

# Kann Transmutation die Lösung sein?

**KARLSRUHER ATOMTAGE**

**16. – 19. JULI 2015**

**Prof. Dr. Bruno Thomauske**

RWTH Aachen

Institut für Nukleare Entsorgung und Techniktransfer (NET)

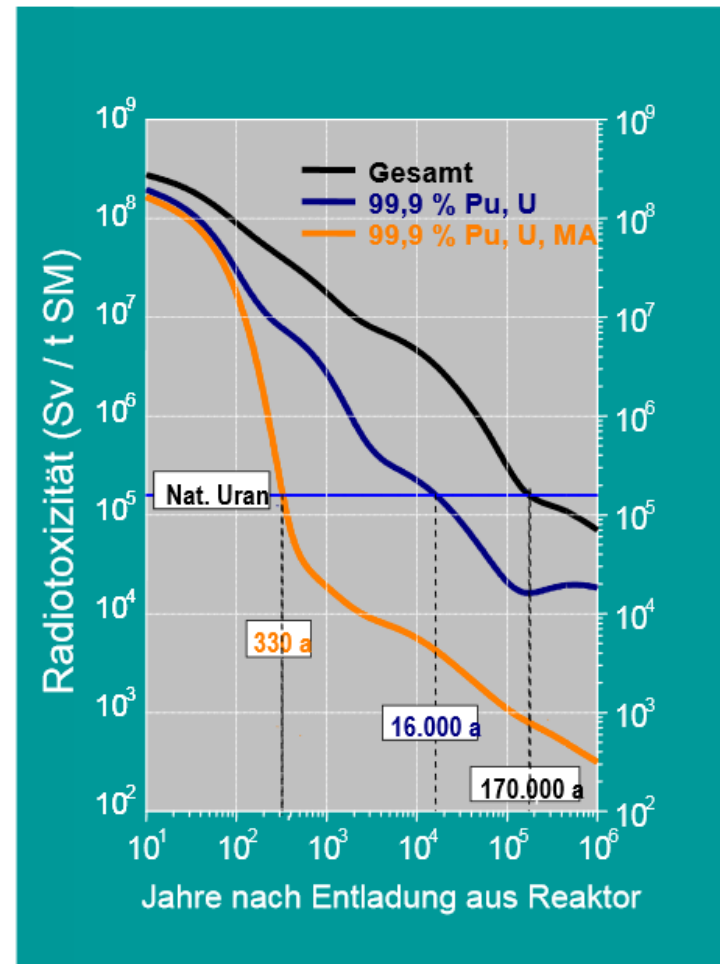
# VORTRAGSÜBERSICHT

- 1. Motivation für Forschungsarbeit**
- 2. Was ist Transmutation?**
- 3. Welche Möglichkeiten zur Transmutation gibt es?**
- 4. Welche Infrastruktur ist erforderlich?**
- 5. Wie lange dauert es?**
- 6. Unter welchen Randbedingungen kann Transmutation sinnvoll sein?**

# POTENTIAL BENEFIT OF ADVANCED FUEL CYCLES WITH P&T

## Reduction of Radiotoxicity

- **Partitioning and transmutation of 99.9% of Pu, U and MA**
  
- **Transfer from geological to historical time scales in nuclear waste disposal**



