

Praktikum zur Vorlesung “Radiopharmazie”

Thema: Radionuklid-Herstellung am Zyklotron

Teilnehmer: max. 5 Studenten gleichzeitig
Dauer: 2 - 2.5 h
Ort: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
Gebäude 801/151
Termin u. Zeit: nach Vereinbarung
Ansprechpartner: Dr. Martin Kreller
Tel: 0351-260 4029

Contents

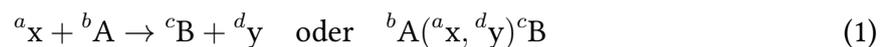
1 Grundlagen der Radionukliderzeugung	2
1.1 Bestimmung der erreichbaren Aktivität	2
1.2 Sättigungsausbeute	3
1.3 Zerfall der Radionuklide	4
1.4 Liste von Kernreaktionen zur Erzeugung von Radionukliden	5
2 Das Zyklotron TR-FLEX	6
2.1 Ionenerzeugung und Einspeisung in das Zyklotron	6
2.2 Teilchenbeschleunigung im Zyklotron	7
2.3 Teilchenextraktion mittels Stripper-Folien	9
2.4 Targetbestrahlung	9
3 Strahlenschutz	11

1 Grundlagen der Radionukliderzeugung

Natürliche Radionuklide stehen für die medizinische Anwendung kaum zur Verfügung, da die Radionuklidkonzentrationen zu gering, die Radionuklide durch andere Isotope verunreinigt und die Zerfallseigenschaften (Halbwertszeit, Zerfallsart, Strahlungsenergie) meist ungeeignet sind. Daher werden Radionuklide für die medizinische Anwendung mit vorgegebenen Eigenschaften künstlich hergestellt.

Zur künstlichen Erzeugung von Radionukliden muss eine hohe Energiebarriere von mindestens 6 - 10 MeV pro Nukleon überwunden werden. Voraussetzung zur Breitenanwendung von Radionukliden sind Anlagen, die Projektile mit entsprechender Energie in ausreichender Menge zur Verfügung stellen. Dies kann mittels eines Isotopengenerators, durch Kernspaltung oder über Kernreaktionen an einem Teilchenbeschleuniger erfolgen.

Im folgenden wird die künstliche Erzeugung von Radionukliden durch Kernreaktionen mittels eines Teilchenbeschleunigers beschrieben. Man unterscheidet zwischen Linearbeschleunigern, Kreisbeschleunigern und Laser-Beschleunigern. Das Zyklotron ist ein Kreisbeschleuniger. Kreisbeschleuniger haben gegenüber Linearbeschleunigern den Vorteil, dass die Beschleunigungsstruktur mehrfach genutzt wird. Die Kernreaktion wird wie folgt dargestellt:



Dabei bezeichnet x das Projektil, A das Ausgangsnuklid, B das Zielnuklid und y ein zweites emittiertes Teilchen. Für die Masse der beteiligten Komponenten gilt:

$$a + b = c + d. \quad (2)$$

1.1 Bestimmung der erreichbaren Aktivität

Die Bildungsrate des Radionuklids B durch eine Kernreaktion kann wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{dN_B}{dt} = \sigma \cdot \Phi \cdot H \cdot N_A$$

Dabei gibt σ den Wirkungsquerschnitt (Wahrscheinlichkeit zum Auftreten der Kernreaktion), Φ die Flussdichte des Projektils, H die Häufigkeit des für die Kernreaktion notwendigen Targetnuklids und N_A die Anzahl der Targetkerne an.

