

## Erfahrungen aus der Demontage und Entsorgung von Zyklotronen

Kurzlebige radioaktive Stoffe spielen eine große Rolle in der Radiochemie und Radiopharmazie. Ihre Erzeugung erfolgt unter anderem mithilfe von Zyklotronen, bei deren Betrieb als Nebeneffekt Teile des Zyklotrons radioaktiv aktiviert und/oder mit radioaktiven Stoffen kontaminiert werden. Dies stellt nach langjährigem Betrieb eine besondere Herausforderung für den Rückbau und die Entsorgung eines Zyklotrons dar.

Im vorliegenden Beitrag werden am Beispiel von 2 Zyklotronen aus NRW die zentralen Schritte des Rückbau- und Entsorgungsprozesses erläutert. Der vorliegende Beitrag stellt damit nicht die Erzeugung radioaktiver Stoffe, sondern den weniger beachteten Aspekt des Rückbaus in den Fokus.

Die Beispiele zeigen, dass die Entsorgung eines Zyklotrons nach Beendigung seiner Betriebsphase möglich ist und die Raumbereiche ohne Einschränkung nach Abschluss der Entsorgung weiter genutzt werden können.

### Festlegung der Randbedingungen für die Entsorgung, insbesondere die Ermittlung der radiologischen Situation

Bei der Festlegung der Randbedingungen für die Entsorgung von Zyklotronen ist vor Beginn der praktischen Arbeiten eine Aufnahme der radiologischen und baulichen Situation nötig. Die bauliche Situation ist nicht zu vernachlässigen, da es sich zu meist um beengte Raumverhältnisse

handelt, die nicht für einen Rückbau vorgesehen waren. Eine Regiefläche ist nicht gegeben. Der Fokus liegt auf dem Betrieb und auf der Einhaltung der Grenzwerte der StrlSchV und des StrlSchG. Um die Randbedingungen der Entsorgung in Einklang mit dem Rückbau zu bringen, sind verschiedene Fragen zu stellen:

Welche Teile sind

- aktiviert?
- kontaminiert?
- freigabefähig, d. h. können aus der behördlichen Überwachung entlassen werden?

Bei den Zyklotronen wurde als Erstes eine radiologische Vorabcharakterisierung durchgeführt. Für die Vorabcharakterisierung wurden die genehmigten Nuklide (Umgang mit Nukliden inkl. Zerfallsnuklide) als Basis genommen, ein weiterer Punkt ist die Betriebs-historie (Ereignisse, Austausch von Komponenten, Reparaturen). Anhand der vorliegenden Informationen wurde anschließend ein Messkataster erstellt.

Nach der Aufnahme der radiologischen Daten wurde ein Demontage- und Entsorgungskonzept inkl. der zu treffenden Strahlenschutzmaßnahmen (u. a. Inkorporationsabschätzung) erstellt. Die hierbei zu berücksichtigenden Herausforderungen sind die Handhabung der Komponenten mit hoher Dosisleistung, die Einhaltung des operativen Strahlenschutzes und die Freigabe von Komponenten in einem beengten Raumbereich.

**Strahlenschutzmaßnahmen!**

**Bauliche Situation wichtig**



Abb. 1: Zyklotron 1 – Projektbeginn





Abb. 2: Zyklotron 2 – Projektbeginn

### Festlegungen im Demontagekonzept

Das Demontagekonzept beschreibt im Detail die einzelnen Arbeitsschritte für die Zerlegung des Zyklotrons. Dabei werden Aspekte der Logistik und die Maßnahmen des Strahlenschutzes wie auch die nachfolgenden Freigabemessungen dargestellt. Die Arbeiten werden dabei wie folgt unterteilt:

#### 1) Arbeiten, bei denen eine Mobilisierung von Kontamination plausibel ist:

Solche Arbeiten ergeben sich u. a. bei

- Trennverfahren in Bereichen mit Dosisleistung,
- Demontagen und Trennverfahren an ölführenden Leitungen und Pumpen sowie
- Dekontaminationsmaßnahmen, bei denen Verfahren mit hoher Staub- oder Aerosolentwicklung (z. B. Stemmen, Schleifen) zum Einsatz kommen, auch in Bereichen ohne Dosisleistung.

