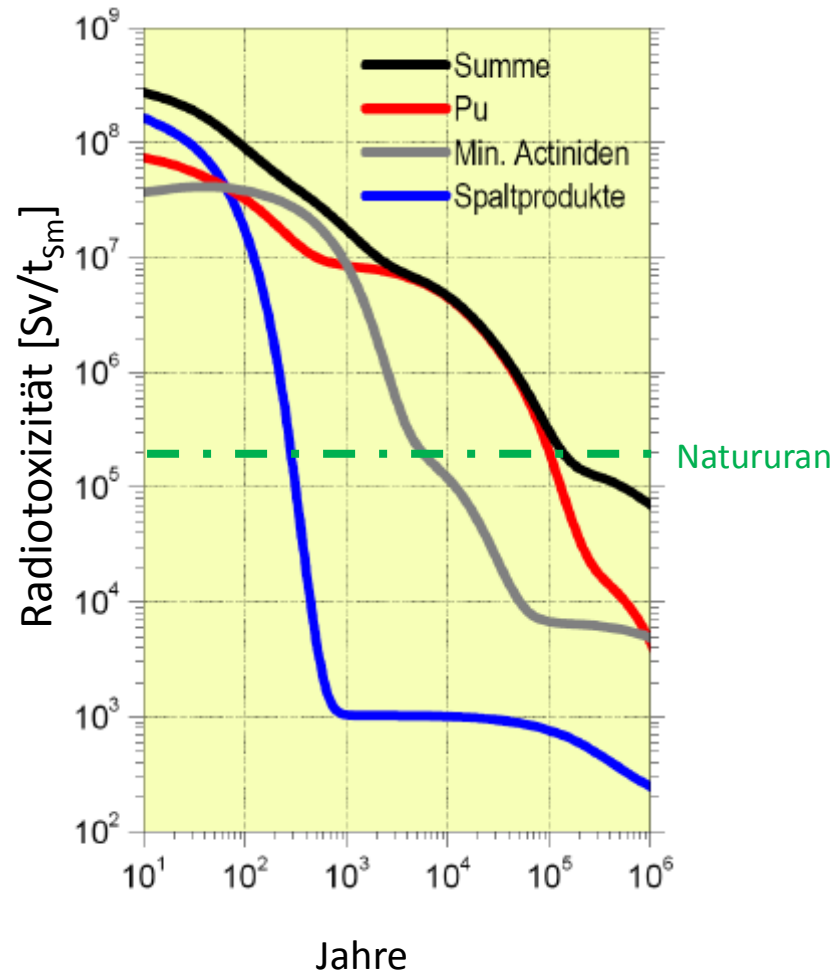
Nutzung von Anlagen zur Überführung dieser Radionuklide in kurzlebige oder stabile Isotope (langlebig → kurzlebige)

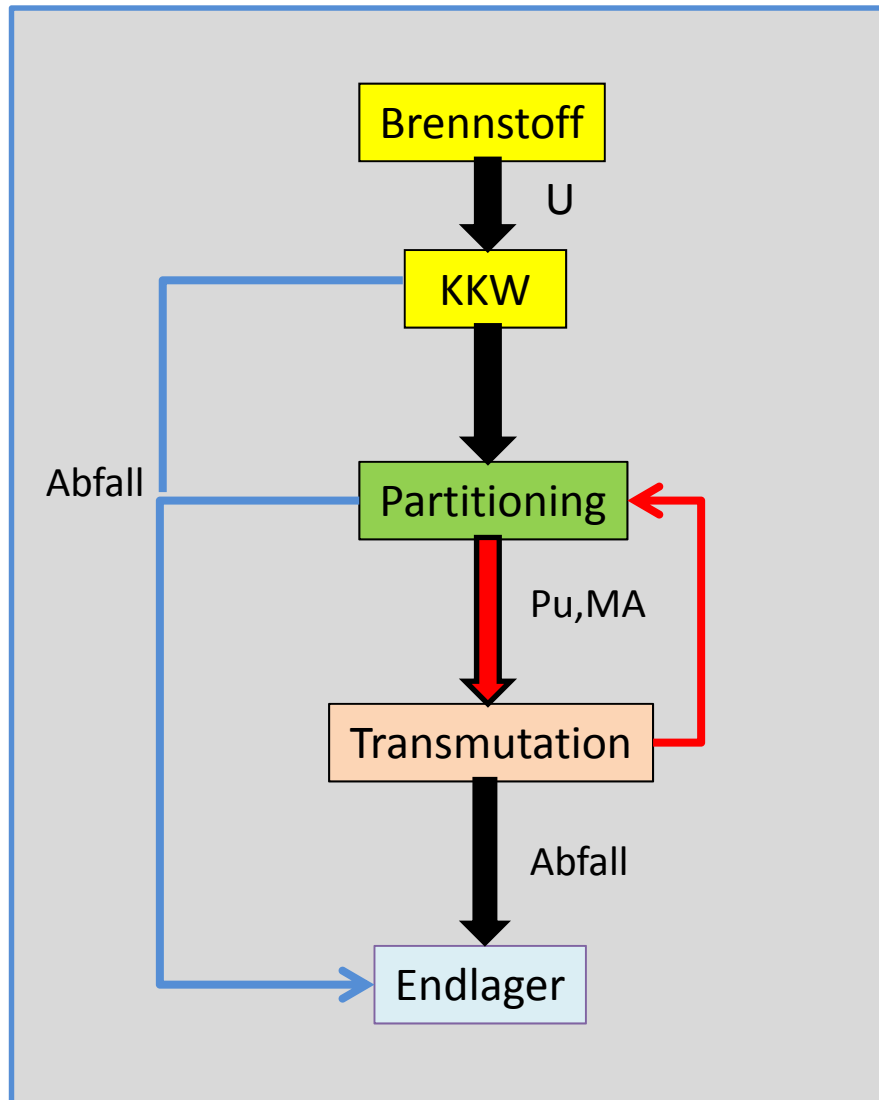




Accelerated Driven System (**ADS**) = Beschleuniger Getriebene Unterkritische Anlage  
Beschleuniger erzeugt schnelle Neutronen, die langlebigen Radionuklide spalten (Neutronen –induzierte Spaltung)









Wiederaufarbeitungsanlage  
La Hague, Frankreich

Pilotanlage für  
Minore Aktiniden





Warum sind besondere Transmutationanlagen zur Vernichtung der langlebigen Radionuklide erforderlich:

- in den **Leichtwasserreaktoren** (thermische Reaktoren) werden langlebige Minore Aktiniden aufgebaut.
- Thermische Neutronen haben zu geringe Wirkungsquerschnitte zur Spaltung der langlebigen Minoren Aktiniden. Deshalb verwendet man schnelle Neutronen zu ihrer Spaltung. Diese werden im
  - **schnellen Brüter** oder
  - in einer **beschleuniger getriebenen Anlage** (ADS) erzeugt
- Da Schnelle Brüter zur besseren Ausnutzung des Urans beitragen, werden sie insbesondere in Ländern, die auf langfristige Nutzung der Kernenergie setzen, vorgesehen. In Deutschland ist diese Voraussetzung nicht gegeben, deshalb wird hier der **Weg über ADS – Anlagen** vorgeschlagen.





- **Astrid:** Natrium – gekühlter schneller Brüter auch zur Transmutation (Frankreich)
- **Allegro:** Europäischer gasgekühlter schneller Reaktor (EU)
- **Myrrha:** Blei-Wismut gekühlter schneller Brüter; in einer späteren Version auch als beschleunigergetriebene unterkritische Anlage vorgesehen (Belgien)







- **Astrid:** Natrium – gekühlter schneller Brüter auch zur Transmutation (Frankreich)
- **Allegro:** Europäischer gasgekühlter schneller Reaktor (EU)
- **Myrrha:** Blei-Wismut gekühlter schneller Brüter; in einer späteren Version auch als beschleunigergetriebene unterkritische Anlage vorgesehen (Belgien)

• **Agate:** Unterkritische gasgekühlte beschleunigergetriebene Transmutationsanlage (RWTH, FZJ, FIAS, Siemens)





- **Astrid:** Natrium – gekühlter schneller Brüter auch zur Transmutation (Frankreich)
- **Allegro:** Europäischer gasgekühlter schneller Reaktor (EU)
- **Myrrha:** Blei-Wismut gekühlter schneller Brüter; in einer späteren Version auch als beschleunigergetriebene unterkritische Anlage vorgesehen (Belgien)
- **Agate:** **Unterkritische gasgekühlte beschleunigergetriebene Transmutationsanlage (RWTH, FZJ, FIAS, Siemens)**