Während der Bestrahlung beginnt der Zerfall erzeugter Radionuklide. Dies wird wie folgt berücksichtigt.

$$\frac{dN_B}{dt} = \sigma \cdot \Phi \cdot H \cdot N_A - \lambda \cdot N_B$$

Dabei ist $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ die Zerfallskonstante, $T_{1/2}$ die Halbwertszeit des Radionuklids und N_B die Anzahl der Produktkerne. Durch Integration der Gleichung in den Grenzen von von $t_1 = 0$ bis $t_2 = t$ ergibt sich die Anzahl des erzeugte Radionuklids $N_B(t)$ bzw. die Aktivität $A_B(t)$ zum Zeitpunkt t zu

$$A_B(t) = \lambda \cdot N_B(t) = \sigma \cdot \Phi \cdot H \cdot N_A \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})$$

Der Wirkungsquerschnitt $\sigma(E)$ ist Abhängig von der Energie E des Projektils zum Zeitpunkt der Reaktion. Am Zyklotron wird das Projektil im Target abgebremst. Somit findet die Kernreaktion im Zyklotron-Target in einem kontinuierlichen Energiespektrum statt. In Abbildung 1 ist der Wirkungsquerschnitt der Kernreaktion $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ dargestellt.

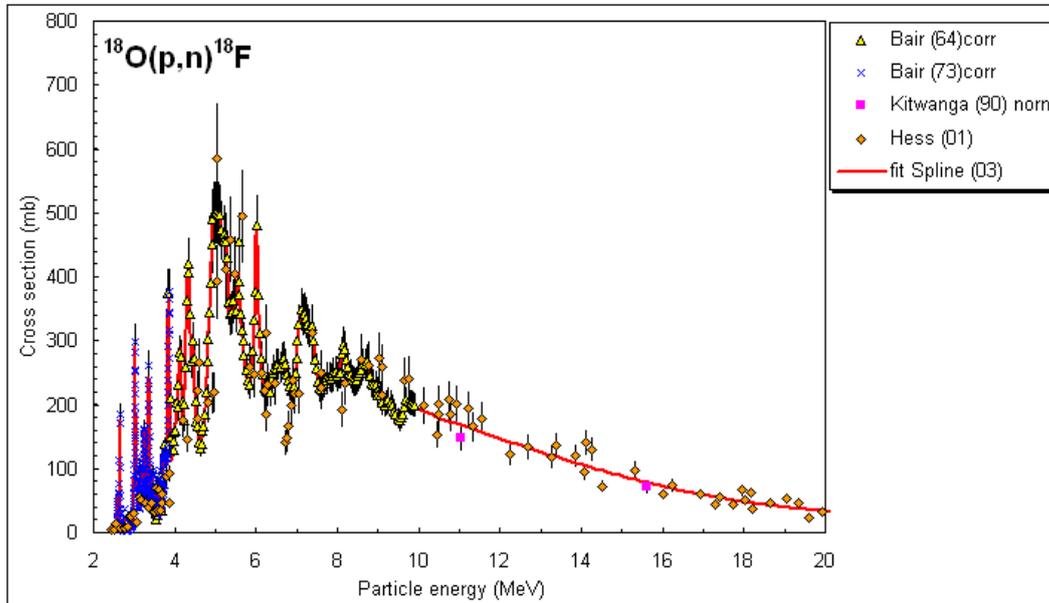


Figure 1: Darstellung des energieabhängigen Wirkungsquerschnitts für die $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ Kernreaktion.¹

1.2 Sättigungsausbeute

Im Zyklotrontarget existiert im Vergleich zur Projekttilzahl ein Überschuss an Targetmaterial. Damit bestimmt die Anzahl der aktivierenden Teilchen die Ausbeute.

Durch Integration des Wirkungsquerschnitts über den Energiebereich von $E = 0$ bis zur maximalen Partikelenergie $E = E_P$ kann die Ausbeute η zur Erzeugung des Radionuklids in Abhängigkeit von der Ausgangsenergie des Partikels E_P bestimmt werden.

$$\eta = \int_{E=0}^{E=E_P} \sigma(E) \cdot H \cdot N_A \quad (3)$$

In Abbildung 2 ist die Ausbeute für die Kernreaktion $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ dargestellt. Die erreichbare Aktivität berechnet sich somit zu

$$A_B(t) = \Phi \cdot \eta \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \quad (4)$$

