



Ergebnisse des Verbundforschungsprojektes KONEKT (HZB/FZJ)

Konzeptstudie zur **E**ntsorgung von **a**ktiviertem Beryllium aus
Forschungsreaktoren

Vortragsgliederung

► **Eigenschaften von Beryllium**

Forschungsprojekt KONEKT

Kenntnisstand über Nuklearberyllium

Inventarisierung des bestrahlten Berylliums

Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

Kostenschätzung der Recycling-/Entsorgungswege

Offene Fragen/notwendige nächste Schritte

Eigenschaften von Beryllium

Chemisch

Technisch

Radiologisch

-
- **Beryllium ist das viertleichteste chemische Element**
 - **Es ist das 48. häufigste Element in der Erdkruste**
 - **Metallisches Beryllium ist in Wasser unlöslich**
 - **Lösliches Beryllium ist giftig**
 - **Der Schmelzpunkt von Beryllium liegt bei 1287 °C**
 - **Metallisches Beryllium ist nicht brennbar**

Eigenschaften von Beryllium

Chemisch

Technisch

Radiologisch

-
- **Beryllium wird überwiegend in Legierungen verwendet**
 - **Rohstoff für viele Elektronikkomponenten**
 - **Reines Beryllium wird als Röntgenfenster und als Spiegelmaterial für Weltraumteleskope verwendet**
 - **Moderator in kerntechnischen Anwendungen**

Eigenschaften von Beryllium

Chemisch

Technisch

Radiologisch

- **Beryllium wird als Neutronenreflektor verwendet**
 - Dadurch weniger Kernbrennstoff bei gleicher Neutronenausbeute notwendig
- **Durch Neutronen werden Beryllium und Verunreinigungen aktiviert**
- **Bestrahltes Beryllium hat einen hohen Radionuklidgehalt ($\sim 10^9$ Bq/g)**
- **Entsorgungsweg für Nuklearberyllium ist unklar**
- **Endlagerung im Endlager Konrad nicht garantiert**
- **Strategischer Rohstoff – lohnt eine Aufbereitung?**

Forschungsprojekt KONEKT

Vortragsgliederung

Eigenschaften von Beryllium

▶ **Forschungsprojekt KONEKT**

Kenntnisstand über Nuklearberyllium

Inventarisierung des bestrahlten Berylliums

Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

Kostenschätzung der Recycling-/Entsorgungswege

Offene Fragen/notwendige nächste Schritte

Das Forschungsprojekt KONEKT

Allgemein

Arbeitspakete

Was ist KONEKT?

- „Konzeptstudie zur Entsorgung von aktiviertem Beryllium aus Forschungsreaktoren“
- 7 Arbeitspakete wurden definiert
- GRS ist Projektträger im Auftrag des BMBF
- Förderkennziffer: 15S9405B

Das Forschungsprojekt KONEKT

Allgemein

Arbeitspakete

Die Arbeitspakete von KONEKT

- **AP1: Inventarisierung in Deutschland und wenn möglich Europa (HZB)**
- **AP2: Kenntnisstand bestrahltes Beryllium (FZJ & HZB)**
- **AP3: Endlagerung von Beryllium (HZB)**
- **AP4: Verwertung von bestrahltem Beryllium (FZJ/BS)**
- **AP5: Vergleich der Verwertungsoptionen (FZJ/BS) inkl. Kostenschätzung (HZB)**
- **AP6: Konditionierung von Beryllium (FZJ)**
- **AP7: Weiterer Forschungsbedarf (FZJ & HZB)**

Das Forschungsprojekt KONEKT

Allgemein

Arbeitspakete

Die Arbeitspakete von KONEKT

- **AP1: Inventarisierung in Deutschland und wenn möglich Europa (HZB)**
- **AP2: Kenntnisstand bestrahltes Beryllium (FZJ & HZB)**
- **AP3: Endlagerung von Beryllium (HZB)**
- **AP4: Verwertung von bestrahltem Beryllium (FZJ/BS)**
- **AP5: Vergleich der Verwertungsoptionen (FZJ/BS) inkl. Kostenschätzung (HZB)**
- **AP6: Konditionierung von Beryllium (FZJ)**
- **AP7: Weiterer Forschungsbedarf (FZJ & HZB)**