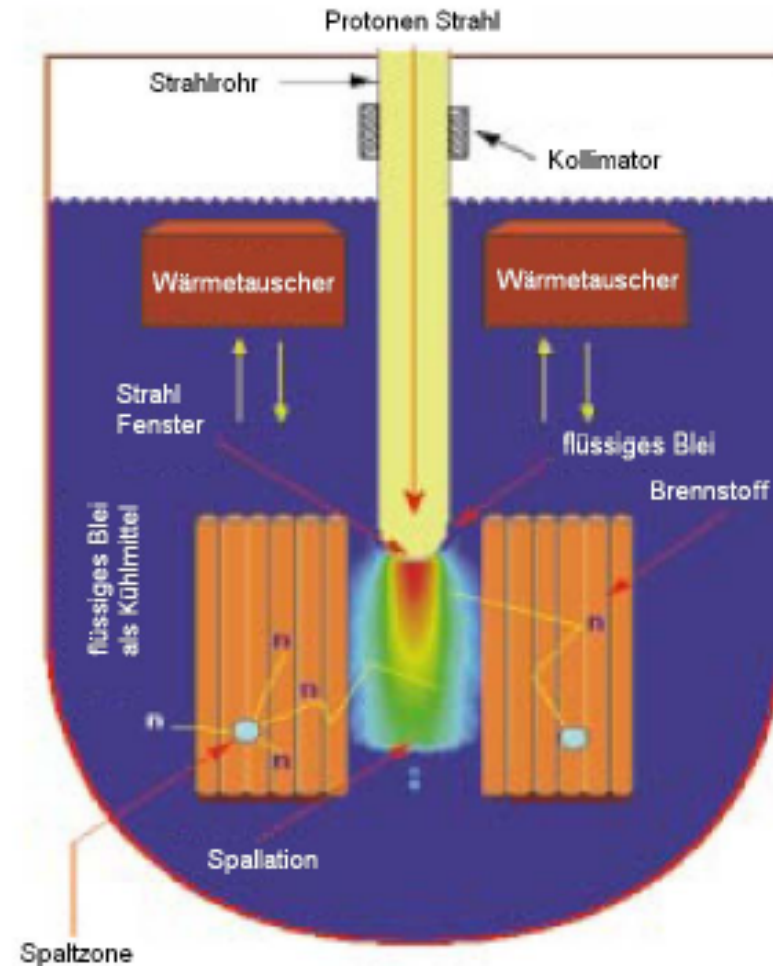
### • **Alternativ:**

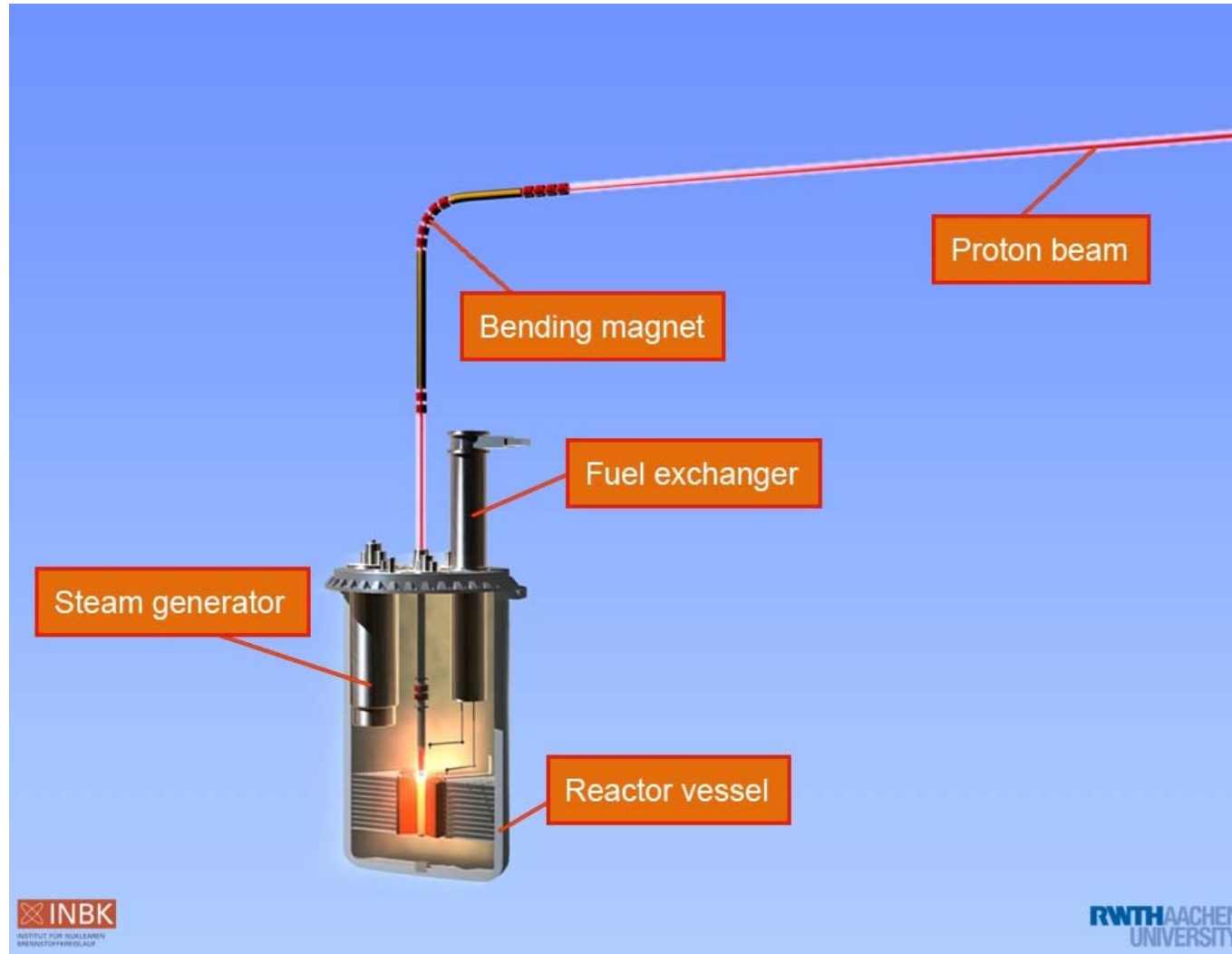
- härteres Neutronenspektrum in LWR
- Nutzung von Thorium
- Nutzung von Fusionsanlagen





- Beschleuniger getriebene Blei gekühlte Transmutations Anlage
- Leistung: 80 MW
- Kühlmittel: Blei-Wismuth







### Blei / Blei – Wismut

#### •Vorteil

- gute Wärmeabfuhr
- gute Nachwärmeabfuhr bei Störungen oder im Störfall

#### •Nachteil

- Korrosionsneigung
- Kontamination des gesamten Kühlmittels bei Brennelementdefekten
- Brennelementwechsel im Flüssigmetall ist sehr anspruchsvoll

### Gaskühlung (He, CO<sub>2</sub>)

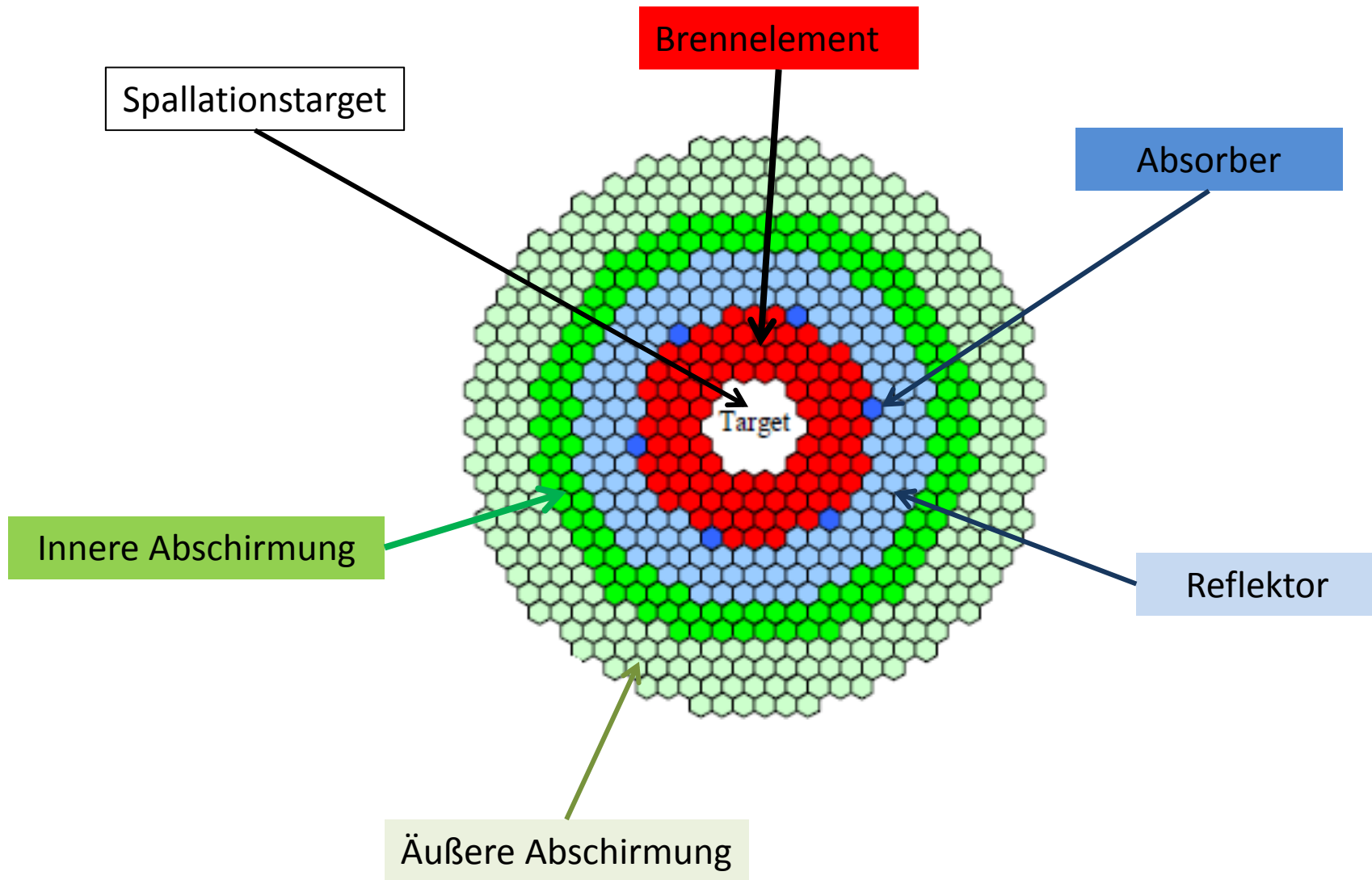
#### •Vorteil

- einfaches Brennelementhandling
- einfache Dekontamination bei Brennelementdefekten
- Vorteile bei der Genehmigungsfähigkeit wegen sicherheitstechnischer Nähe zum HTR
- höhere Flexibilität für Auslegung des Spallationstargets
- erwartete höhere Akzeptanz und Vorteile für Genehmigungsfähigkeit

#### •Nachteil

- schlechtere Wärmeabfuhr
- schlechtere Nachwärmeabfuhr bei Störung oder Störfall