Maßnahmen, die entsprechend zu treffen sind, beinhalten

- das Abtrennen der Bereiche mit Zelten mit gerichteter Luftströmung,
- das Tragen von Schutzkleidung (u. a. P3-Filter-Maske),
- die Kontaminationskontrolle beim Verlassen der Zelte,
- bei Beendigung oder längeren Unterbrechungen der Arbeiten die Kontrolle durch Messungen mit Kontaminationsmonitor (Vermeidung von Kontaminationsverschleppung).

#### 2) Arbeiten, bei denen Mobilisierung von Kontamination nicht zu erwarten, aber auch nicht sicher auszuschließen ist:

Solche Arbeiten ergeben sich u. a. bei

- dem Aufbau von lüftungstechnischen Trennungen,
- der Entnahme von Materialproben in Bereichen ohne Dosisleistung,
- dem Trennverfahren mit geringem Mobilisierungspotenzial in Bereichen ohne Dosisleistung (z. B. Sägen) sowie

- bei der Demontage und Verpackung von mobilen oder zerstörungsfrei demontierbaren Bauteilen des Zyklotrons außer ölführenden Leitungen und Pumpen.

Maßnahmen, die entsprechend zu treffen sind, beinhalten

- das Tragen von Schutzkleidung (u. a. P3-Filter-Maske),
- die Kontaminationskontrolle bei Verlassen der Zelte,
- bei Beendigung oder längeren Unterbrechungen der Arbeiten die Kontrolle durch Messungen mit Kontaminationsmonitor (Vermeidung von Kontaminationsverschleppung).

#### 3) Arbeiten, bei denen keine Mobilisierung von Kontamination zu erwarten ist:

Solche Arbeiten ergeben sich u. a. bei

- der Dokumentation des baulichen Ist-Stands,
- den Messungen mit In-situ-Gamma-Spektrometer,
- den Screening-Messungen mit Dosisleistungsmessgerät und Kontaminationsmonitor sowie
- der Entnahme von Wischtests.

Maßnahmen, die entsprechend zu treffen sind, beinhalten

- das Tragen von Mehrweglabormänteln und Einweghandschuhen,
- die Kontaminationskontrolle bei Verlassen der Zelte sowie
- bei Beendigung oder längeren Unterbrechungen der Arbeiten die Kontrolle durch Messungen mit Kontaminationsmonitor (Vermeidung von Kontaminationsverschleppung).

Aufgrund der teilweise hohen Dosisleistung ist bei den Demontearbeiten

### Tragen von Schutzkleidung

### Vermeidung von Kontaminationsverschleppung

**Mit Aerosol-entwicklung rechnen**

eine Planung der Arbeitsschritte erforderlich, um die Strahlenexposition der Mitarbeiter zu reduzieren. Unter anderem ist bei der Durchführung der Arbeiten auch mit einer Aerosolentwicklung zu rechnen. Daher musste der Betrieb des Kontrollbereichs inkl. Lüftung bis zum Ende des Freigabeverfahrens aufrechterhalten werden.

**Identifikation von Bereichen mit sehr hoher Kontamination oder Aktivierung und Entfernung dieser Komponenten, um die Strahlenbelastung im Raum zu senken (Demontageschritt 1)**

In Tabelle 1 sind die lokal höchsten Dosisleistungen für die beiden Beispiel-Zyklotrone zusammengestellt. Die Dosisleistung/Aktivierung hängt von der Position und vom Material ab. Die Quelle ist quasi punktförmig am Target angebracht, weshalb eine Neutronenreflexion möglich ist. Da eine Vielzahl an verschiedenen Materialien verbaut ist (verschiedene Stahllarten in unterschiedlicher Qualität, Kupfer, Aluminium, Silber, Polyethylene), ist die Höhe der Aktivierung unterschiedlich. Weiterhin ist eine Aktivierung der Betonstrukturen

