

Partitionierung und Transmutation (P&T)

Auswirkungen wesentlicher Systemparameter auf die
Effizienz von P&T-Szenarien

Christoph Pistner, Matthias Englert, Gerald Kirchner
DPG Frühjahrstagung 2016
Regensburg, 11.03.2016

Agenda

1 Einleitung

2 Gesamtkonzept

3 Standartszenario S

4 Variation von Parametern

5 Fazit

1

Einleitung

Ausgangslage: Deutsches Atomgesetz

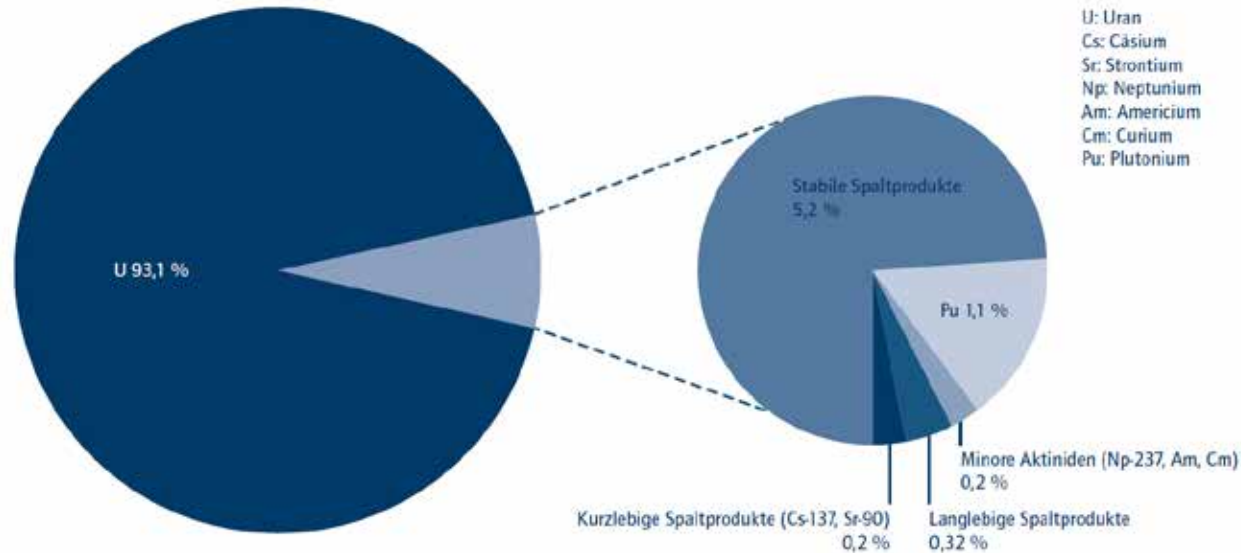
„Für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität und von Anlagen zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe werden keine Genehmigungen erteilt.“

Wärmeentwickelnde Abfälle in Deutschland bis 2022

Abfallart im Jahr 2022	Volumen
Abgebrannte Brennelemente für die direkte Endlagerung	21.000 m ³
Kokillen aus Wiederaufarbeitung	1.400 m ³ Entspr. 6.700 tSM
Brennstoff aus Versuchskernkraftwerken und Forschungsreaktoren	5.700 m ³
Gesamt	28.000 m ³