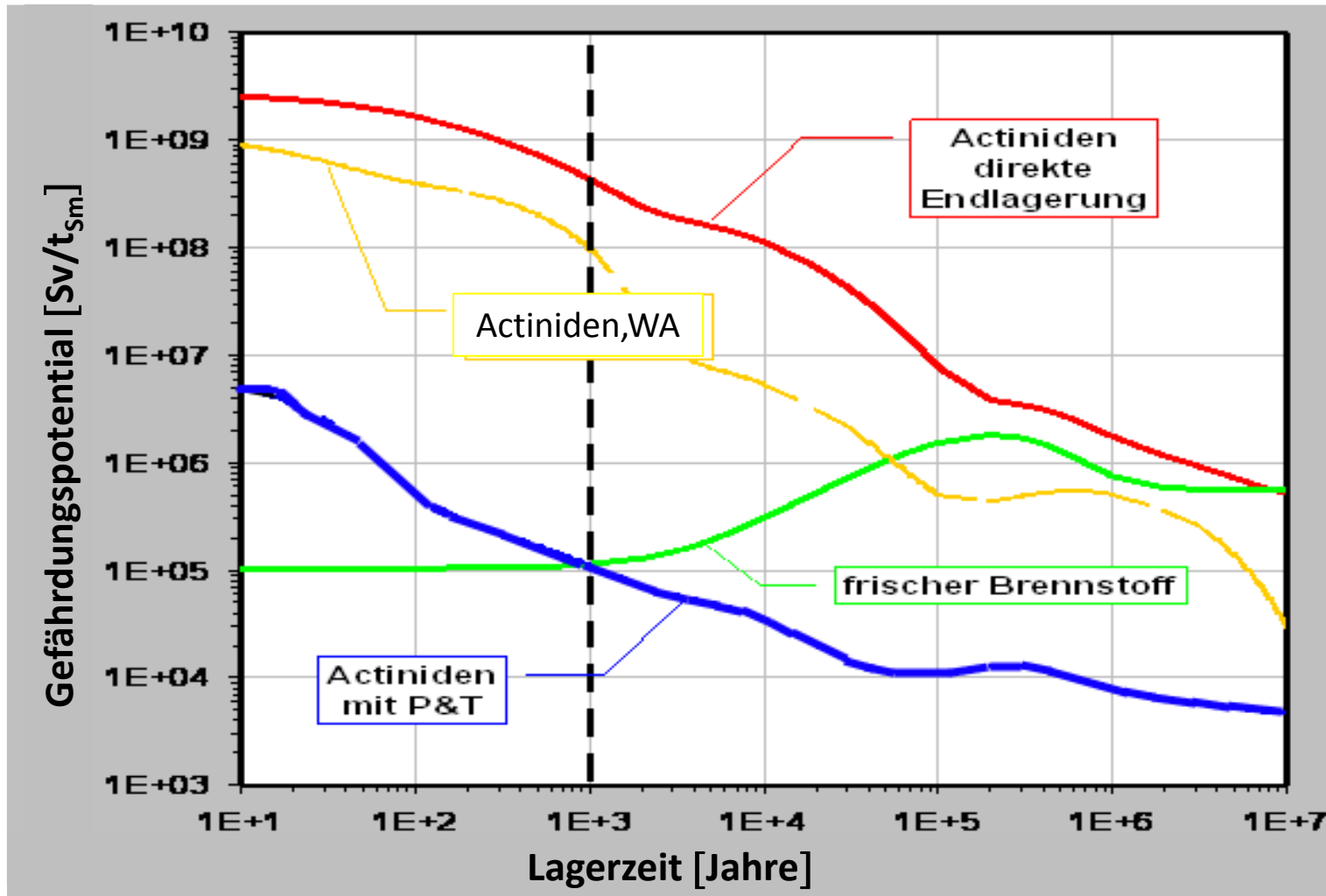






	Kennzahlen
Gesamtleistung der Anlage	100 MW <sub>th</sub>
Protonenenergie	600 MeV
Strahlleistung	3 MW
Neutronenausbeute	≈ 12/Proton
Quellstärke	3E+17 n/s
Targetmaterial	Pb, Pb-Bi
Kühlung	Gas (He, CO <sub>2</sub> )
k <sub>eff</sub>	0,95

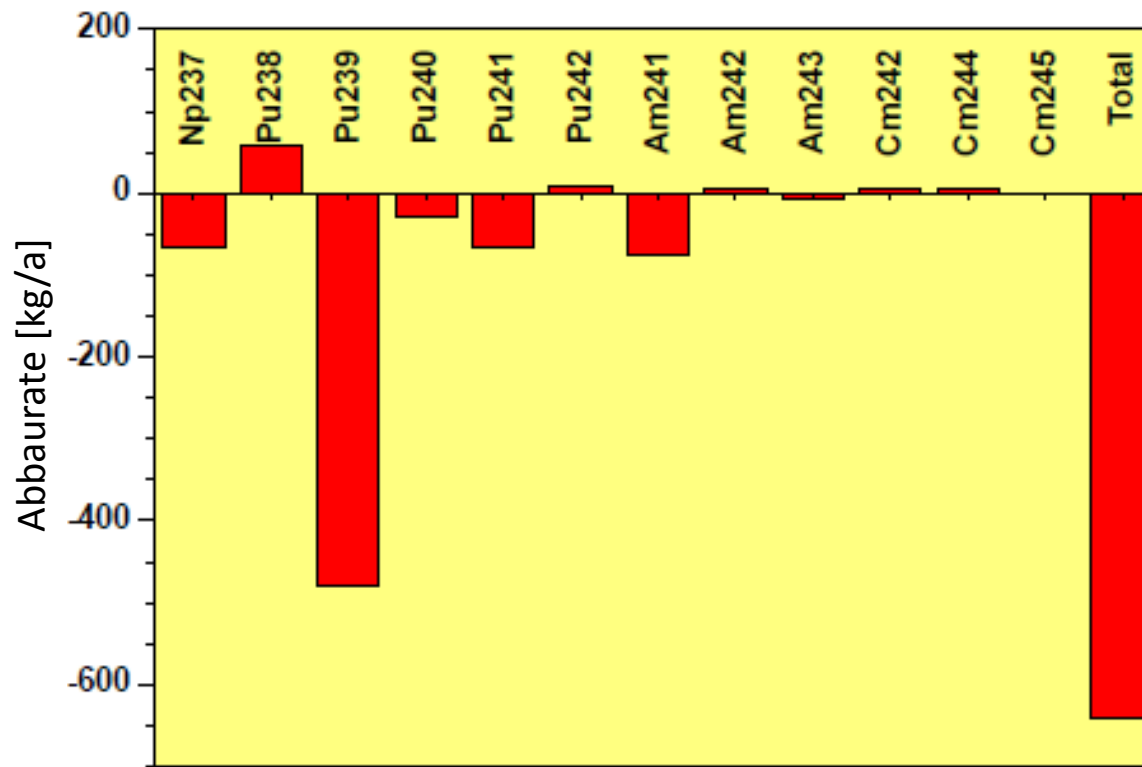








Reaktorleistung: 1800 MW<sub>th</sub>



Source: Hejzlar, Driscoll, Kazimi, Nucl. Sci. Eng., 139 (2001)

**aber: Aufbau bestimmter Isotope**





- Deutschland benötigt ein **Endlager** für hochradioaktive Abfälle etwa **2035**
- Um zu einer Entscheidung zu kommen, ob eine direkte Endlagerung der abgebrannten Brennelemente oder eine Transmutation der langlebigen Radionuklide erfolgen soll, muss eine solche Anlage etwa **2025 in Betrieb** gehen.
- Nach einer etwa fünfjährigen Betriebszeit kann die Bewertung erfolgen ob das Konzept zu den erwünschten Ergebnissen führt.
- Auf dieser Grundlage kann dann die entsorgungspolitische Entscheidung getroffen werden, ob Transmutation Teil des **Entsorgungskonzeptes** werden soll.





- Transmutationsrate: 42kg/TWh<sub>th</sub>
- 1 t Kernbrennstoff, Abbrand 33GWd/t erzeugt: 9 kg Pu, 0,626kg MA
- Gesamtmenge an abgebrannten Brennelementen in Deutschland (32a Laufzeit): ca. 10.000 t<sub>SM\*</sub>
- Resultierende Menge an TRU\*\* : 125 t TRU
- Erforderliche Reaktorjahre (3.300 TW<sub>th</sub> – Anlage): 100
  
- Erforderlich Anzahl von Anlagen: 2 mit 50a Laufzeit**

\* Schwermetall  
\*\* Transuranic waste





- Die grundsätzliche Machbarkeit einer Transmutationsanlage sollte gezeigt werden
- Dies erfolgte in einer Kooperation zwischen dem INBK/RWTH Aachen und dem FZ-Jülich sowie den Partnern Siemens und FIAS
- Technische Ausführung der Anlage:
  - beschleunigergetrieben
  - gasgekühlt
  - unterkritisch
- Finanzierung: Land Nordrhein-Westfalen
- Zeitrahmen: 09/2009 – 04/2011







- Entsorgungspolitische Relevanz und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Transmutation
  - Abbrandszenarien für Deutschland (WA/DE)
  - Weg bis zu einer großtechnischen Anlage
- Entwicklung eines Basic Design
- Sicherheitsanalysen
- Vertiefende Untersuchungen, Nachweise
  - Anforderungen an die Beschleuniger - Stabilität
  - Wärmeabfuhr Spallationstarget
  - Genehmigungsfähigkeit
- Bewertung alternativer Konzepte