(meist mit Polyethylenen, Bor und Blei versetzt) nicht auszuschließen. Diese ist jedoch für die ersten Demontageschritte zur Reduzierung der Dosisleistung vernachlässigbar, da in

**Aktivierung von Betonstrukturen**

den genannten Beispielen die Aktivierung von Betonstrukturen sehr niedrig war. Als erste Demontearbeit wurden die einzelnen Komponenten mithilfe üblicher Werkzeuge („Lösen von Verschraubungen“) demontiert und das für den Betrieb benötigte Betriebsmittel (bspw. Öl) abgelassen.

| Zyklotron 1  | Zyklotron 2                |
|--|----------------------------|
| Hintergrund: 0,65–0,70 µSv/h   | Hintergrund: 0,5–2,5 µSv/h |
| Target 1: 16 µSv/h   | Target: 390 µSv/h          |
| Target 2: 74 µSv/h   | Deflektor: 20.600 µSv/h    |
| Target 3: 58 µSv/h   | Dee 1: 26.000 µSv/h        |
| Targetport, Dee und sonstige Strahlungsführung bis 10 µSv/h                    | Dee 2: 1.100 µSv/h         |
| Umladefolienhalter, Magnetstrukturen und sonstige aktivierte Teile bis 2 µSv/h |                            |

Tab. 1: Die lokal höchsten Dosisleistungen für die beiden Beispiel-Zyklotrone

Bei Komponenten mit hoher Dosisleistung mussten zudem teilweise verschiedene hitzeentwickelnde Trennverfahren (u. a. Säge- und Schleifarbeiten) eingesetzt werden, da ein „Lösen von Verschraubungen“ nicht möglich war. An vereinzelt Stellen mussten die metallischen Strukturen aufgrund von tief eingedrungener Aktivierung herausgesägt werden.

Die demontierten Komponenten wurden in von der Landessammelstelle NRW bereitgestellte Abfallgebinde verbracht und so weit wie möglich aus dem Messbereich entfernt, um die Einstrahlung bei weiteren Messungen zu reduzieren.

In den Abbildungen 3 und 4 werden die Identifikation von Bereichen mit sehr hoher Kontamination oder Aktivierung und die Entfernung dieser Komponenten, um die Strahlenbelastung im Raum zu senken (Demontageschritt 1), dargestellt.

**Zerlegung des Zyklotrons und Trennung von verbliebenen, niedrig kontaminierten bzw. aktivierten Materialien von freigabefähigen Materialien (Demontageschritt 2)**

Nach der Entfernung und Entsorgung der Komponenten mit der erhöhten Dosisleistung wurden weitere Messungen durchgeführt, um festzustellen, ob weitere Komponenten mit erhöhter Dosisleistung vorhanden waren, die durch die ersten Komponenten überstrahlt wurden. Dieses iterative Verfahren war nötig, um diejenigen Komponenten mit niedriger Dosisleistung zu identifizieren, die nicht freigabefähig waren (Stichwort: Einstrahlung). Dabei wurden die Verfahren aus dem Demontageschritt 1 angewendet und die Komponenten dann entsprechend

**Komponenten mit erhöhter Dosisleistung?**



Abb. 3: Zyklotron 1 – Demontage aktivierter Bereiche



Abb. 4: Zyklotron 2 – nach der ersten Demontage

demontiert und in Abfallgebinden aus dem Abbaubereich entfernt. Im Anschluss erfolgte eine sortenreine Sortierung der kleinteiligen Materialien (Kupfer, Stahl, Aluminium etc.).

Größere Komponenten wie Abschirmwände wurden so vorbereitet, dass eine Freigabemessung mittels In-situ-Gamma-Spektrometrie durchgeführt werden konnte.

Die Abbildungen 5, 6 und 7 zeigen die Zerlegung des Zyklotrons und



Abb. 5: Zyklotron 1 – Messung von freigabefähigen Materialien (Beton)

die Trennung von verbliebenen niedrig kontaminierten bzw. aktivierten Materialien von freigabefähigen Materialien (Demontageschritt 2).