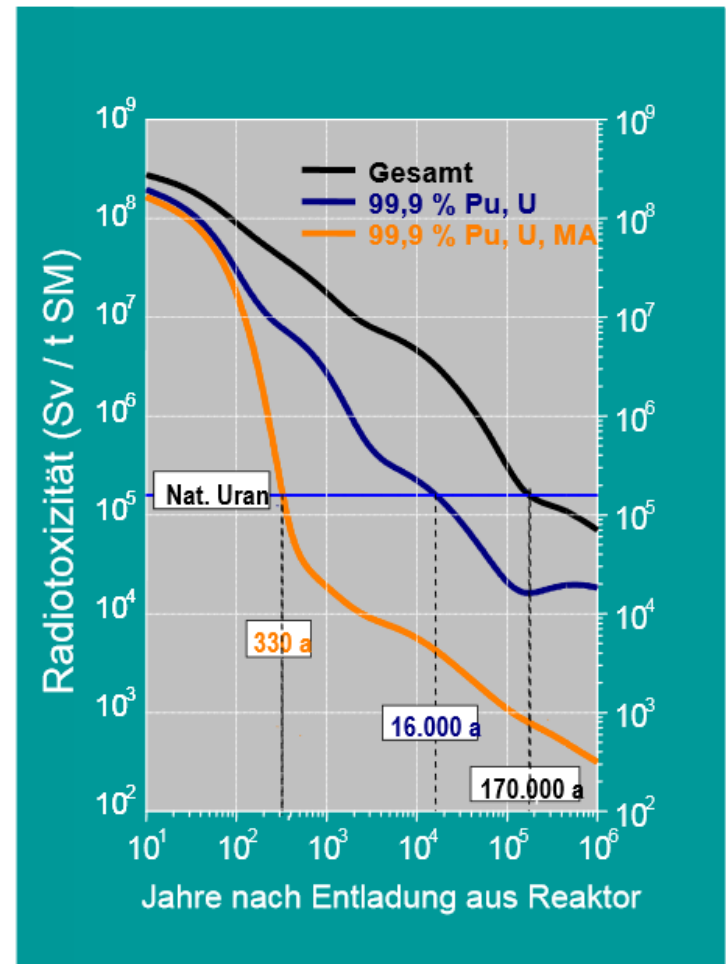
# POTENTIAL BENEFIT OF ADVANCED FUEL CYCLES WITH P&T

## Reduction of Radiotoxicity

- Partitioning and transmutation of 99.9% of Pu, U and MA

- Transfer from geological to historical time scales in nuclear waste disposal

**Ist diese Erwartungshaltung erfüllbar?**



Quelle: KIT, IAEA – INPRO – 22.09.2010, Vienna

# WAS IST TRANSMUTATION?

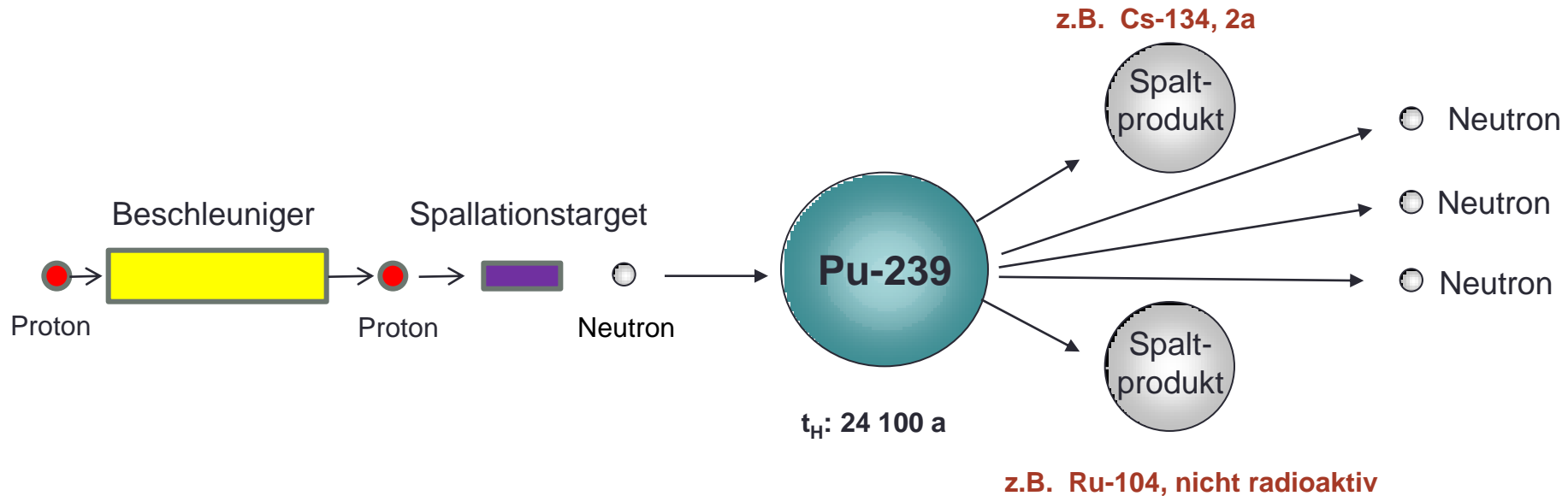
- Transmutation wandelt einen Teil der hoch radioaktiven, langlebigen Stoffe in kurzlebigeren Spaltprodukte um.
- Voraussetzung hierfür ist, dass die langlebigen Stoffe durch Partitionierung (Wiederaufarbeitung) abgetrennt werden, damit sie dann in Transmutationsanlagen gespalten werden können.
- Die langlebigen Radionuklide sind: **Plutonium** und die minoren Aktiniden (**Neptunium, Americium und Curium**).
- Die minoren Aktiniden werden in einer Transmutationsanlage mit schnellen Neutronen beschossen und dadurch in kurzlebigeren oder stabile Atomkerne umgewandelt.
- **Fragestellungen:**
  - Effizienz der Umwandlung
  - Dauer des Prozesses
  - Geht der Prozess auch für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung
  - Welche Voraussetzungen müssen erfüllt werden
  - **Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen (kein Export der BE, keine Wiederaufarbeitung, keine gewerblichen Kernspaltungsanlagen in Deutschland)**

# WELCHE MÖGLICHKEITEN ZUR TRANSMUTATION GIBT ES?

- 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.
- Eine Alternative für Länder ohne langfristige Nutzung der Kernenergie stellt der Weg über ADS – Anlagen dar.