### Primärkreislauf : He

Druck: 60 bar

$T_{in}$ : 250 °C

$T_{out}$ : 405 °C

$m_{flow}$ : 110 kg/s

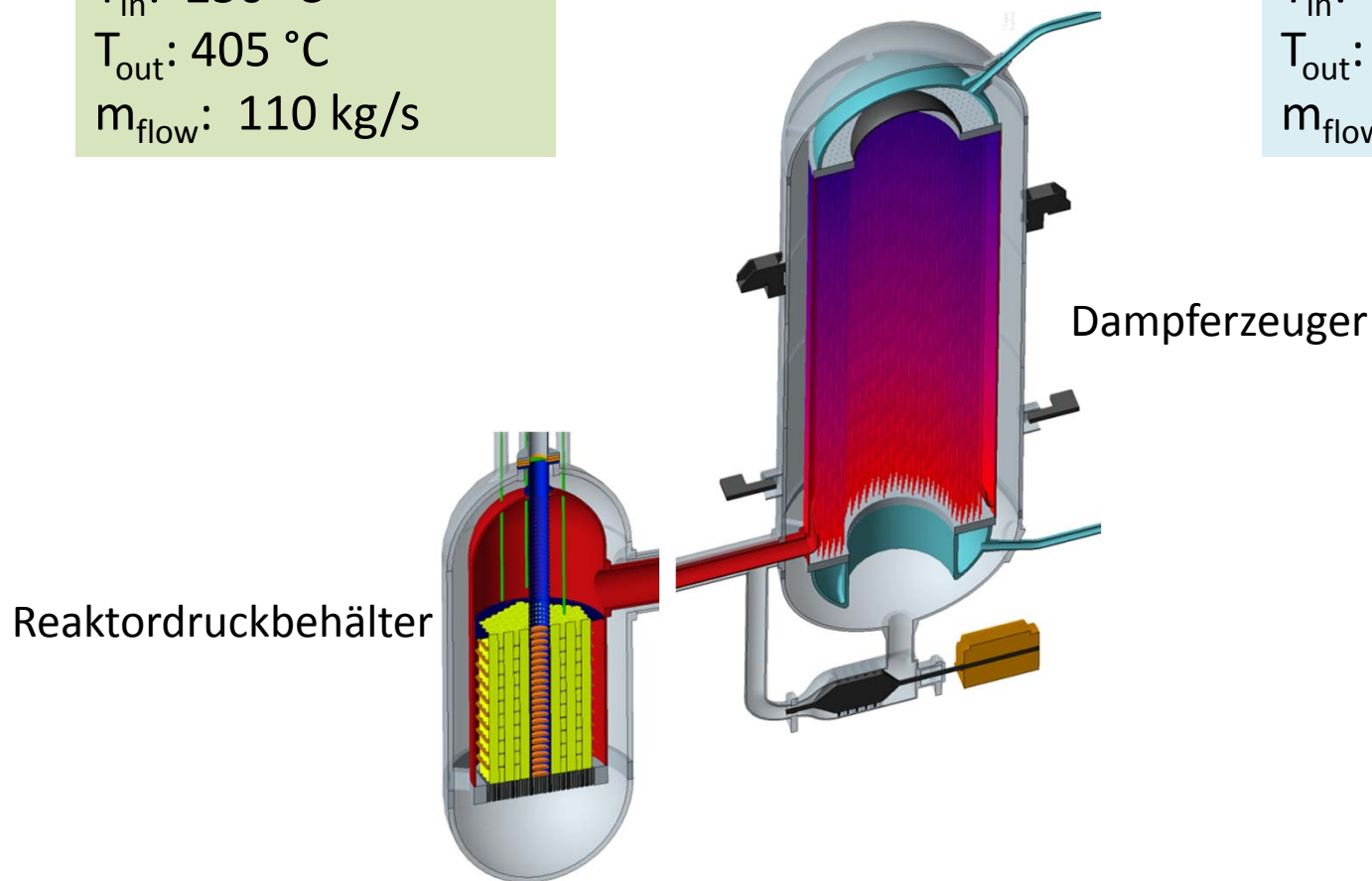
### Sekundärkreislauf : H<sub>2</sub>O

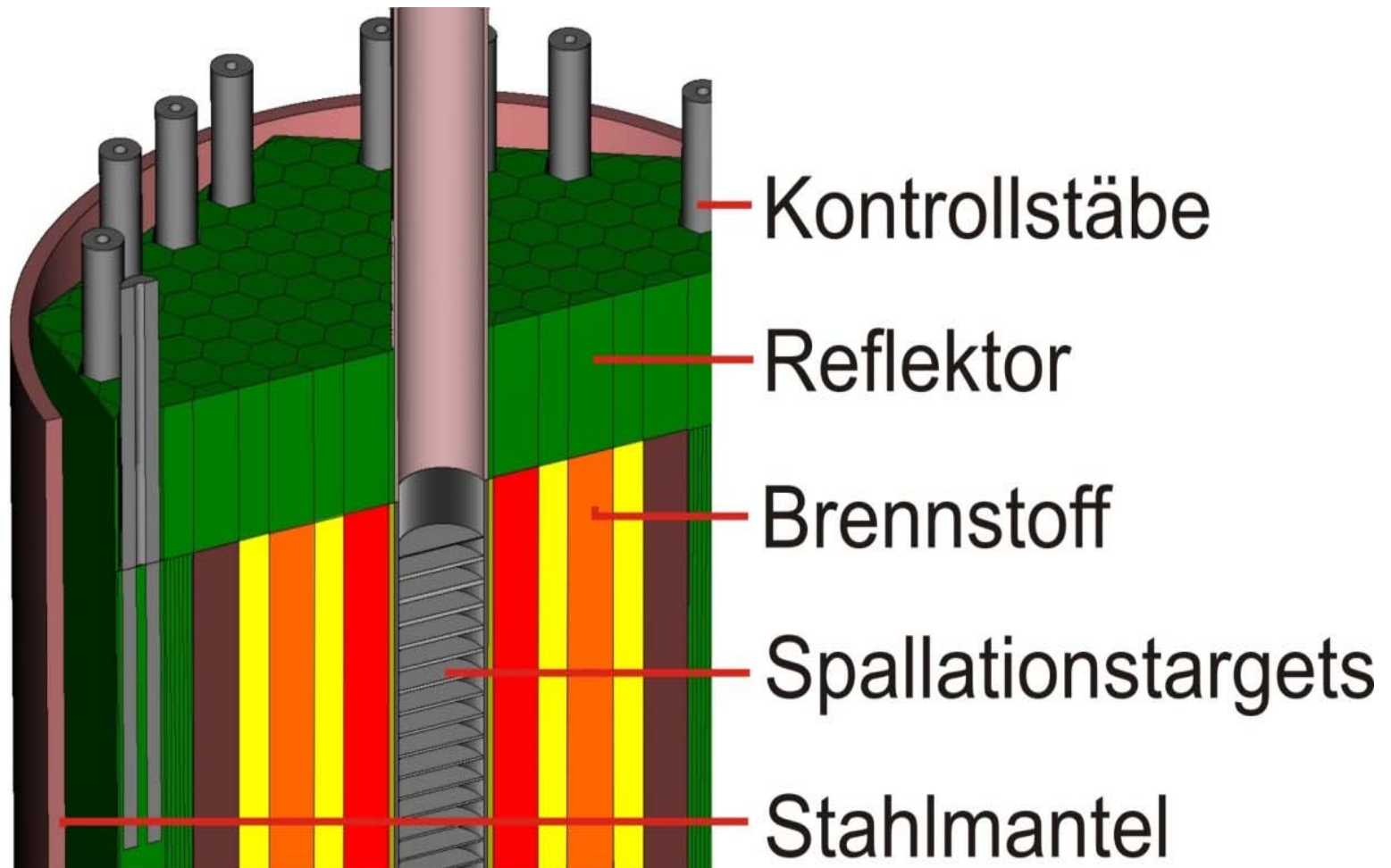
Druck: 40 bar

$T_{in}$ : 180 °C

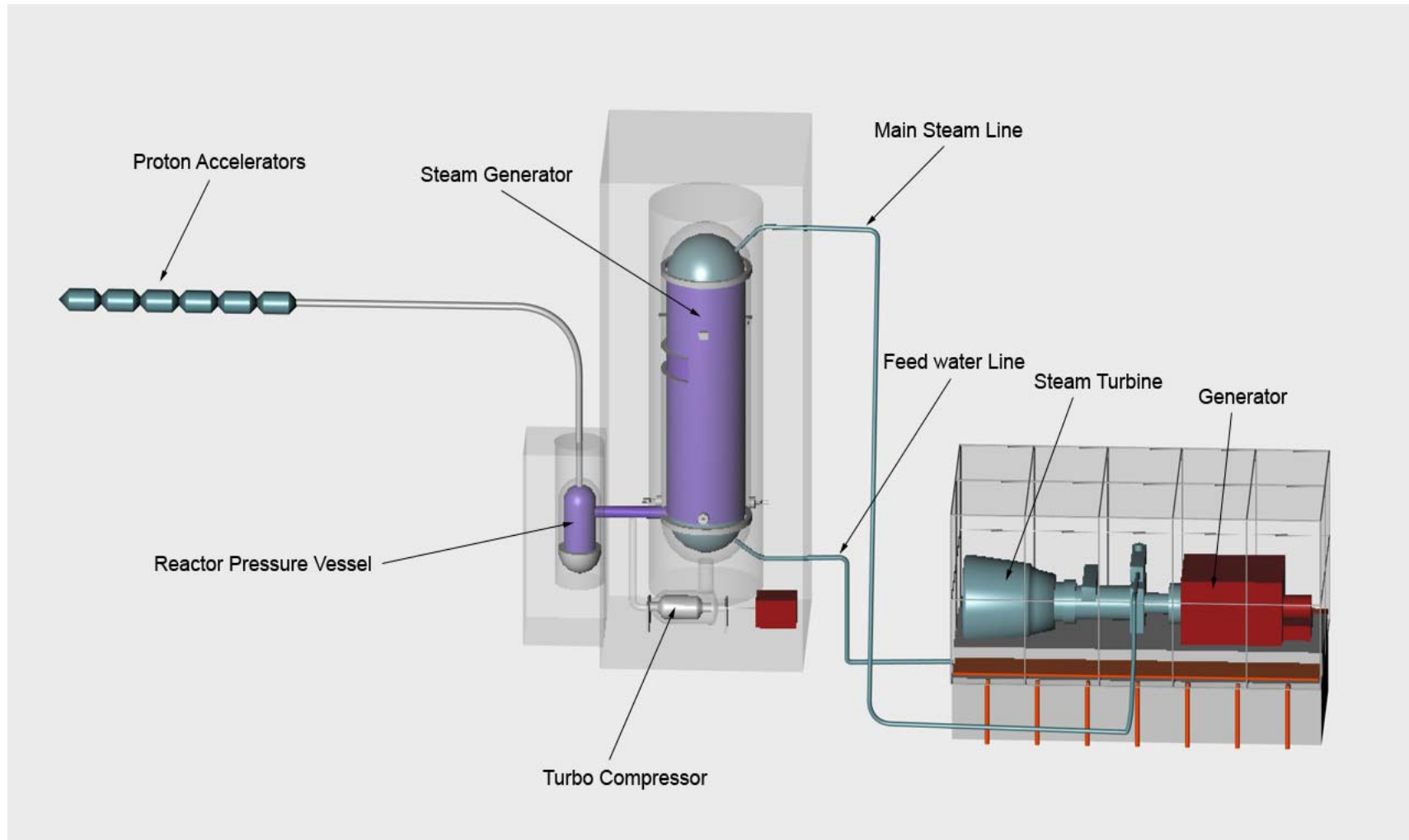
$T_{out}$ : 295 °C

$m_{flow}$ : 40 kg/s



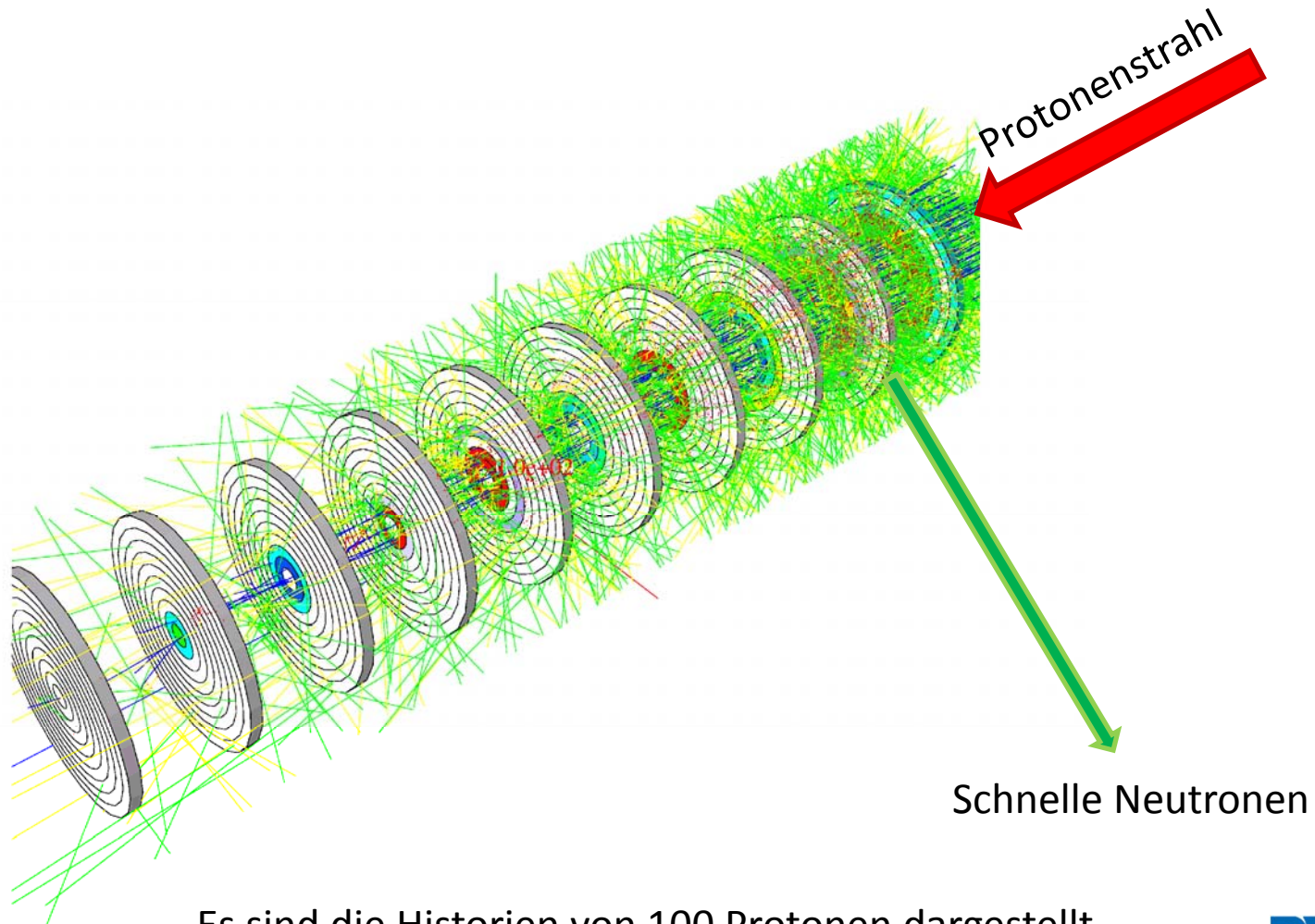








segmentiertes Target



Es sind die Historien von 100 Protonen dargestellt





- Wirkungsquerschnitte für Minore Aktiniden
- Beschleunigerauslegung: Minimierung Ausfallzeiten
- Strahlfenster: Wärmeabfuhr
- Spallationstarget: Wärmeabfuhr, Optimierung Design, Lebensdauer
- Komplettierung Sicherheits-/Störfallanalysen
- Reaktorkernauslegung und Transmutationseffekt: Optimierung
- Brennstoffauslegung: umfangreicher F&E Bedarf





Experimentieranlage:	15 Jahre (MOX) 15 Jahre (Pu, MA)
Demonstrationsanlage:	20 Jahre
Großtechnische Anlage:	30 Jahre
$\Sigma$	<b>80 Jahre</b>





- Durch Abtrennung (Partitioning) und Spaltung (Transmutation) der langlebigen Radionuklide kann erreicht werden, dass die Radiotoxizität bei **1000 Jahren** auf das Niveau von Natururan sinkt.