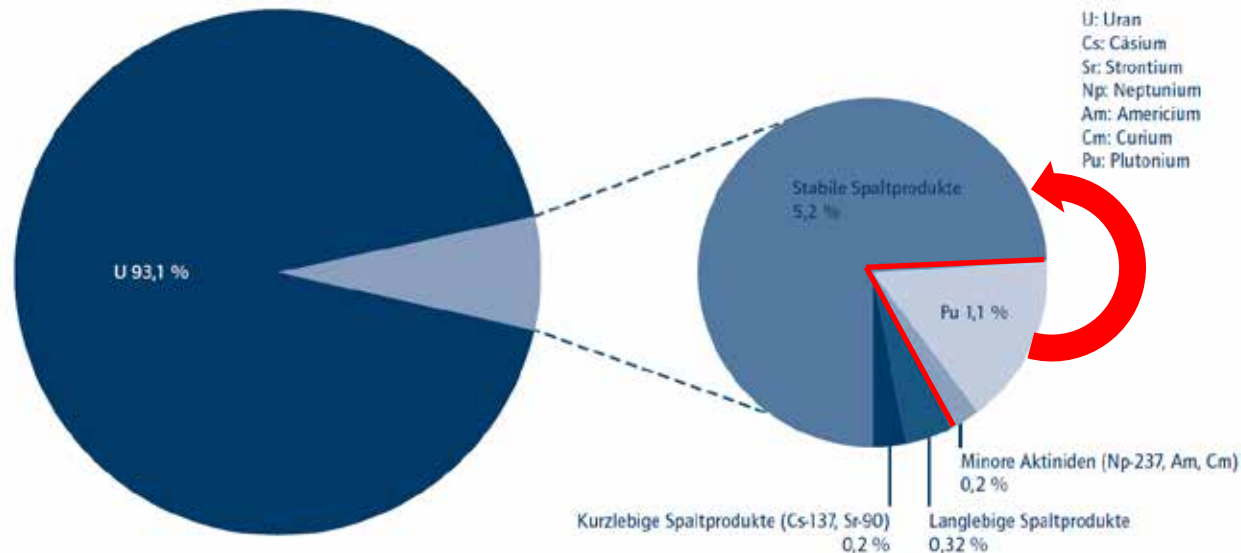


Was ist enthalten?



- Spalt- und Aktivierungsprodukte mit kürzeren Halbwertzeiten (~ 5 bis 30 Jahre Halbwertzeit), z.B. Cs-137, Sr-90, Co-60
- Spalt- und Aktivierungsprodukte mit langen Halbwertzeiten (bis 10^6 Jahre), z.B. I-129, Se-79, Tc-99, Cl-36
- Aktiniden (meist lange bis sehr lange Halbwertzeiten), z.B. Uran, Plutonium, Americium, Curium, Neptunium

Was wird bei P&T adressiert?



- In derzeitigen Leichtwasserreaktoren wird das Uran des frischen Brennstoffs gespalten.
- Heutige Wiederaufarbeitung: Uran (U) und Plutonium (Pu) extrahieren
- Uran-Plutonium Mischoxydbrennstoff (MOX) in Reaktoren einsetzen
- P&T: auch minore Aktinide (Np, Am und Cu) werden gespalten

Nukleare Nichtverbreitung

- Zugriff auf spaltbare Materialien
 - Zentral hochangereichertes Uran und Plutonium, jedoch auch andere Spaltmaterialien (Np, Am?, Cm??, Mischungen)
 - 8 kg Plutonium stellen eine SQ (significant quantity) dar
 - Überwachungsmaßnahmen der IAEO
 - Zugriffsbeschränkungen durch radiologische Barrieren (z.B. erhöhte Sicherungsmaßnahmen für abgetrennte Materialien)
- Technik und Know-How
 - Zugriff auf Personal
 - Anlagen zur Anreicherung oder Wiederaufarbeitung