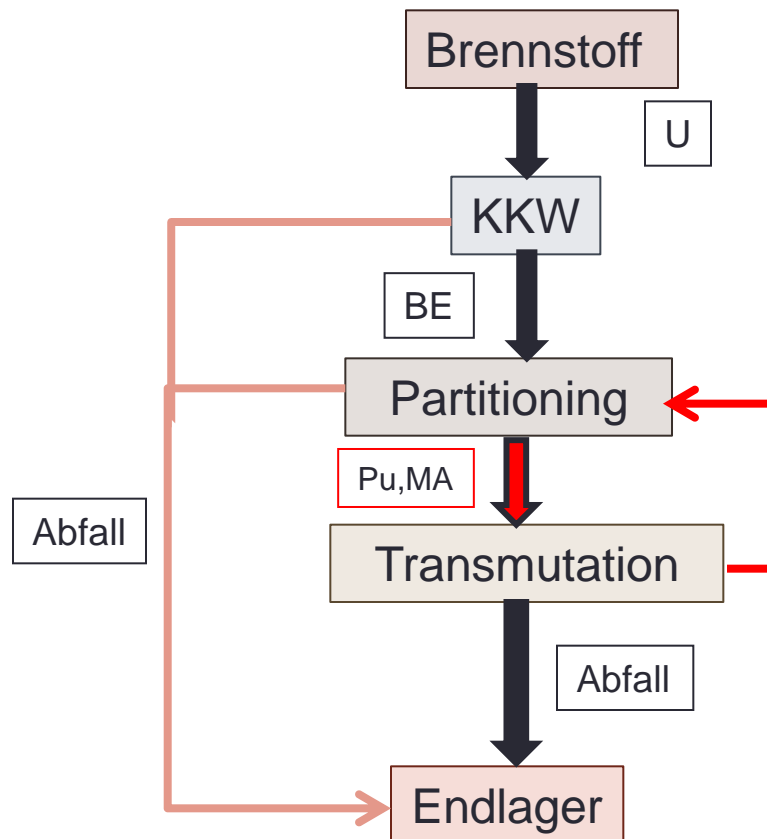


# WIE FUNKTIONIERT DIE TRANSMUTATION IN ADS-ANLAGEN?



- Accelerated Driven System (**ADS**) = Beschleuniger Getriebene Unterkritische Anlage
- Beschleuniger erzeugt schnelle Neutronen, die langlebige Radionuklide spalten