- Damit wird aber die Notwendigkeit für ein geologisches Endlager, das die Abfallstoffe für einen Zeitrahmen von 1 Mio. Jahre sicher einschließt, weiterhin benötigt. Das von einem Endlager ausgehende **Gefährdungspotential** ist aber um etwa 2 Größenordnungen reduziert.
- **International** werden große Anstrengungen unternommen, P&T zur Anwendungsreife zu bringen. Weit überwiegend wird dabei aber der Schwerpunkt auf Energiegewinnung und Erbrüten neuen Brennstoffs gelegt (Schneller Brüter)

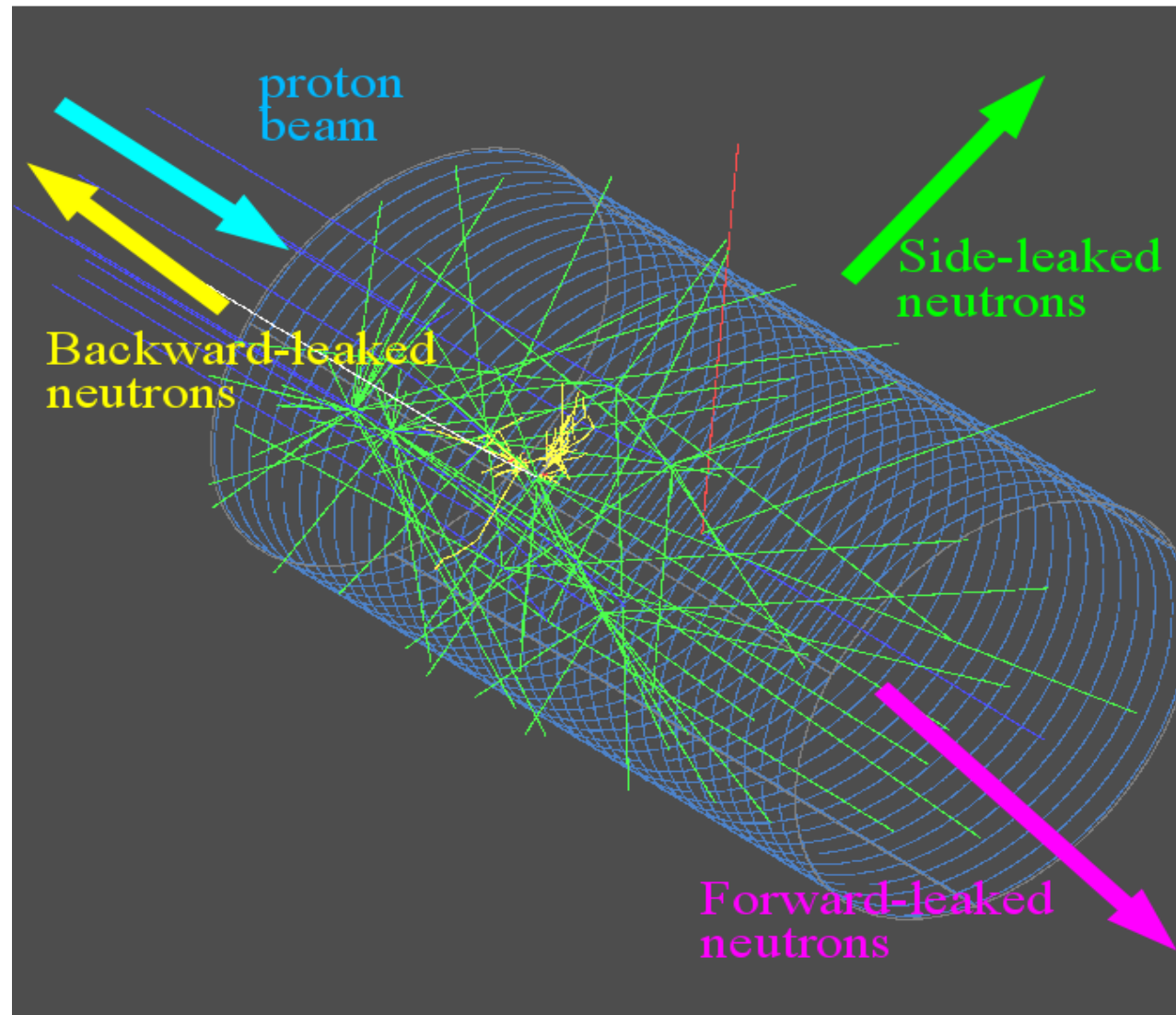




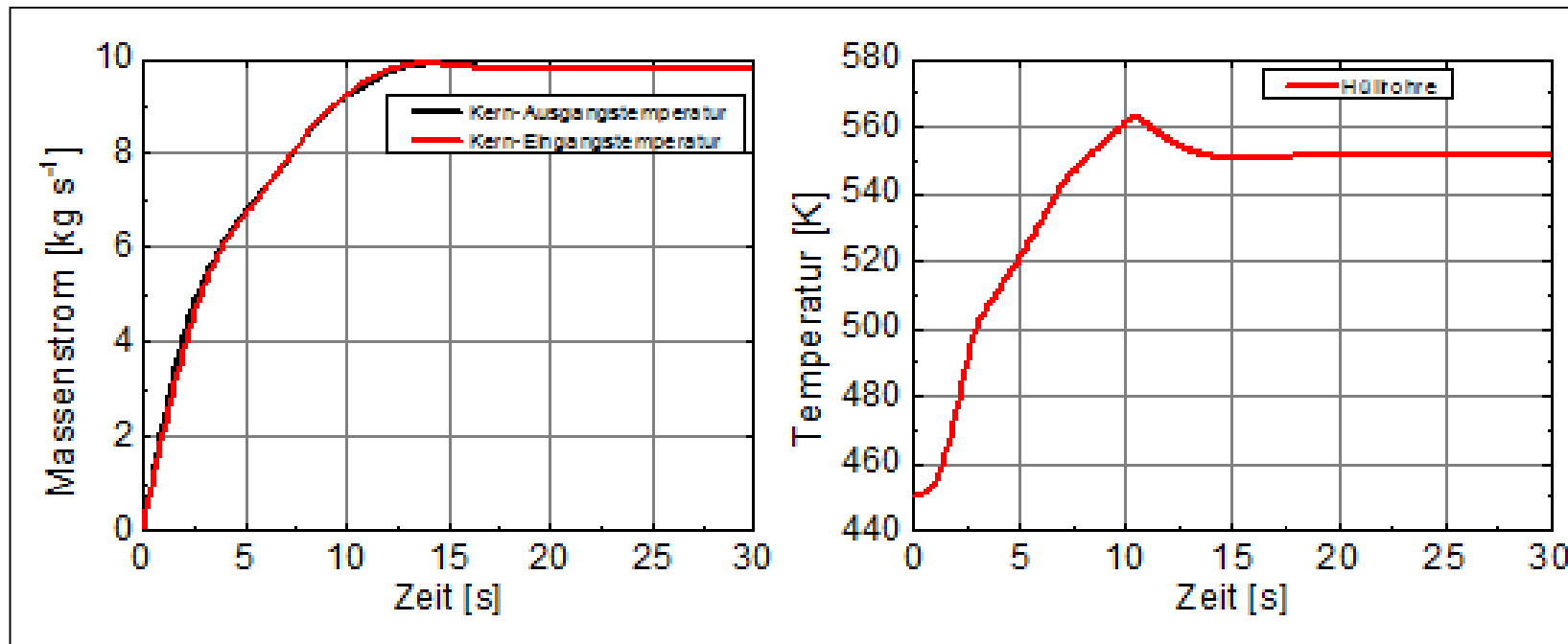
- Bei der Beschränkung der Kernenergienutzung auf eine Brückentechnologie ist gleichwohl im Sinne der **Daseinsvorsorge** die Reduzierung der langfristigen Radiotoxizität zu betrachten und auf ihre Wirksamkeit hin zu untersuchen.
- Das hier dargestellte Konzept eines Aktinidenbrenners in Form einer **unterkritischen gasgekühlten Anlage** erscheint geeignet, das Endlagerproblem zu entschärfen. Konsequenz der Transmutation ist das Erfordernis zur Wiederaufarbeitung.
- Die **Machbarkeit** einer solchen Transmutationsanlage muss gezeigt werden. Dies erfolgt in einer hierfür auf den Weg gebrachten Kooperation zwischen dem INBK/RWTH Aachen und dem Forschungszentrum in Jülich.