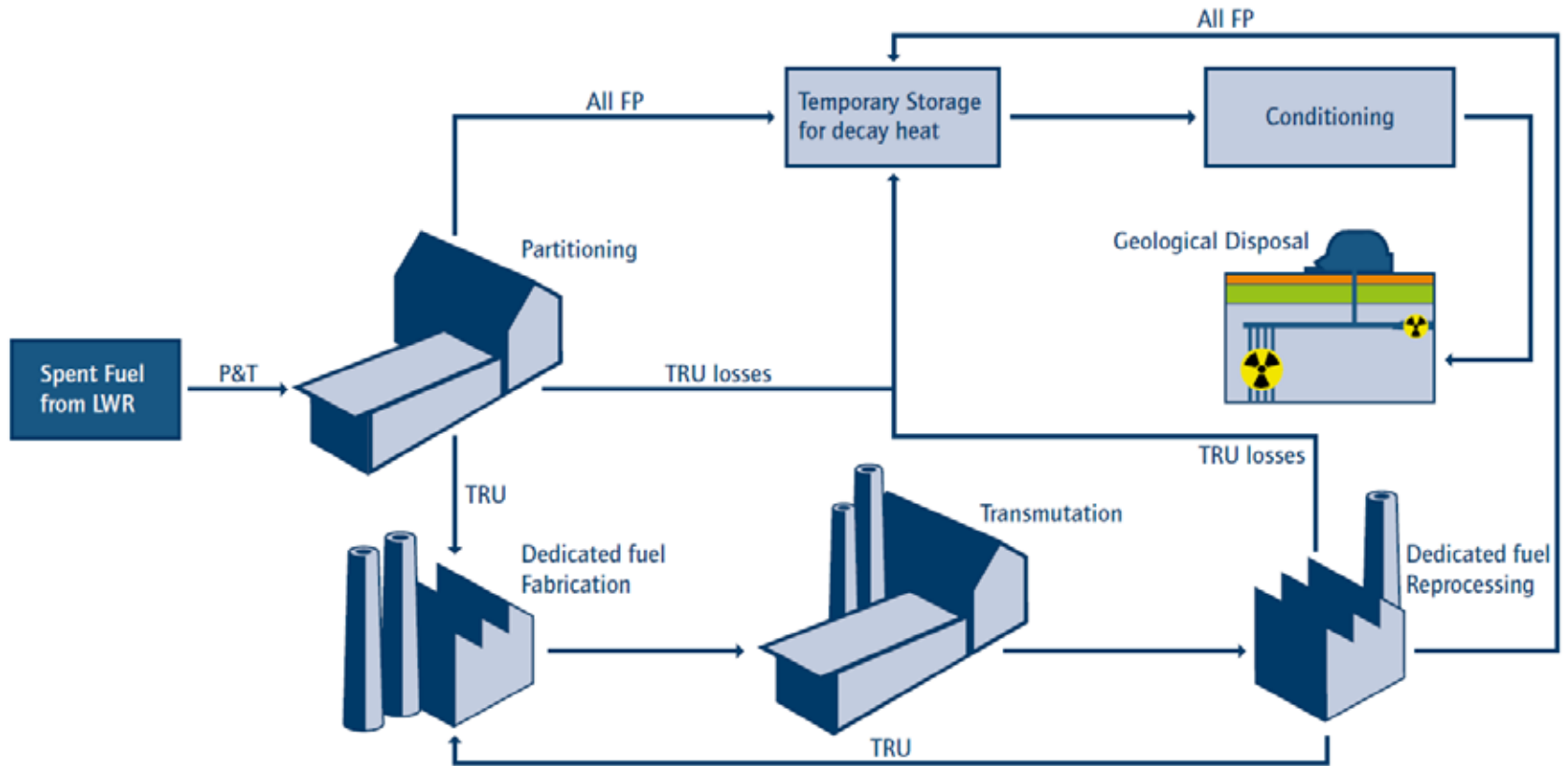
Nukleare Nichtverbreitung bei direkter Endlagerung

- Zugriff auf spaltbare Materialien
 - 140 t TRU verbleiben dauerhaft in abgebranntem Brennstoff
 - Nach ca. 50-100 Jahren werden TRU Bestände in Endlager verbracht
 - Nach ca. 300 Jahren nimmt Selbstschutz durch Strahlungsbarriere ab, d.h. potenziell vereinfachter Zugriff auf spaltbares Material im Endlager denkbar
 - Überwachung des Endlagers (Safeguards) notwendig
- Technik und Know-How
 - Nach Beendigung der Kernenergienutzung Notwendigkeit für kerntechnisches Personal (Forschung, Industrie, Medizin)
 - Keine Anlagen zur Anreicherung oder Wiederaufarbeitung

2

Gesamtkonzept

Transmutation – Das Gesamtsystem



Transmutation in Deutschland

Abgebrannte Brennelemente (Ende 2022):

- 10.500 t Schwermetall (SM), darin
- Ca. 140 t Plutonium und minore Aktinide (Transurane, TRU)
- Ca. 430 t Spaltprodukte

Transmutation in Deutschland

Transmutationsschritte



EFIT	
Anfangsinventar	Ca. 4.4 t Transurane
Nach einem Einsatz im Reaktor für 3 Jahre	10% Anfangsinventar Transurane verbrannt
Wiederaufarbeitung	Ca. 9-10 t Transurane
Reduktion Transurane nach 150 Jahren	Von 140 t auf ca. 5 t
Spaltproduktaufkommen	135 t zusätzlich