Vortragsgliederung

Eigenschaften von Beryllium

Forschungsprojekt KONEKT

▶ **Kenntnisstand über Nuklearberyllium**

Inventarisierung des bestrahlten Berylliums

Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

Kostenschätzung der Recycling-/Entsorgungswege

Offene Fragen/notwendige nächste Schritte

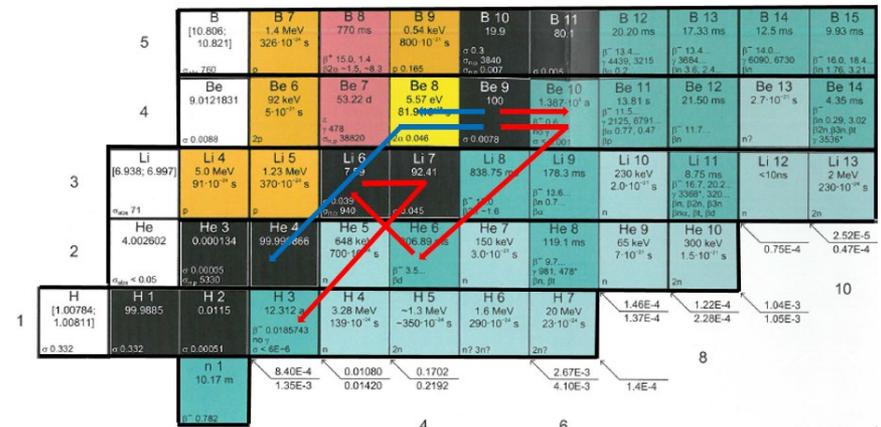
Kenntnisstand über Nuklearberyllium

Entstehung von Tritium

Tritium in Beryllium

weitere Radionuklide

- Größtes Problem in Be: Tritium (H-3)
- Entsteht aus Be-9 durch 2 n- α -Reaktionen
- H-3 zerfällt zu He-3 mit HWZ von 13 a
- He-3 reagiert mit Neutronen wieder zu H-3
- Unter Neutronenstrahlung stellt sich ein Gleichgewicht zwischen H-3 und He-3 ein



Kenntnisstand über Nuklearberyllium

Entstehung von Tritium

Tritium in Beryllium

weitere Radionuklide

- Hauptbestandteil/-verunreinigung im Be: Sauerstoff als BeO
- Tritium physikalisch und chemisch im Metallgitter gebunden

Chemisch	Physikalisch
<ul style="list-style-type: none"> • Tritium als Be(OT)₂ im Berylliumgitter gebunden $2 \text{ BeO} + 2 \text{ T} \rightarrow \text{Be(OT)}_2 + \text{Be}$ <ul style="list-style-type: none"> • Ab Temperaturen > 600°C wird Tritium in kleinen Mengen freigesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> • „Auffangen“ von Tritium in Heliumblasen im Metallgitter • Freisetzung bei > 800 °C

→ Die Freisetzungskinetik von Tritium wird physisch durch Heliumblasen und chemisch durch Berylliumoxid Verunreinigungen bestimmt

Kenntnisstand über Nuklearberyllium

Entstehung von Tritium

Tritium in Beryllium

weitere Radionuklide

- Neben Tritium gibt es weitere Radionuklide in Beryllium

Nuklid	Entstehung aus		Aktivität
Be-10	Be-9 + n	Aktivierung von Be	7,62 E+04 Bq/g
Co-60	Co-59 + n	Leicht messbares Aktivierungsprodukt	6,25E+06 Bq/g
Cs-137	U-235+n	Leicht messbares Spaltprodukt	2,00 E+05 Bq/g
C-14	C-13+n; N-14 (n, p); O-17 (n, α)	Aktivierungsprodukt	1,97 E+06 Bq/g
Pu-238	U-238+n	Aktivierung von Uran	1,39 E+04 Bq/g
Tl-204	Tl-203+n	Aktivierung von auf Grund des Herstellungsprozesses vorhandener Tl-Verunreinigungen	1,83 E+05 Bq/g