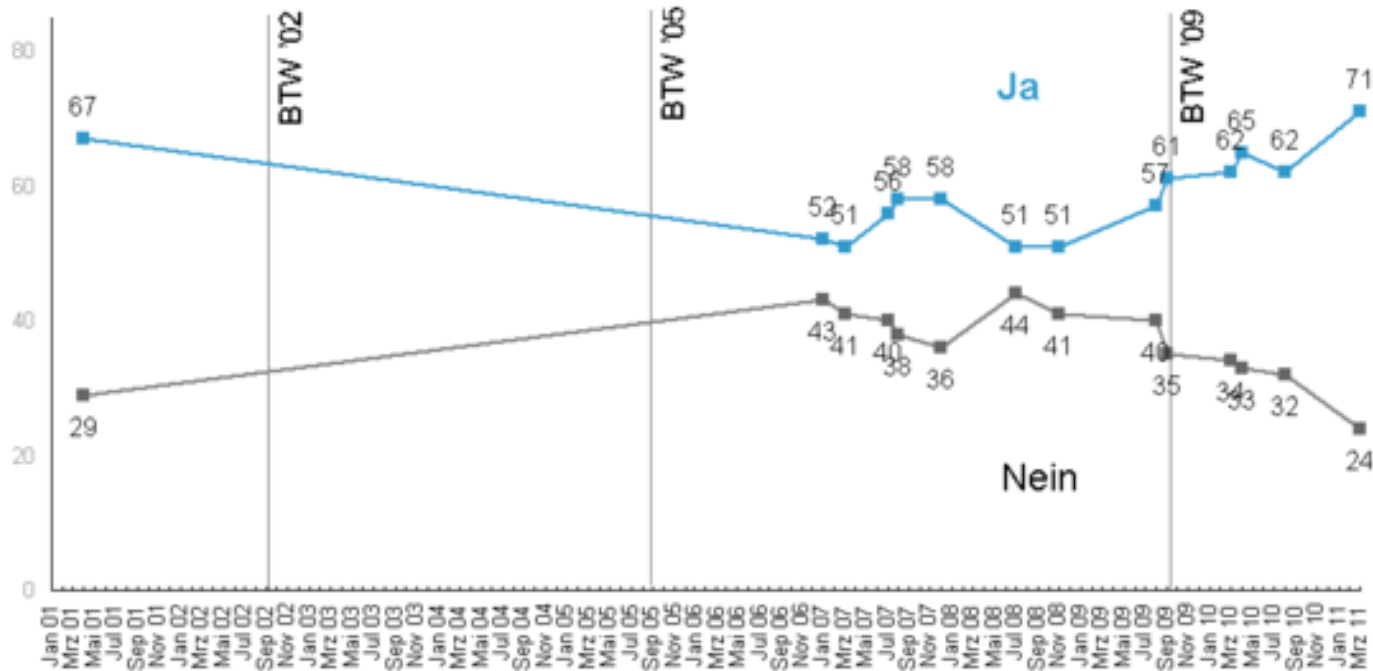


Massendurchsatz und Temperatur des Heliums während der Naturzirkulation



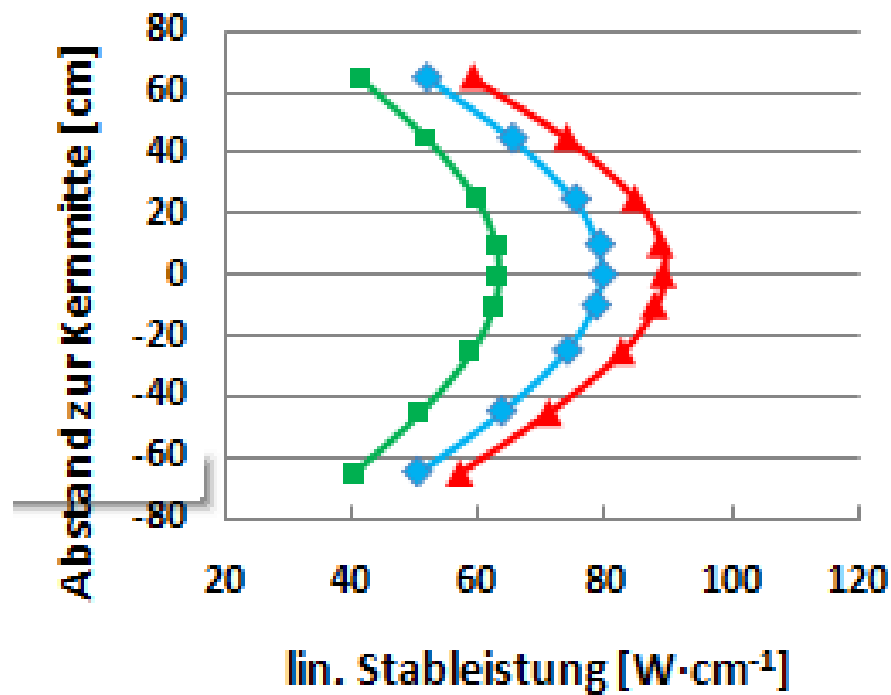


Halten Sie es für richtig, dass Deutschland aus der Atomenergie aussteigt?