Transmutation in Deutschland

- 5-6 Reaktoren (400 MW thermische Leistung)
- 1 große Wiederaufarbeitungsanlage
- 1 Fabrik zu Brennstofffertigung
- 150 Jahre Betrieb
- Aus 140 t TRU werden ca. 5 t
- Aus 430 t Spaltprodukte werden ca. 565 t
- ca. 100.000 t zusätzliche schwach- und mittelradioaktive Stoffe fallen an

3

Standardszenario S

(Technische) Eingangs-Parameter

- Bestrahlungszeit (a)
- Zwischenlagerzeit (a)
- Verarbeitungszeit (a)
- Transmutationsanteil pro Zyklus (%)
- Konversionsfaktor
- Thermische Leistung eines Reaktors (MW) (bei 100% Verfügbarkeit)
- Zielreduktion (t TRU oder %Anfangsinventar)
- Abtrennfaktor (%)
- Reaktorlebensdauer (a)

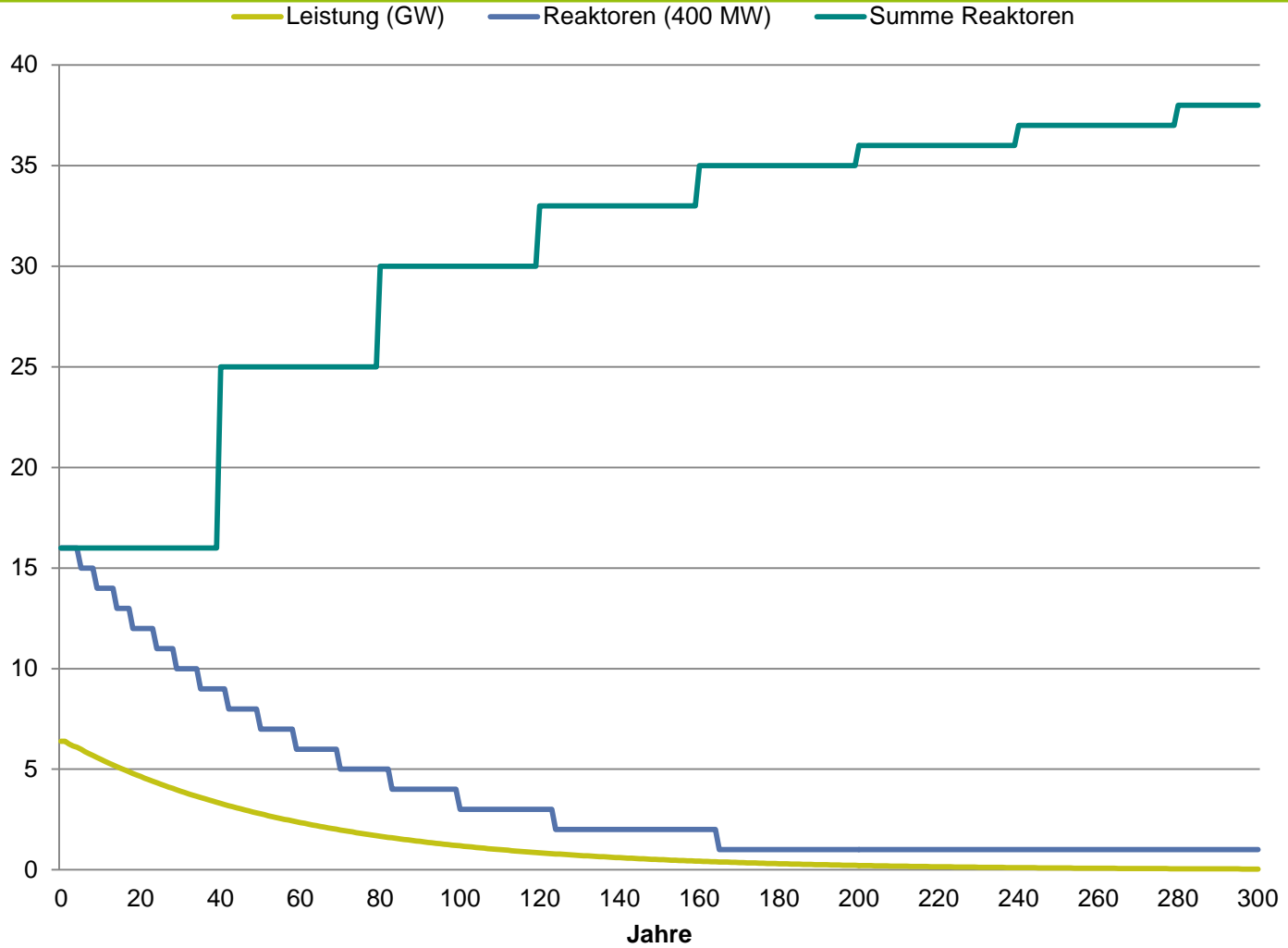
Resultierende Kenngrößen

- Zykluslänge (a)
- Reaktorinventar (% aktueller TRU-Bestand)
- Totale thermische Leistung P_{th} bei BOL (MW)
- Anzahl Reaktoren N bei BOL
- Umsetzungszeitraum (a)
- Summe Abtrennverluste (t TRU)
- Gesamtzahl Reaktoren
- Gesamte produzierte thermische Energie

Standardszenario S

- Anfangsinventar: 140 t TRU
 - Ca. 18 t TRU aus WWER und Forschungsreaktoren nicht berücksichtigt
- EFIT Reaktoren:
 - 400 MW thermischer Leistung
 - Konversionsfaktor 0 (uranfreie Brennstoffe)
 - Bestrahlungszeit 3 a
 - Zwischenlager- und Verarbeitungszeit 3 a
 - Transmutationsanteil pro Zyklus 10%
 - Reaktorlebensdauer 40 a
- Zielreduktion: 90% (14 t TRU verbleiben)
- Abtrennfaktor: 99,9%

Ergebnisse Standardszenario



Ergebnisse Standardszenario S

- Zykluslänge 6 a
- Reaktorinventar bei BOL 50% Anfangsinventar