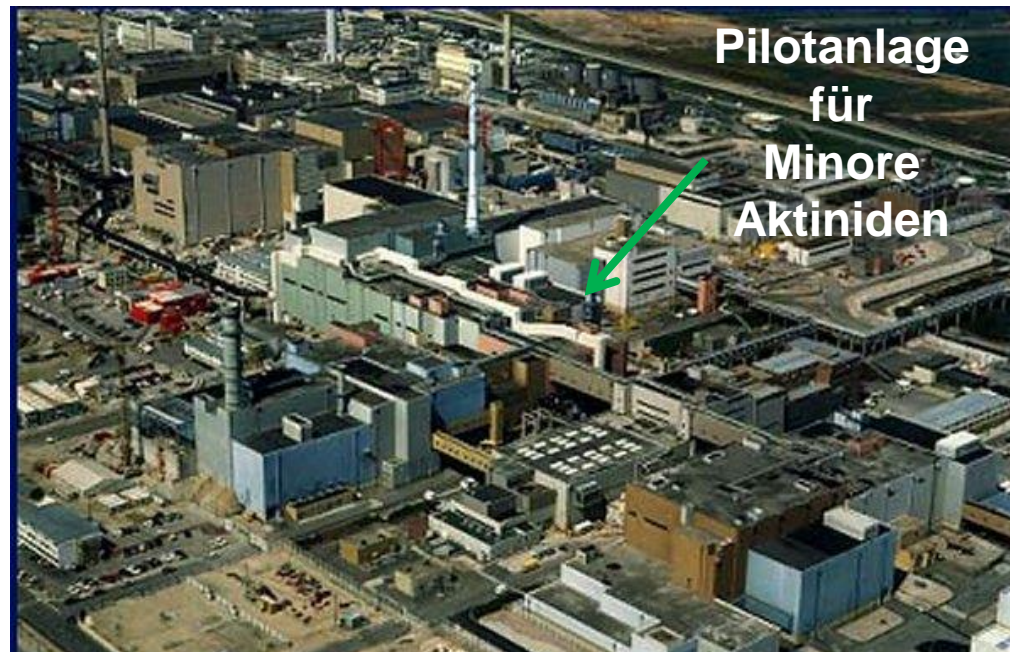
# DER TRANSMUTATIONSPROZESS





# WELCHE INFRASTRUKTUR IST ERFORDERLICH?

## 1. Wiederaufarbeitungsanlage

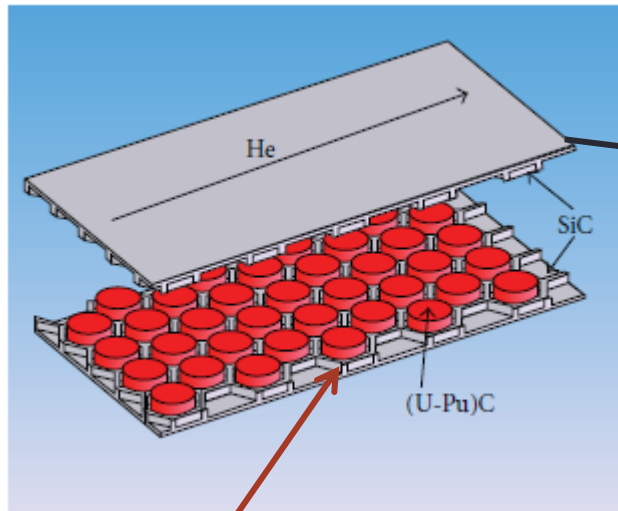


z. B.: Wiederaufarbeitungsanlage La Hague, Frankreich

# WELCHE INFRASTRUKTUR IST ERFORDERLICH?

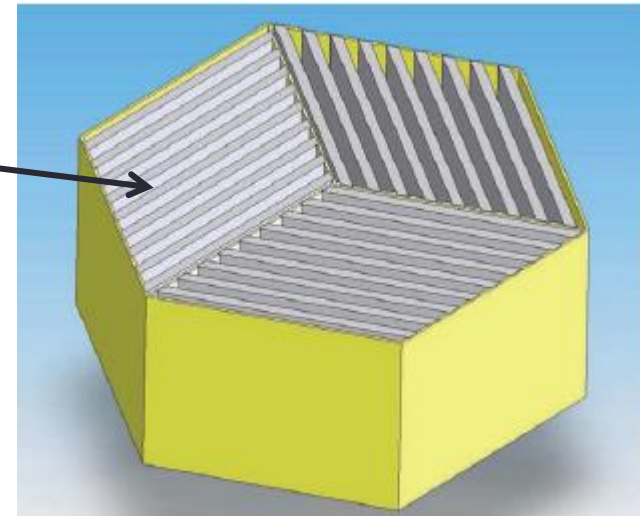
## 2. Brennelementfertigung

Brennstoffplatte



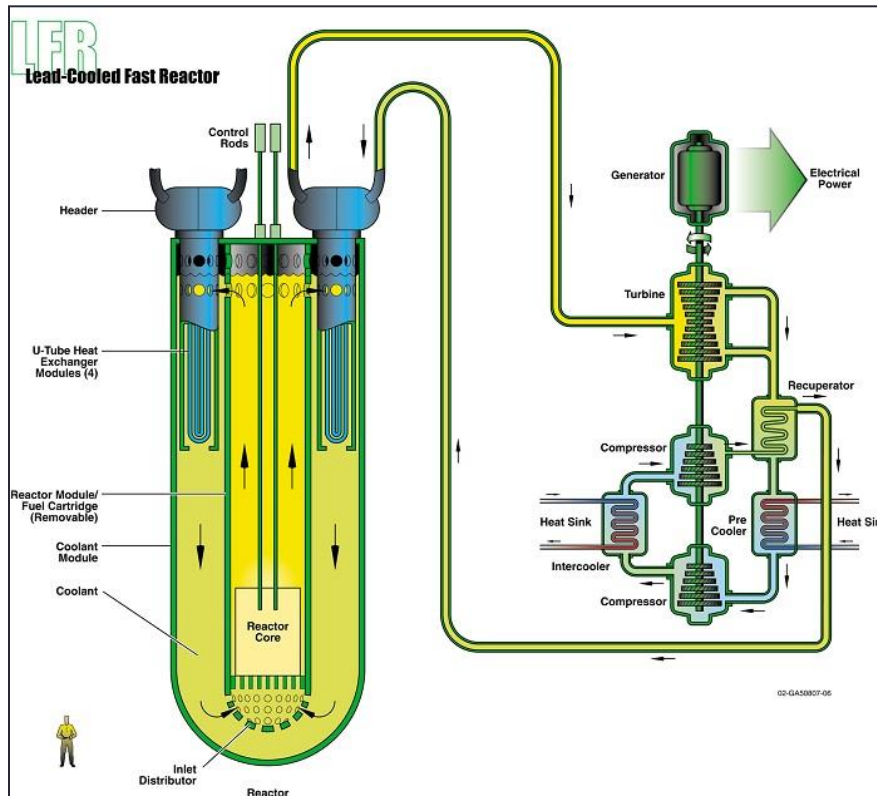
Brennstoffpellet

Brennelement