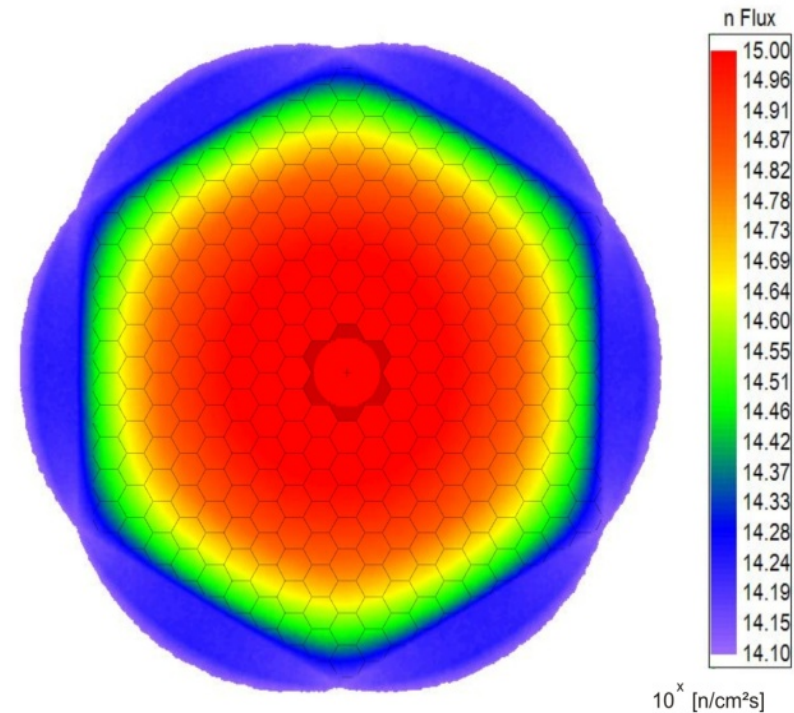


14.03.2011

# Leistungsverteilung im Reaktor

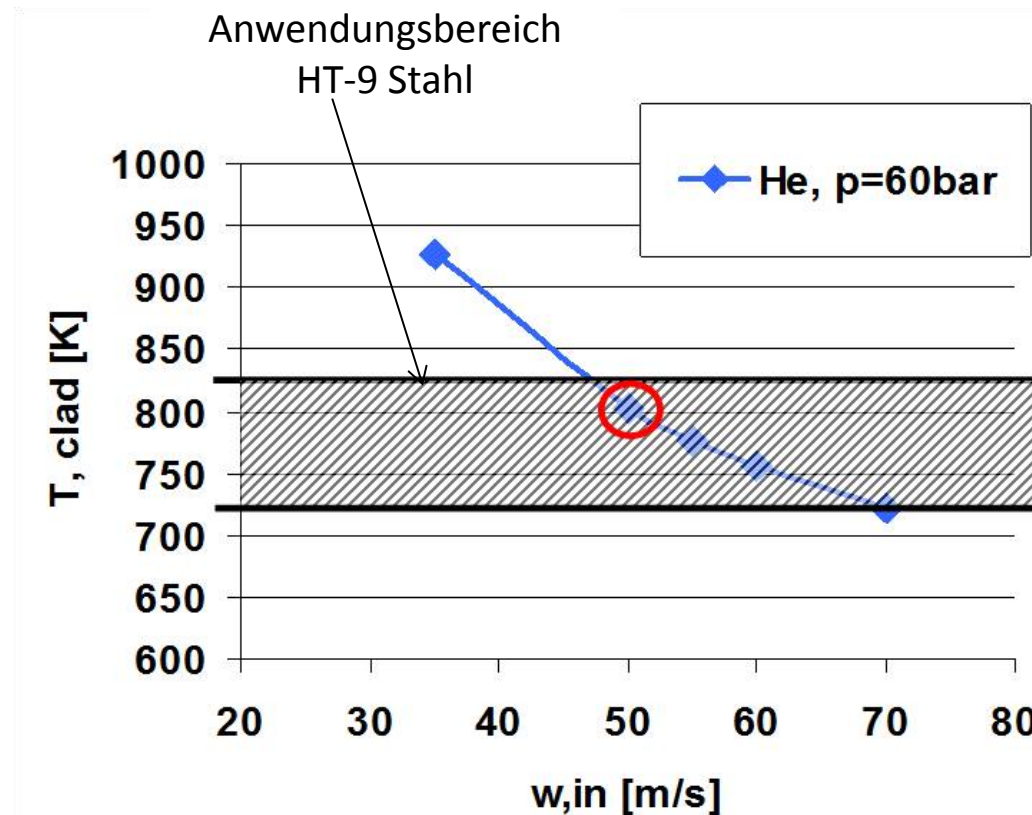


für MOX - Brennstoff



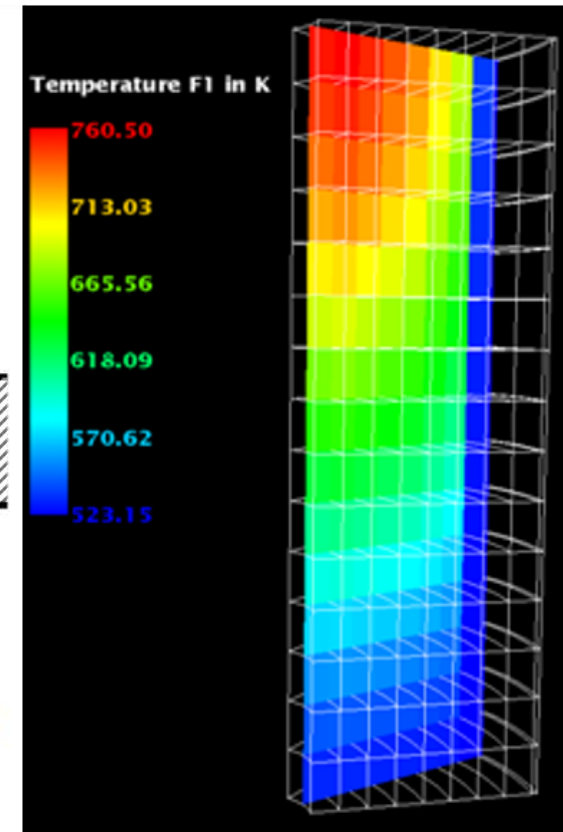
Draufsicht

# Referenz Szenario für die Kühlung des Kerns



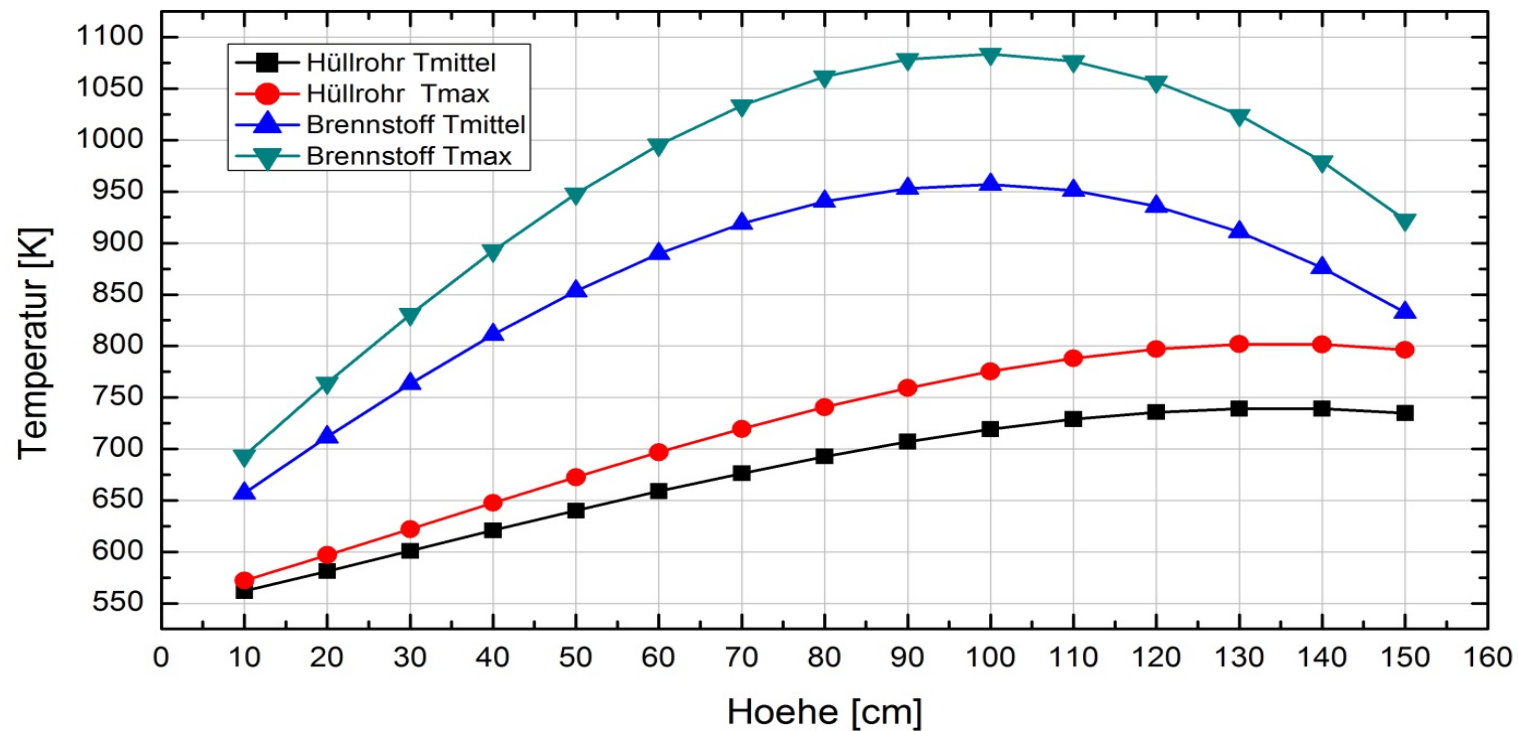
- $T_{He,in} = 523$  K
- $T_{He,out} = 678$  K
- $T_{clad,max} = 803$  K
- $T_{fuel,max} = 1084$  K

Massenstrom= 110 kg/s



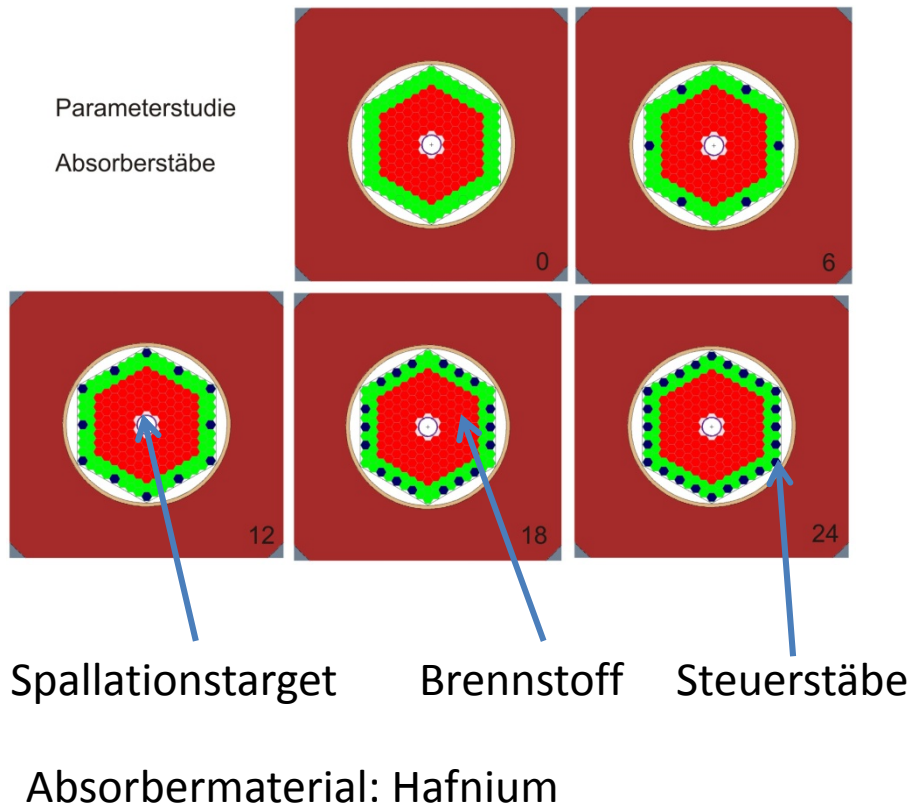
Temperaturverteilung in  
1/8tel des Kerns