#### Abgabe der kontaminierten und aktivierten Materialien als radioaktive Abfälle an entsprechend zugelassene Stellen

Bei den beiden Zyklotronen wurde jeweils eine Gesamtmasse von ca. 20 Mg und ca. 22 Mg der Freigabe/Entsorgung zugeführt.

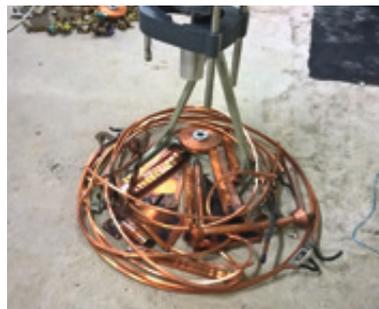


Abb. 6: Zyklotron 1 – Messung von freigabefähigen Materialien (sonstiges Material)



Abb. 7: Zyklotron 2 – Messung von freigabefähigen Materialien

Anzeige



### SK UT Strahlenschutzkurse Uni Tübingen

#### Fachkunde- und Inhousekurse im Strahlenschutz

- zum Fachkundeerwerb und zur Fachkundeaktualisierung in Tübingen
- Fachkundeaktualisierung durch Inhousekurse

**Besuchen Sie uns auf unserer Homepage und finden Sie den passenden Kurs!**

[www.strahlenschutzkurse-UT.de](http://www.strahlenschutzkurse-UT.de)

Kursleiter: Dr. Thomas Haug  
haug@wit-strahlenschutz.de



UNIVERSITÄT  
TÜBINGEN



#### Zyklotron 1

Als radioaktiver Abfall wurden insgesamt ca. 0,3 Mg an die Landessammelstelle NRW abgegeben. Der größte Anteil (ca. 80 %) waren metallische aktivierte Komponenten.

Die restlichen 20 % entfallen auf den Sekundärabfall und brennbaren Abfall. In den 0,3 Mg Gesamtmasse wurden auch ca. 2 Liter aktiviertes/kontaminiertes Öl mitentsorgt. Die zu entsorgenden Komponenten wurden dafür in die entsprechenden, von der Landessammelstelle zur Verfügung gestellten Behältnisse gepackt. Die Bestimmung der Aktivitäten erfolgte durch Messungen mit In-situ-Gamma-Spektrometrie und Materialproben wurden in Bezug auf Material und Radiologie charakterisiert. Die Gesamtaktivität lag bei ca. 2 MBq.

**Gesamtaktivität bei ca. 2 MBq**

### Zyklotron 2

Als radioaktiver Abfall wurden insgesamt ca. 2,4 Mg an die Landessammelstelle NRW abgegeben. Der größte Anteil (ca. 95 %) waren metallische

aktivierte Komponenten. Die restlichen 5 % entfielen auf den Sekundärabfall und brennbaren Abfall. Die Bestimmung der Aktivitäten erfolgte durch Messungen mit der In-situ-Gamma-Spektrometrie

### In-situ-Gamma-Spektrometrie

und durch Messung der Dosisleistung. Die Gesamtaktivität lag bei ca. 341 MBq.

Einige Komponenten konnten nicht uneingeschränkt freigegeben werden, sondern wurden zur Entsorgung auf eine Deponie verbracht.

Insgesamt 16,5 Mg Material wurde auf diese Weise entsorgt und wiesen eine Gesamtaktivität von 49,7 MBq auf. Die verbliebenen Massen konnten uneinge-

### Aktivität von 49,7 MBq deponiert

schränkt freigegeben und konventionell entsorgt werden.

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Abgabe der kontaminierten und aktivierten Materialien als radioaktive Abfälle an entsprechend zugelassene Stellen.