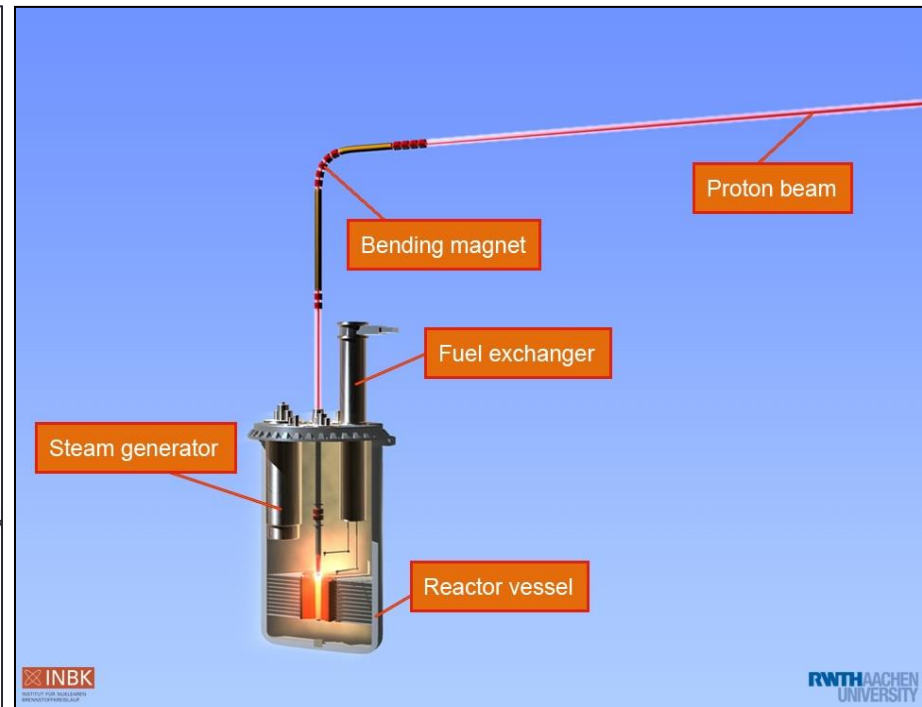


# WELCHE INFRASTRUKTUR IST ERFORDERLICH?

## 3. Transmutationsanlagen



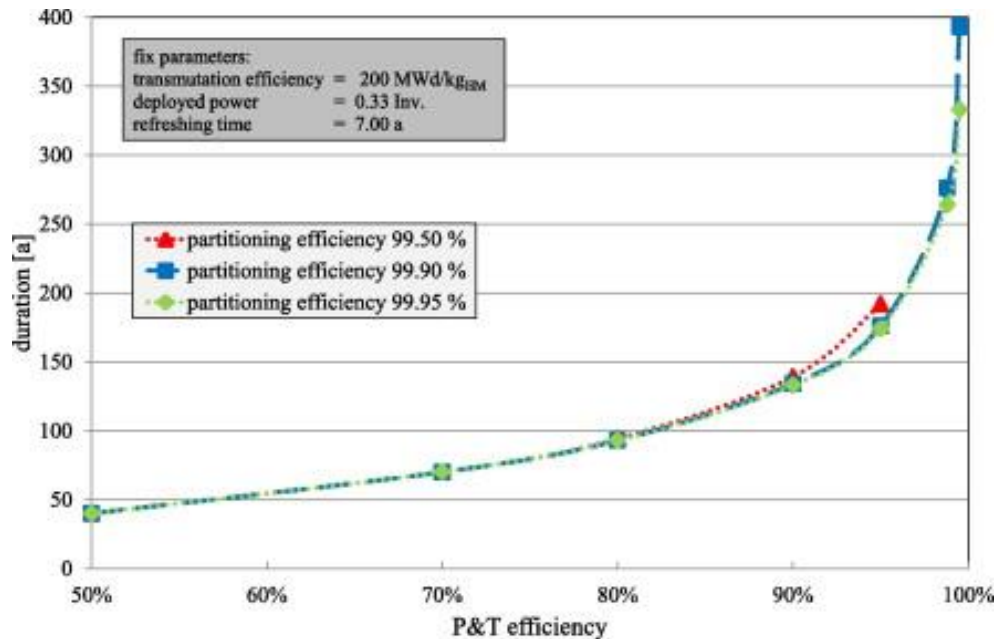
bleigekühlter schneller Reaktor



gasgekühlte beschleunigergetriebene Anlage

Quelle: Kettler, J.; Biß, K., Nabbi, R., Thomauske, B. et al.: **Konzept einer gasgekühlten beschleunigergetriebenen Transmutationsanlage – AGATE**, Aachen Nuclear Safety Reports. Band/Volume 1. ISBN 987-3-941277-11-3