# Brennstoff- und Hüllrohrtemperatur

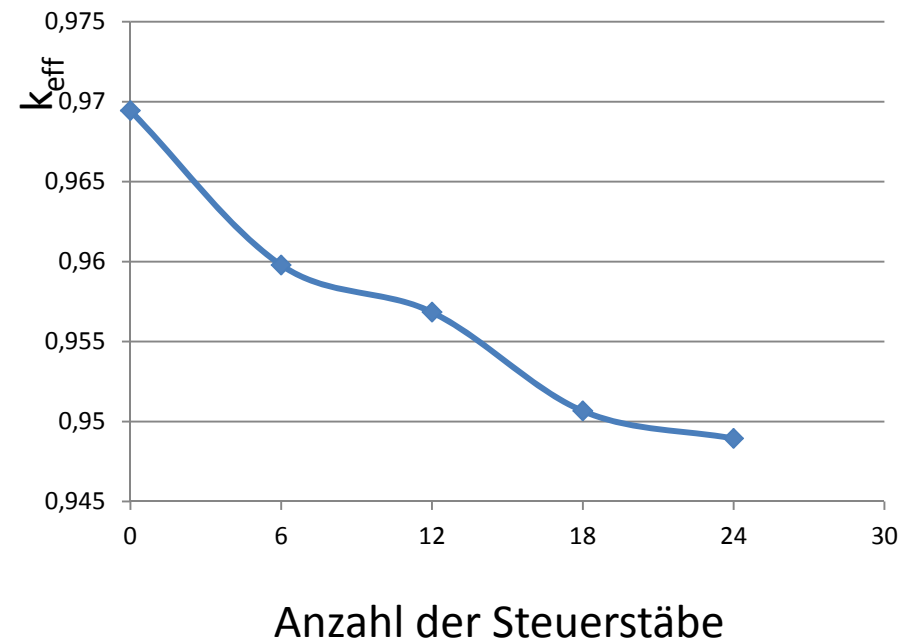


# Regelung einer ADS-Anlage mit Steuerstäben

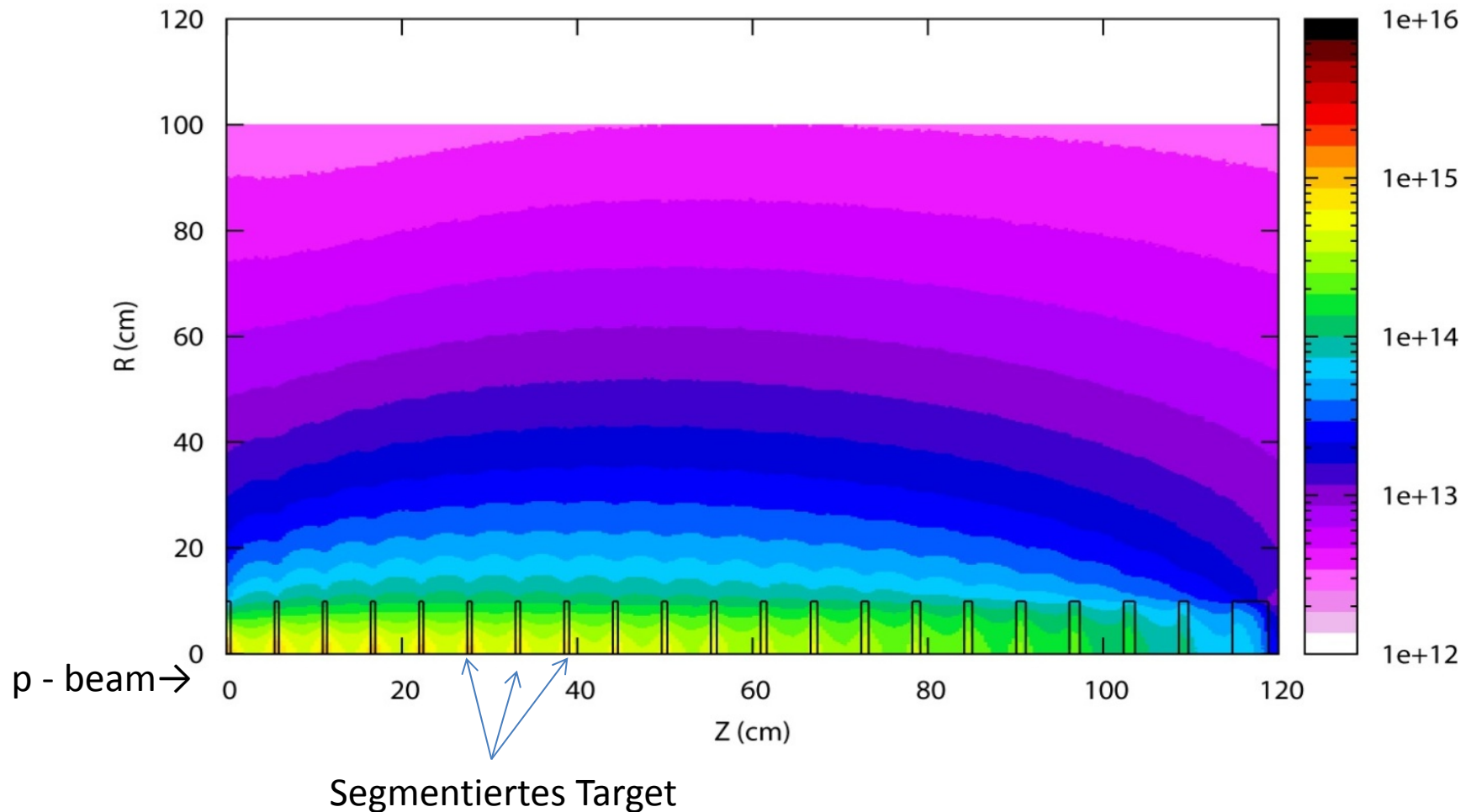
Querschnitt des Reaktorkerns



Kritikalität in Abhängigkeit von der Anzahl der Steuerstäbe

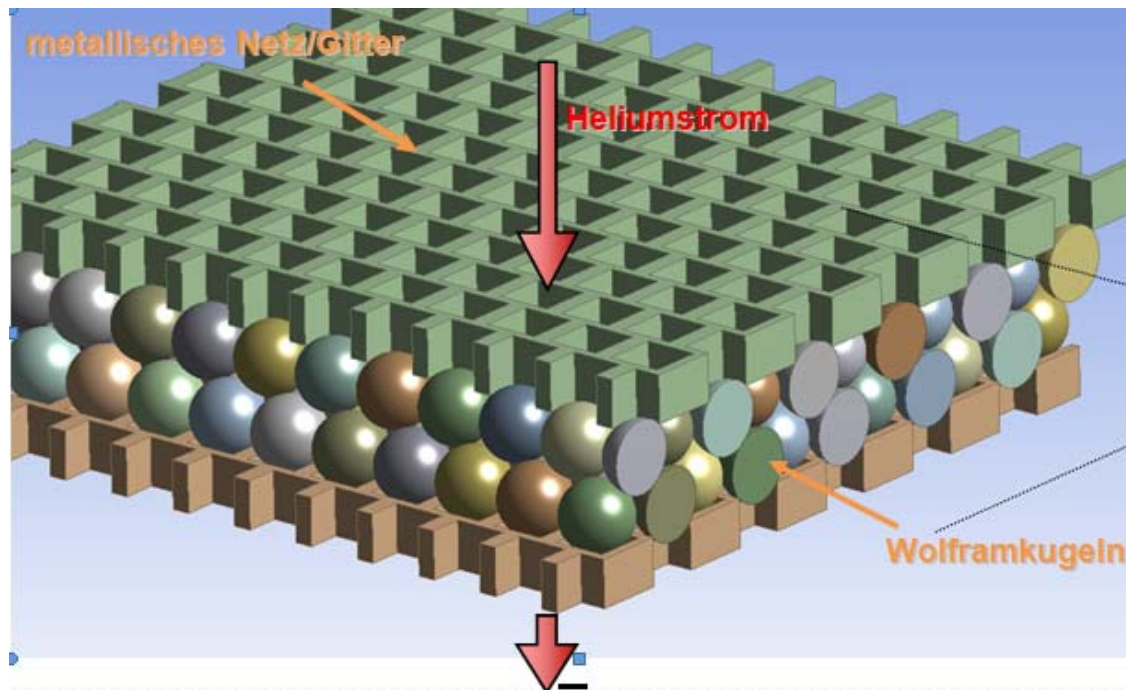


# Neutronenflussverteilung

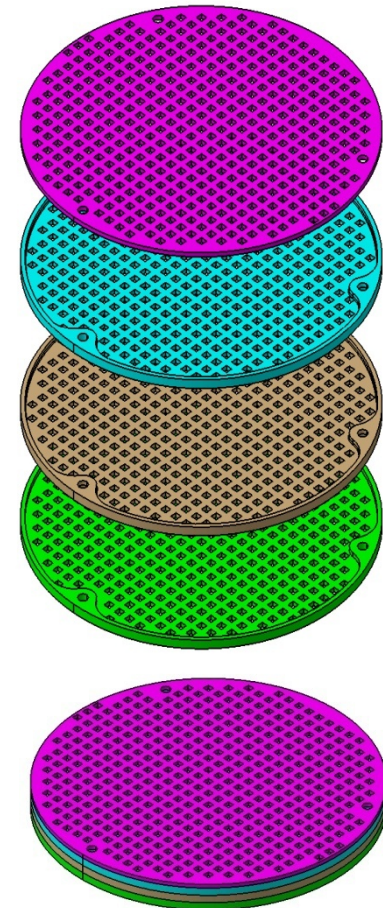


# Spallationstarget

Target mit Kugeln



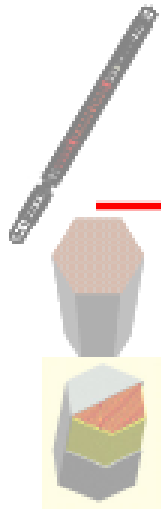
Plattentarget



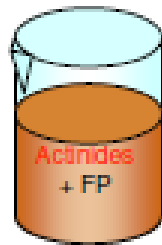




Abgebranntes Brennelement



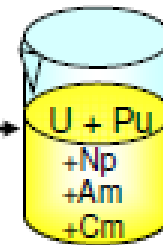
Auflösung



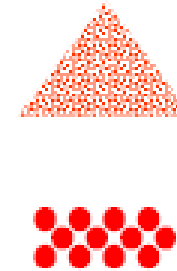
Partitioning



GANEX



*Co-conversion*

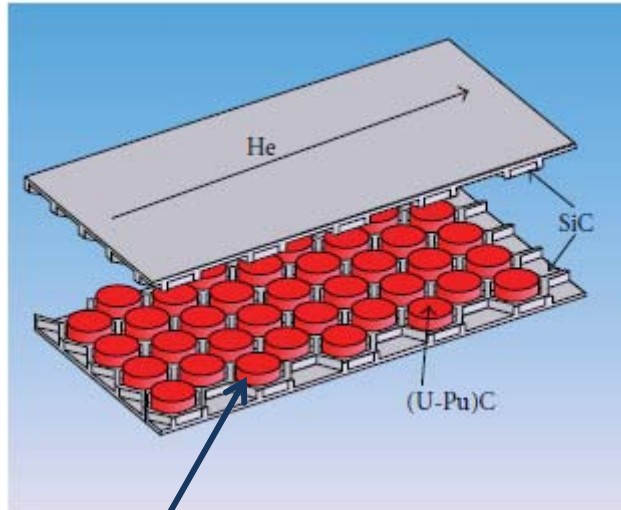


Neuer Brennstoff



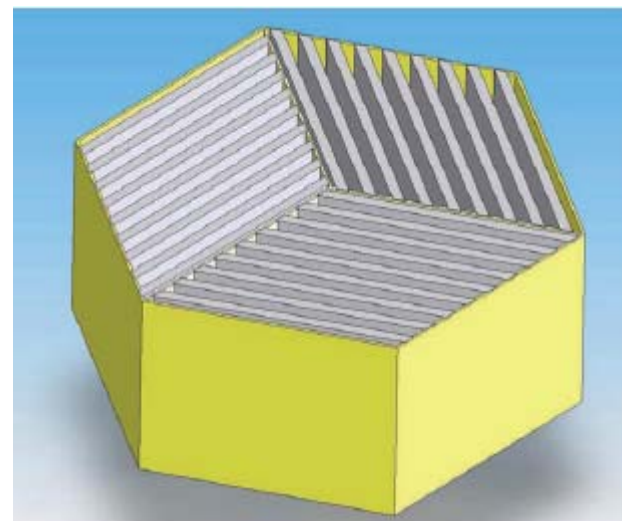


## Brennstoffplatte



Brennstoffpellet

## Brennelement



# Kühlbarkeit von Strahlfenster und Spallationstarget