Abb. 9: Zyklotron 2 – Teile zur Deponierung als radioaktive Abfälle

### Durchführung von Wischtest-, Kontaminationsmonitor- und In-situ-Messungen zum Nachweis der Freigabefähigkeit der Gebäudestrukturen und der sonstigen Komponenten (Demontageschritt 3)

Für die Freigabe der restlichen Komponenten, die nicht entsorgt wurden, wurde eine Kombination aus den nachfolgenden Messverfahren als Entscheidungsmessung zur Freigabe eingesetzt:

- Messungen mit In-situ-Gamma-Spektrometrie zum Ausschluss bzw. zur Quantifizierung von Aktivierung, teilweise unterstützt durch Auswertung von Materialproben,
- Messungen mit Kontaminationsmonitor und Gesamtbeta-Messun-

gen an Wischtests zum Ausschluss von Kontaminationsfreisetzung und -verschleppung,

- Messungen mit Kontaminationsmonitor, Messungen von Materialproben und Gesamt-Beta-Messungen an Wischtests zum Ausschluss von Kontaminationsfreisetzung während des Betriebs sowie
- LSC-Messungen von Materialproben zum Ausschluss und zur Quantifizierung von beispielsweise  $^3\text{H}$ - und  $^{14}\text{C}$ -Kontaminationen im Raum.

### Erstellung der Freigabedokumentation zur Aufhebung der behördlichen Überwachung über die betrachteten Raumbereiche

Bei der Erstellung der Freigabedokumentation für die Raum- und Gebäudefreigabe ist die jeweilige Freigabeoption anzuwenden. Die Gebäudestrukturen wurden nach den zu dem Zeitpunkt der Freigabe geltenden Freigabewerten für Gebäude zur Wieder- und Weiterverwendung gemäß Anlage 4, Tabelle 1, Spalte 8

### Gebäude zur Wieder- und Weiterverwendung

(2001) bzw. Spalte 12 (2018) StrlSchV (Kontamination) bzw. Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 6 (2001/2018) StrlSchV (Aktivierung) bewertet. Für sonstige (d. h. mobile oder nicht fest mit dem Gebäude verbundene) Gegenstände sind 2 Sätze von Freigabewerten anzuwenden:



Abb. 8: Zyklotron 1 – Charakterisierung

## BODY SCAN

### Effektives Ganzkörper- Screening



Edelstahl

- **Oberflächenkontaminationswerte** nach Anlage 4, Tabelle 1, Spalte 4 (2001) bzw. Spalte 5 (2018) StrlSchV und
- **massenspezifische Freigabewerte** nach Anlage 4, Tabelle 1, Spalte 5 (2001) bzw. Spalte 3 (2018) StrlSchV. Es ist jeweils eine Summenformel nach Anlage 8, Teil A 1.e StrlSchV anzuwenden.
- Die zulässigen Mittelungsgrößen sind 1 m<sup>2</sup> für Gebäude (1.000 kg im Fall von Aktivierung) und 1.000 cm<sup>2</sup> bzw. 300 kg für sonstige Gegenstände. Messungen mit In-situ-Gamma-Spektrometrie erfassen i. d. R. größere Flächen bzw. Massen. In diesem Fall ist ein Bezug höchstens auf die Mittelungsgrößen gemäß

StrlSchV gültig. Da alle durchgeführten Messungen bzw. Beprobungen in einem kleineren Maßstab durchgeführt wurden und damit über weniger als die zulässigen Größen mitteln, ist für die sonstigen Messungen ein direkter Vergleich zu den Messergebnissen mit den Freigabewerten zulässig.

### Direkter Vergleich zu den Mess- ergebnissen

gen ein direkter Vergleich zu den Messergebnissen mit den Freigabewerten zulässig.