- Totale thermische Leistung P_{th} bei BOL: 6,4 GW
- Anzahl Reaktoren bei BOL: $N = 16$
- Umsetzungszeitraum: 148 a
- Summe Abtrennverluste: 1,2 t TRU
- Gesamtzahl Reaktoren: 33
- Gesamte produzierte thermische Energie: 3.100 TWh

Nukleare Nichtverbreitung bei P&T

- Zugriff auf spaltbare Materialien
 - Für 150 Jahre werden ca. 20 – 2 t TRU pro Jahr abgetrennt und verarbeitet
 - Nach ca. 150-200 Jahren werden 14 t TRU in ein Endlager verbracht (plus ca. 18 t TRU aus WWER und Forschungsreaktoren)
 - Nach ca. 100-300 Jahren nimmt Selbstschutz durch Strahlungsbarriere ab, d.h. potenziell Zugriff auf spaltbares Material im Endlager denkbar
- Technik und Know-How
 - Für 150 Jahre Notwendigkeit für ausgebildetes kerntechnisches Personal (Reaktorbetrieb, Wiederaufarbeitung, Brennstofffertigung)
 - Für 150 Jahr mind. eine Anlage zur Wiederaufarbeitung und eine Anlage zur Brennstofffertigung

4

Variation von Parametern

Bedeutung der Zielreduktion

- Reduzierung der verbleibenden TRU-Menge
- Anstelle von 10% (14 t TRU) nur noch 5 t TRU in Endlager
- Umsetzungszeitraum steigt von 148 a auf 242 a
- Gesamtzahl Reaktoren N steigt von 33 auf 37

Bedeutung des Transmutationsanteils pro Zyklus

- Erhöhung des Transmutationsanteils pro Zyklus
- Anstelle von 10% Steigerung auf 15% oder 20%
- P_{th} bei BOL steigt von 6,4 GW auf 9,6 bzw. 12,8 GW
- Anzahl Reaktoren N bei BOL steigt von 16 auf 24 bzw. 32
- Gesamtzahl Reaktoren steigt von 33 auf 37 bzw. 41
- Umsetzungszeitraum sinkt von 148 a auf 97 a bzw. 72 a