Aufgeführt sind beispielhafte Nuklide, die typisch für bestimmte Eigenschaften sind

Vortragsgliederung

Eigenschaften von Beryllium

Forschungsprojekt KONEKT

Kenntnisstand über Nuklearberyllium

▶ **Inventarisierung des bestrahlten Berylliums**

Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

Kostenschätzung der Recycling-/Entsorgungswege

Offene Fragen/notwendige nächste Schritte

Inventarisierung des bestrahlten Berylliums

Inventarisierung

Nuklidinventar

-
- **90 Forschungsreaktoren mit Beryllium-Reflektoren weltweit**
 - **Detaillierte Erfassung des Berylliums**
 - 3 000 kg bestrahltes Beryllium in Deutschland (davon 680 kg bei HEREON)
 - Geschätzte 45 000 kg an Nuklearberyllium weltweit
 - **Verunreinigungen im Beryllium wurden ermittelt z. B. 53 ppm Uran**
 - **Radionuklidinventar von deutschen Forschungsreaktoren wurde ermittelt**
-

Inventarisierung des bestrahlten Berylliums

Inventarisierung

Nuklidinventar

- Radionuklidinventare 10 Jahre nach Abschaltung der Reaktoren

	BER-II (Werte für 2029)	FRM-I (Werte für 2010)	FRG (Werte für 2020)	RFR (Werte für 2001)
Nuklid	Spezifische Aktivität (Bq/g)			
H-3	1,17E+09	1,82E+09	1,50E+09	2,28E+08
Co-60	6,25E+06	6,20E+06	2,81E+06	1,09E+06
Cs-137	2,00E+05	2,69E+05	1,50E+05	8,42E+03
C-14	1,97E+06	1,81E+06	2,10E+06	2,12E+03
Be-10	7,62E+04	3,61E+04	6,32E+04	2,85E+04
Pu-238	1,39E+04	2,90E+04	9,27E+03	7,11E+01

Vortragsgliederung

Eigenschaften von Beryllium

Forschungsprojekt KONEKT

Kenntnisstand über Nuklearberyllium

Inventarisierung des bestrahlten Berylliums

▶ **Zwischen- und Endlagerung von Beryllium**

Kostenschätzung der Recycling-/Entsorgungswege

Offene Fragen/notwendige nächste Schritte

AP 3: Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

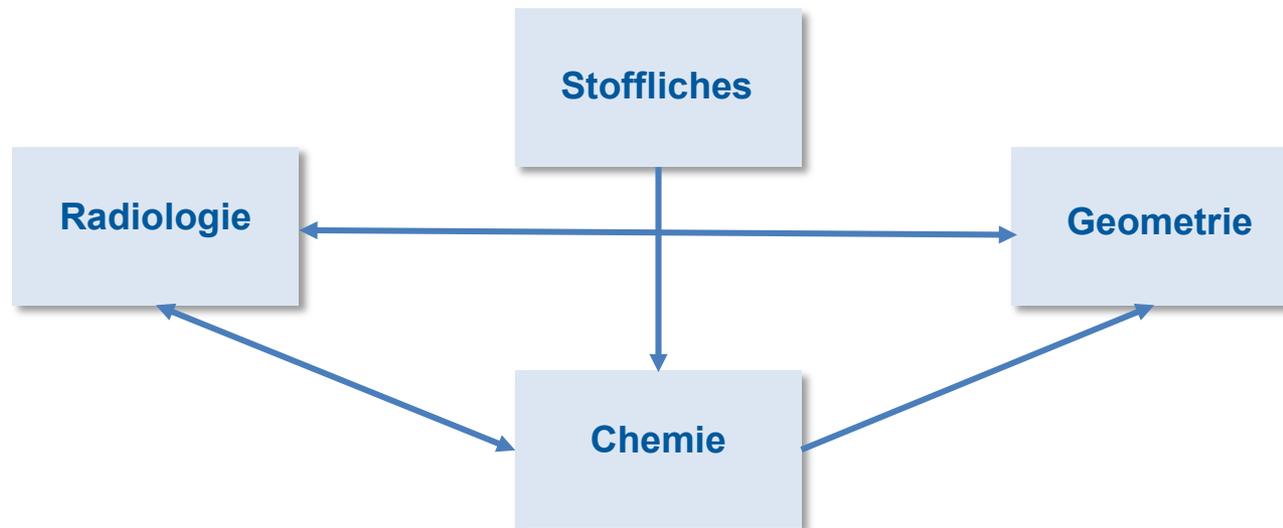
Stoffliches

Radiologie

Chemie

Geometrie

Fragestellungen zur Endlagerung:



Wenn die Bedingungen zur Endlagerung eingehalten sind, ist auch die Zwischenlagerfähigkeit des Berylliums sichergestellt.

AP 3: Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

Stoffliches

Radiologie

Chemie

Geometrie

- Wassergefährdendes Beryllium ist durch den PFB Konrad auf 24,5 kg begrenzt
- Bei metallischem Beryllium bzw. BeO ist die Situation anders
 - Freigegebener Stofflisteneintrag für Be (elementar) und BeO
 - Metallisch in massiver Form (rein oder in Legierungen)
 - Deklarationsschwellenwert 101 %, d.h. keine Massenbegrenzung
- Der Eintrag wurde durch das BfS beantragt und durch den NLWKN freigegeben

Beryllium aktuell stofflich endlagerbar

AP 3: Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

Stoffliches

Radiologie

Chemie

Geometrie

- Hohes Aktivitätsinventar ist problematisch
- Verpackung als ABK II sf ist notwendig
- H-3 überschreitet Garantiewerte
- Prüfung einer möglichen Überschreitung von Wärmesummenwerten
- Beim KC IV zulässiges Gesamtgewicht von 20 Mg nicht eingehalten
 - Option: Zusätzlich werden aktivierte Polyethylen-Platten in den KC eingelegt, um das Vergussbetonvolumen zu verringern
- Abklingzeit von ca. 15-20 Jahren bis zur Endlagerung notwendig

Abklingzeit und Ausgleichsbinde notwendig

AP 3: Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

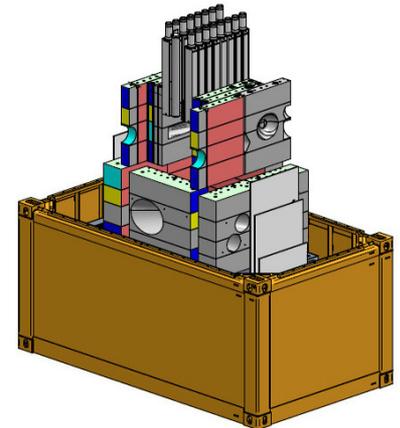
Stoffliches

Radiologie

Chemie

Geometrie

- **Beryllium und Beton sind als Werkstoffe unverträglich (H_2 -Bildung)**
- **Daher direkter Betonverguss nicht möglich**
- **Störfallfeste Verpackung von KC erfordert Betonverguss**
 - **Alternatives Vergussmaterial muss qualifiziert werden**
 - **Oder ein Trennung von Be und Beton notwendig**
- **MOSAIK[®]-Behälter erfordern vsl. keinen Verguss der Abfälle**
 - **Inventarbericht der MOSAIK[®]-Behälter deckt das Tritium nicht ab und müsste erweitert werden**



Probleme lösbar mit viel Geld und Arbeit

AP 3: Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

Stoffliches

Radiologie

Chemie

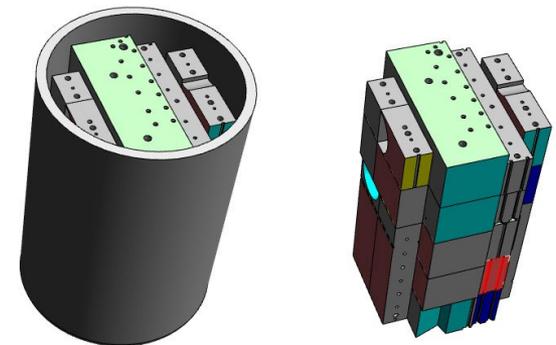
Geometrie

Beladeplanung für KC IV, KC II, MOSAIK[®]-Behälter am Beispiel des Berylliums des BER II wurde durchgeführt