# WIE LANGE DAUERT DER ABBAU DER LANGLEBIGEN NUKLIDE?

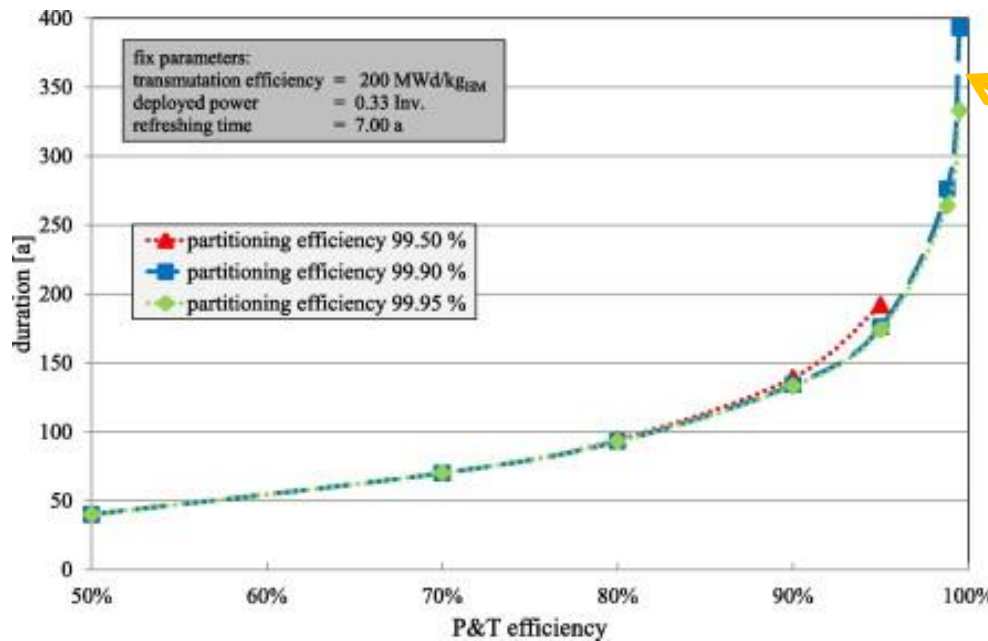


**Transmutationsrate: 42kg/TWh<sub>th</sub>**  
(physikalische Grenze)

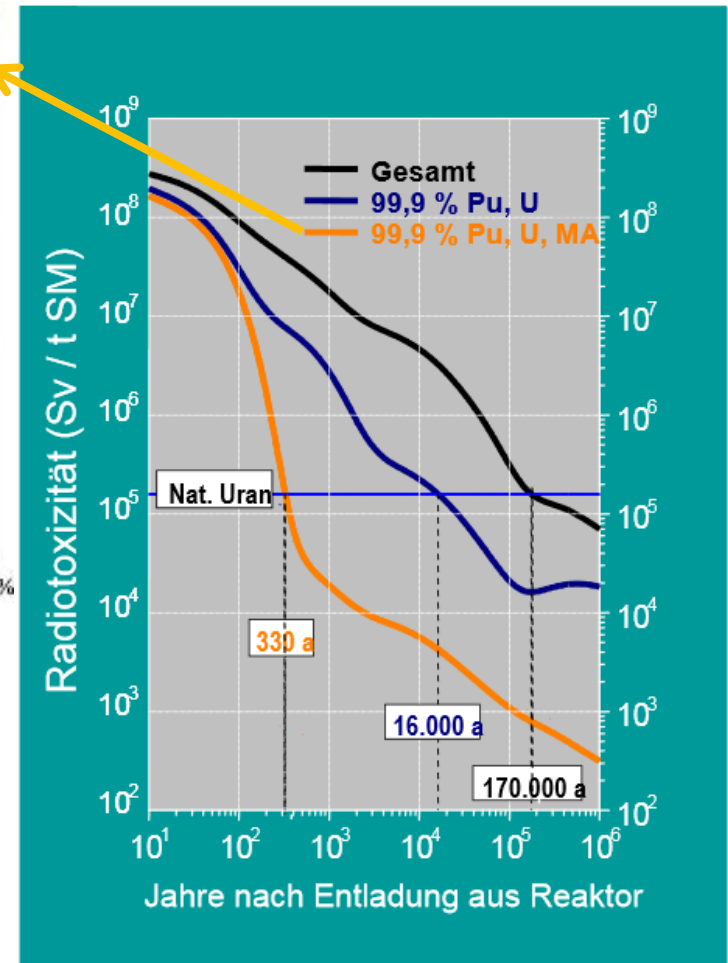
Generation IV reactor

Quelle: Shortening transmutation time by using the molten salt reactor, K. H. Biss, B. Thomauske, Annals of Nuclear Energy, Vol. 83, September 2015, Pages 25–33