Bedeutung der Zykluslänge

- Erhöhung der Bestrahlungszeit (bei gleichem Transmutationsanteil pro Zyklus) von 3 auf 5 Jahre:
 - Reaktorinventar steigt von 50% auf 63%
 - P_{th} bei BOL sinkt von 6,4 GW auf 4,8 GW (N 16 → 12)
 - Umsetzungszeitraum steigt von 148 a auf 199 a
- Erhöhung der Verarbeitungszeit von 3 auf 5 Jahre:
 - Reaktorinventar sinkt von 50% auf 37%
- Erhöhung der Zykluszeit von 6 auf 10 Jahre:
 - Reaktorinventar bleibt bei 50%
 - P_{th} bei BOL sinkt von 6,4 GW auf 3,8 GW (N 16 → 10)
 - Umsetzungszeitraum steigt von 148 a auf 249 a (bei 8 a Verarbeitungszeit sogar 325 a)

Bedeutung des Abtrennfaktors

- Reduzierung des Abtrennfaktors
- Anstelle von 99,9% nur 99,5% erreichbar
- Summe Abtrennverluste steigt von 1,2 t TRU auf 6,4 t TRU (bei Zielreduktion auf 14 t TRU)
- Anzahl Reaktoren N bei BOL steigt von 16 auf 24 bzw. 32
- Gesamtzahl Reaktoren steigt von 33 auf 34
- Umsetzungszeitraum steigt von 148 a auf 270 a

Bedeutung des Konversionsfaktors

- Wahl eines Konversionsfaktors > 0 (Nutzung von MOX in kritischen Schnellen Reaktoren)
- Konversionsfaktor = 0,7
- Reaktorleistung 1200 MW statt 400 MW
- Bestrahlungszeit und Verarbeitungszeit jeweils 5 a
- P_{th} bei BOL steigt von 6,4 GW auf 12,8 GW (N 16 \rightarrow 11)
- Gesamtzahl Reaktoren steigt von 33 auf 34
- Umsetzungszeitraum steigt von 148 a auf 249 a
- Gesamte produzierte thermische Energie steigt von 3.100 TWh auf 10.200 TWh

Vergleich der verschiedenen Einflussgrößen

Parameter \ Variation	S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Bestrahlungszeit (a)	3				5	3	5	5	5			
Zwischenlager- + Verarbeitungszeit (a)	3				3	5	5	8	5			
Zykluslänge (a)	6				8	8	10	13	10			
Reaktorinventar (% aktueller Bestand TRU)	50				63	37	50	38	50			
Transmutationsanteil pro Zyklus (%)	10		15	20								
Konversionsfaktor	0								0,7			
Thermische Leistung bei t=0 (GW)	6,4		9,6	12,8	4,8	4,8	3,8	3,0	12,8			
Reaktorleistung (MW)	400								1200			
Anzahl Reaktoren bei t=0	16		24	32	12	12	10	8	11			
Zielreduktion (t)	14	5										
Umsetzungszeitraum (a)	148	242	97	72	199	199	249	325	249	270		
Abtrennfaktor (%)	99,9									99,5		
Summe Abtrennverluste (t)	1,2	1,3	0,8	0,6						6,4		
Reaktorlebensdauer (a)	40										30	60
Gesamtzahl Reaktoren	33	37	37	41	30	30	30	30	34	34	39	25
Gesamte produzierte thermische Energie (TWh)	3.100	3.300							10.200	3.200		

5

Fazit

Starke Abhängigkeit der Systemkenngrößen von zentralen Parametern

- Erreichbare Zykluslänge und Transmutationsanteil pro Zyklus determinieren wesentlich die Umsetzungszeiträume
- Wahl eines uranfreien Brennstoffs führt zu kürzeren Umsetzungszeiträumen, jedoch auch geringerer Stromproduktion
- Um ineffiziente Reaktorausnutzung zu vermeiden sind reale Umsetzungszeiträume signifikant größer als theoretisch erreichbare
- Erreichbarer Abtrennfaktor bestimmt wesentlich die Zielerreichbarkeit (bei zu hohen Verlusten pro Transmutationszyklus sind relevante Restbestände im Endlager nicht vermeidbar)
- P&T für Deutschland führt zu relevanten Proliferationspotenzialen, auch im Vergleich mit direkter Endlagerung
- P&T für Deutschland würde sehr hohen Aufwand für sehr lange Zeiträume bei begrenzter Wirksamkeit bedeuten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Thank you for your attention!

Haben Sie noch Fragen?
Do you have any questions?