- Das Aktivitätsniveau zeigte, dass eine Aktivierung oberhalb der Frei-



Abb. 10: Zyklotron 1 – konventionelle Entsorgung

### Schnelle und benutzerfreundliche Ganzkörperkontaminationsmessung:

- **Effizienz:** Detektionsfläche über 20.000 cm<sup>2</sup> mit gasfreien oder gasgespülten Detektoren
- **Flexibilität:** Kundenspezifische Anpassung durch mehr als 50 Varianten
- **Konnektivität:** Integrierte Dosimeterstation (Option), Ethernet Client (Option)



Abb. 11: Zyklotron 1 – Projektende

gabewerte gemäß Anlage 4, Tabelle 1, Spalte 3 bzw. Spalte 6 StrlSchV (2018) nicht vorlag. Es war nicht zu erwarten, dass die Oberflächenkontamination oberhalb der Oberflächen-Kontaminationswerte nach Anlage 4, Tabelle 1, Spalte

5 StrlSchV (2018) lag, und diese Einschätzung wurde durch die Messungen bestätigt. Eine Überschreitung der Freigabewerte für Gebäude zur Wieder- und Weiterverwendung nach Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 12 StrlSchV (2018) wurde ebenfalls ausgeschlossen.

### Einschätzung durch die Messungen bestätigt

### Abgabe der freigegebenen konventionellen Materialien gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz

Im Falle des Zyklotron 1 konnten insgesamt ca. 20 Mg Metall und Abschirmung freigegeben werden und der konventionellen Rezyklierung/Weiterverwendung gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz zugeführt werden. Die angrenzenden Räume des Zyklotrons wurden freigegeben, der Kontrollbereich konnte aufgehoben werden und die Genehmigung wurde zurückgegeben.

### Kontrollbereich aufgehoben

Im Falle des Zyklotron 2 erfolgte die Freigabe teils uneingeschränkt, teils eingeschränkt. Es konnten 3,1 Mg Metall und sonstige Komponenten freigegeben werden und dem Kreislaufwirtschaftsgesetz zugeführt werden. Die restlichen Materialien konnten an die entsprechenden Entsorgungsstellen entsorgt werden. Die Abbildungen 10 bis 12 stellen die Abgabe der freigegebenen konventionellen Materialien gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz und das jeweilige Projektende dar.

Wie bereits weiter oben angesprochen, wurden die verbliebenen Komponenten, die uneingeschränkt nicht freigabefähig waren, der spezifischen Freigabe zugeführt. Durch die Erteilung eines Freigabebescheids und die Einbindung des Bundeslandes der Deponie konnte gemäß § 40 Absatz 2 Satz 2 StrlSchV (2018) dem Antrag auf Herstellung des Einvernehmens stattgegeben werden. In Übereinstimmung mit dem Freigabebescheid konnte nach Abschluss der Messungen die Freigabedokumentation erstellt werden. Die Dokumentation stellte den Nachweis dar, dass die Anforderungen des Freigabebescheids erfüllt waren, sodass eine Freigabeempfehlung für das Material gegeben werden konnte. Nachdem keinerlei Einwände seitens der Behörde bestanden, konnte das Material zum Einbau in die Deponie abgegeben werden. Nach dem Einbau erfolgte ein Nachweis der Behörde, die damit das Freigabeverfahren für den Rückbau des Zyklotrons abgeschlossen hat.

### Anmerkung zu Zyklotron 2

Wie bereits weiter oben angesprochen, wurden die verbliebenen Komponenten, die uneingeschränkt nicht freigabefähig waren, der spezifischen Freigabe zugeführt.

### Der spezifischen Freigabe zugeführt

Wie bereits weiter oben angesprochen, wurden die verbliebenen Komponenten, die uneingeschränkt nicht freigabefähig waren, der spezifischen Freigabe zugeführt.

Wie bereits weiter oben angesprochen, wurden die verbliebenen Komponenten, die uneingeschränkt nicht freigabefähig waren, der spezifischen Freigabe zugeführt.

Wie bereits weiter oben angesprochen, wurden die verbliebenen Komponenten, die uneingeschränkt nicht freigabefähig waren, der spezifischen Freigabe zugeführt.

Wie bereits weiter oben angesprochen, wurden die verbliebenen Komponenten, die uneingeschränkt nicht freigabefähig waren, der spezifischen Freigabe zugeführt.

### Freigabeempfehlung für das Material

Bastian Degner



Abb. 12: Zyklotron 2 – Projektende