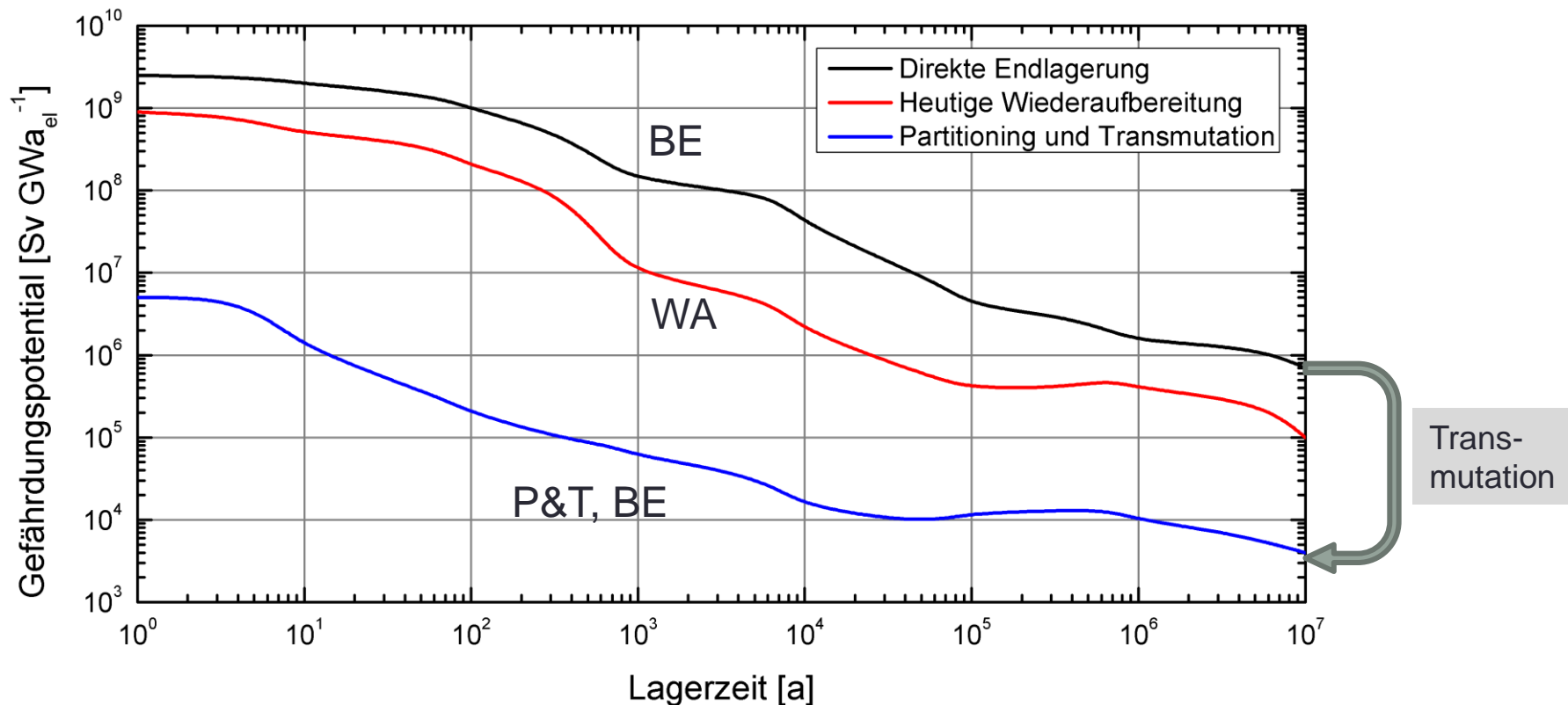
# WIE LANGE DAUERT DER ABBAU DER LANGLEBIGEN NUKLIDE?



Generation IV reactor



# DIREKTE ENDLAGERUNG - WIEDERAUFARBEITUNG



→ Bei Transmutation werden dann die Wiederaufbereitungsabfälle bestimmend für die Langzeitsicherheit



# ERGEBNIS

- Die Erwartungshaltung, in einem überschaubaren Zeitraum zu einer Reduzierung der Radiotoxizität um 3 Größenordnungen zu kommen (Reduzierungsfaktor 99,9%), ist nicht erreichbar. Bei großem Aufwand wird man etwa 70% erreichen können.
- Damit ist ebenfalls nicht erreichbar, den erforderliche Zeitraum des Abschlusses der Abfälle von der Biosphäre bei der Endlagerung von geologischen auf historische Zeiträume zu verkürzen.
- Dies bedeutet,
  - dass die Transmutation zwar einen Beitrag zur Reduzierung der langfristigen Aktivität liefern kann,
  - dass sie aber nicht die langlebigen Radionuklide soweit reduziert, dass die Abfälle nur über historische Zeiträume endgelagert werden müssten.
- Anders verhält es sich, wenn ein Land sowieso auf Brüter-Technologie setzt. Dann ist die Reduzierung der endzulagernden langlebigen Abfälle durchaus eine Option.
- Eine Option könnte ebenfalls sein, die Brennelemente zur weiteren Verwertung in diese Länder zu geben und nur den verbleibenden reduzierten Abfall zurück zu nehmen.
- Zu berücksichtigen ist, dass nur die abgebrannten Brennelemente der Transmutation zugeführt werden können. Die verbleibenden **Wiederaufarbeitungsabfälle (verglaste Abfälle)** sind endzulagern.
- Vereinfacht ergibt sich eine Reduzierung der langfristigen Aktivität/Toxizität um etwa 50%.