- Für alle Beryllium-Teile des BER II existieren 3 D-Zeichnungen
- Virtuell wurden Behälter beladen
- 1 KC oder 6 MOSAIK[®] notwendig

Prüfung der Einhaltung der ODL-Begrenzungen

- Berechnungen der zu erwartenden ODL
- Berücksichtigung einer Abklingzeit notwendig



4 MOSAIK oder 1 KC II bei HEREON

Vortragsgliederung

Eigenschaften von Beryllium

Forschungsprojekt KONEKT

Inventarisierung des bestrahlten Berylliums

Kenntnisstand über Nuklearberyllium

Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

► Kostenschätzung der Recycling-/Entsorgungswege

Offene Fragen/notwendige nächste Schritte

AP 5: Kostenschätzung

H-3 Dekontamination Be-10 Konrad Anderes Endlager

Die Abschätzung der Kosten erfolgte auf Grundlage von

- Erfahrungswerte von anderen (Pilot-)Konditionierungseinrichtungen
- Analogieschlüsse
- Persönliche Mitteilung eines Mitarbeiters eines Chemieanlagenherstellers
- Erfahrungen bezüglich der Qualifikation von Abfallbinden für das Endlager Konrad

Die geschätzten Kosten haben eine hohe Unsicherheit

Es wurde das gesamte in Deutschland vorhandene Nuklearberyllium betrachtet

AP 5: Kostenschätzung

H-3 ausheizen Dekontamination Be-10 Konrad Anderes Endlager

Ausheizen von Tritium in einer dafür zu errichtenden Anlage

- Planung und Genehmigung 8 000 k€
- Errichtung der Ausheisanlage 4 000 k€
- Betrieb der Anlage für 15 Jahre 5 000 k€
- Entsorgung von Sekundärabfällen inkl. ausgeheiztes H-3 600 k€
- Ablaufplan und Produktkontrolle 1 250 k€

Die Kosten für die Entsorgung des Be im Endlager Konrad kommen zu diesen Kosten noch hinzu und sind in der Summe nicht enthalten.

18,9 Millionen €

AP 5: Kostenschätzung

H-3 ausheizen

Dekontamination

Be-10

Konrad

Anderes Endlager

Dekontamination aktivierter Verunreinigungen auf chemischem Weg

- | | |
|--|-----------|
| • Planung und Genehmigung | 40 000 k€ |
| • Errichtung der Chemieanlage | 20 000 k€ |
| • Betrieb der Anlage | 24 000 k€ |
| • Entsorgung von Sekundärabfällen | 5 400 k€ |
| • Freimessung, Ablaufplan und Produktkontrolle | 1 000 k€ |

90,4 Millionen €

AP 5: Kostenschätzung

H-3 ausheizen

Dekontamination

Be-10

Konrad

Anderes Endlager

Abtrennung von Be-10 zur Freimessung mit Methoden der Isotopentrennung

Pauschale Annahme: Doppelte Kosten wie für chemische Dekontamination

- Planung und Genehmigung 80 000 k€
- Errichtung der Anlage 40 000 k€
- Betrieb der Anlage 48 000 k€
- Entsorgung von Sekundärabfällen 10 000 k€
- Ablaufplan und Produktkontrolle 2 000 k€

180 Millionen €

AP 5: Kostenschätzung

H-3 ausheizen Dekontamination Be-10 **Konrad** Anderes Endlager

Direkte Endlagerung im Endlager Konrad gemäß AP 3 oder nach Ausheizen

- Endlagerbehälter 910 k€
- Beprobungen und Analysen 3 600 k€
- ABK II 250 k€
- Produktkontrolle und Dokumentation 1 600 k€
- Zwischenlagerkosten 2 150 k€
- Transportkosten 100 k€
- Endlagergebühren 400 k€
- Gutachterkosten 2 000 k€