# ERFORDERLICHER ZEITRAHMEN

Experimentieranlage:	15 Jahre (MOX)
	15 Jahre (Pu, MA)
Demonstrationsanlage:	20 Jahre
Großtechnische Anlage:	20 Jahre
$\Sigma$	<b>70 Jahre</b>

# ZUSAMMENFASSUNG (1)

- **Das von einem Endlager ausgehende Gefährdungspotential wird bei Anwendung der Transmutation um etwa 70% reduziert.**
- **Eine Transmutation der verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung erscheint nicht sinnvoll machbar.**
- **Damit ist aber ein geologisches Endlager, das die Abfallstoffe für einen Zeitrahmen von 1 Mio. Jahre sicher einschließt, weiterhin erforderlich.**
- **International werden Anstrengungen unternommen, P&T zur Anwendungsreife zu bringen. Weit überwiegend wird dabei aber der Schwerpunkt auf Energiegewinnung und Erbrüten neuen Brennstoffs gelegt (Schneller Brüter).**

## ZUSAMMENFASSUNG (2)

- Auch bei einem Ausstieg aus der Kernenergienutzung ist gleichwohl die Reduzierung der langfristigen Radiotoxizität zu betrachten und auf ihre Wirksamkeit hin zu untersuchen.
- Die grundsätzliche Machbarkeit einer Transmutationsanlage kann bejaht werden. Der erforderliche Zeit- und Investitionsbedarf ist erheblich.
- Die Relevanz der Aktiniden im Rahmen der Langzeitsicherheit ist aufgrund des Sorptionsverhaltens gering.
- Konsequenz der Transmutation ist das Erfordernis zur Wiederaufarbeitung.
- Die Transmutation ist unter Berücksichtigung der gegenwärtigen rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland keine Option.
- In einem Land, das langfristig auf Kernenergie setzt, kann die Transmutation durchaus Sinn machen. Eine Systempartizipation könnte einen Ansatz darstellen.
- Es ist zweckmäßig, die technische Entwicklung weiter zu beobachten und sich auch bei Forschungsprojekten – insbesondere ADS – zu beteiligen.

# Kann Transmutation die Lösung sein?

**ICH FREUE MICH AUF IHRE FRAGEN  
UND AUF DIE DISKUSSION**

# TRANSMUTATIONSPROJEKTE

**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)**

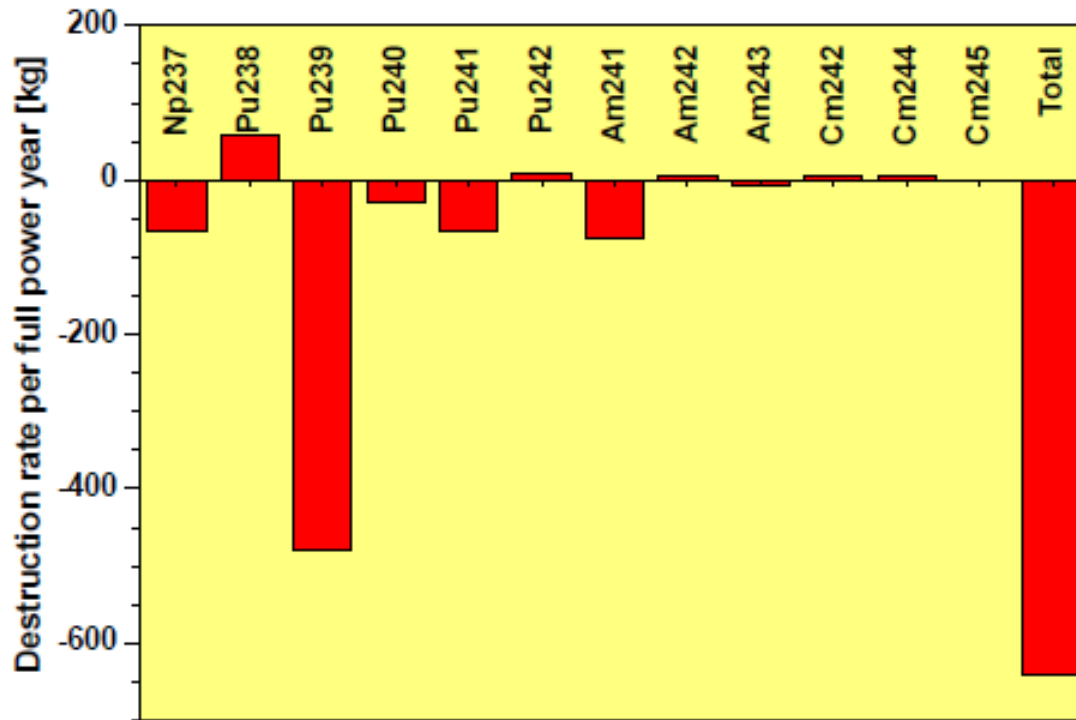
**Agate: Unterkritische gasgekühlte beschleunigergetriebene  
Transmutationsanlage (RWTH, FZJ, FIAS, Siemens)**

# ABBAURATE VON LANGLEBIGEN NUKLIDEN

$g/GW_{dth}$	MOX (U/Pu/O)	BS I (Np/Pu/Am/Cm/Mg/O) EFIT	BS II (Pu/Am/Cm/Mg/O) MYRRHA
U	-809	51	45
Np	6	16	52
Pu	-460	94	167
Am	262	-1255	-1190
Cm	1	94	-74

# TRANSMUTATION: AUF- /ABBAURATE

Consumption rate of TRUs per full power year of  
a 1800-MW(thermal) core



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