11,0 Millionen €

AP 5: Kostenschätzung

H-3 ausheizen

Dekontamination

Be-10

Konrad

Anderes Endlager

Sollten weder Freimessung noch Endlager Konrad möglich sein, so ist das Beryllium für ein anderes Endlager vorzusehen

- Die Inbetriebnahme eines anderen Endlagers ist nach 2100 zu erwarten
- Bis dahin müsste das Beryllium zwischengelagert werden
- Beispielhaft: Kosten für abgebrannte Brennelemente 1 420 €/kg
- Endlagerkosten für 3 Mg Be als HAW 4 300 k€
- (Verlängerte) Zwischenlagerung 12 000 – 50 000 k€
- Konditionierung, Behälter und sonstiges 10 200 k€

27,4 Millionen €

AP 5: Kostenschätzung

H-3 ausheizen	Dekontamination	Be-10	Konrad	Anderes Endlager
18,9	90,4	180	11,0	27,4

Ergebnisse der Kostenschätzung, Angaben in Millionen Euro.

- **Tritium ausheizen erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Endlagerung in Konrad**
- **Zu diesen Kosten kommen die 11,0 Millionen Endlagerkosten Konrad noch hinzu.**
- **Für H-3-freies Beryllium Konditionierungs- und Endlagerkosten von ca. 30 M Euro**
- **Ähnliche Größe wie bei einer Entsorgung als HAW, jedoch günstigerer Zeitrahmen**
- **Dekontamination zur Freimessung oder Nachnutzung in Fusionsreaktoren wirtschaftlich nicht sinnvoll**

Detaillierte Untersuchung zum Ausheizen von Tritium sinnvoll, alternativ direkte
Endlagerung

Vortragsgliederung

Eigenschaften von Beryllium

Forschungsprojekt KONEKT

Inventarisierung des bestrahlten Berylliums

Kenntnisstand über Nuklearberyllium

Zwischen- und Endlagerung von Beryllium

Kostenschätzung der Recycling-/Entsorgungswege

▶ Offene Fragen/notwendige nächste Schritte

AP 7: Offene Fragen und Ausblick

Offene Fragen

Nächste Schritte

Nachfolgeprojekt

-
- **Wie wahrscheinlich ist eine Endlagerung in Konrad im Hinblick auf das Tritium?**
 - **Ist ein Ausheizen von H-3 im Vergleich zu „anderes Endlager“ wirtschaftlich?**
 - **Wie und wo könnte das Ausheizen von H-3 praktisch stattfinden?**
 - **Kann das Verpackungskonzept so umgesetzt werden?**
 - **Wie kann man die verbleibenden Knackpunkte zur Endlagerung beseitigen?**
 - **Wie kann man einen Verguss mit Beton verhindern bzw. wie kann man die Behälter so beladen, dass die Werkstoffe verträglich sind?**

AP 7: Offene Fragen und Ausblick

Offene Fragen

Nächste Schritte

Nachfolgeprojekt

-
- **Abschlussbericht/Ergebnisbericht**
 - **Der Abschlussbericht liegt vor**
 - **Vorstellung der Ergebnisse bei der Research Reactor Conference im Juni 2022**
 - **Präsentation der Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit**
 - **Vsl. Termin im Juni 2022**
 - **Teilnehmende Institutionen: HZB, HEREON, TUM, VKTA, evtl. KTE**
 - **Abprache über das weitere Vorgehen zu einer gemeinsamen Entsorgung des Berylliums**

AP 7: Offene Fragen und Ausblick

Offene Fragen

Nächste Schritte

Nachfolgeprojekt

HZB möchte gerne ein weiterführendes Nachfolgeprojekt durchführen

- **Ein Nachfolgeprojekt soll gemeinsam mit HEREON, HZB, VKTA und TUM erfolgen**
- **Idealerweise würde ein Folgeprojekt die notwendigen Planungsschritte zur Verpackung des Beryllium für das Endlager beinhalten**
- **Beantragung eines Ablaufplans für die Entsorgung von Beryllium und Berylliumoxid**
- **Klärung der verbleibenden offenen Fragen**



**HELMHOLTZ
ZENTRUM BERLIN**
für Materialien und Energie

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit.**