In der Praxis wird der Teilchenfluss durch den Partikelstrom I_T in μA und die Ausbeute durch die Sättigungsausbeute A_{sat} in $\text{GBq}/\mu\text{A}$ angegeben. Die Sättigungsausbeute ist ein

¹Quelle: <https://www-nds.iaea.org/medical/>

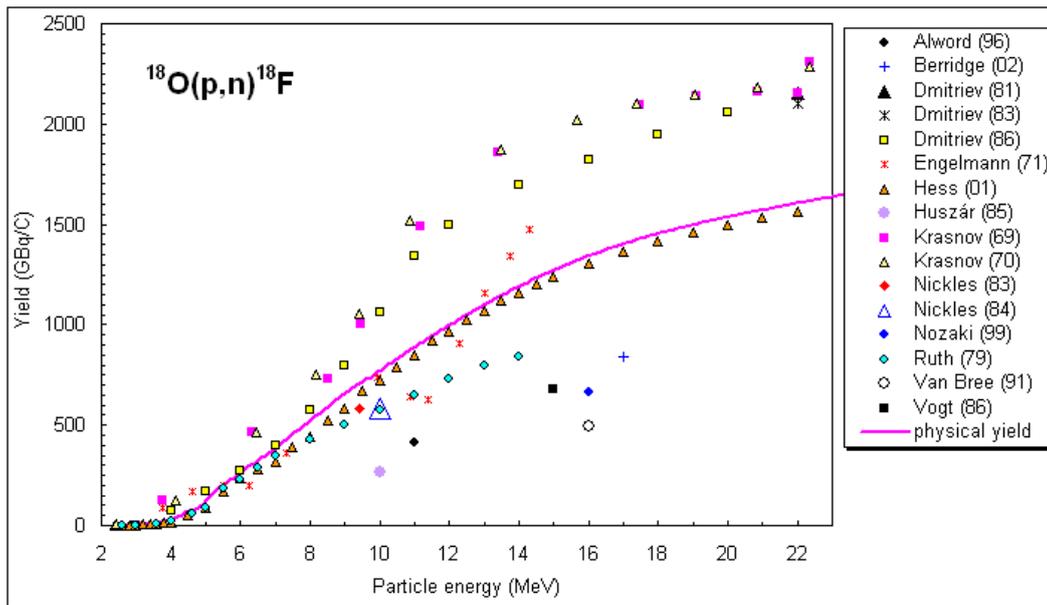


Figure 2: Darstellung der Ausbeute für die $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ Kernreaktion in Abhängigkeit von der Projektilenergie.²

Targetspezifischer Anlagenparameter. Die erreichbare Aktivität skaliert mit dem Ionenstrom I_T :

$$A_{EOB} = A_{sat} \cdot I_T \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \quad (5)$$

mit $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ und $e^{\ln 2} = 2$ folgt:

$$A_{EOB} = A_{sat} \cdot I_T \cdot (1 - 2^{-t_{irr}/T_{1/2}}) \quad (6)$$

Dabei ist A_{EOB} die erreichte Aktivität (End of Bombardment), t_{irr} die Bestrahlungszeit, I_T der Targetstrom und $T_{1/2}$ die Halbwertszeit.

In Abbildung 3 ist das Verhältnis von Ausbeute zu Sättigungsausbeute in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit in Halbwertszeiten dargestellt. Es zeigt sich, dass die erreichte Ausbeute nach etwa 5 Halbwertszeiten die Sättigungsausbeute erreicht hat. Die Bestrahlung eines Targets mit einer Bestrahlungszeit von mehr als 5 Halbwertszeiten führt zu keiner relevanten Erhöhung der Radionuklidproduktion.

1.3 Zerfall der Radionuklide

Zwischen Ende der Radionuklidproduktion und Herstellung des Radiopharmaka sowie der Anwendung des Radiopharmaka vergeht eine Zeit t . In dieser Zeit verringert sich die Aktivität des Radionuklids nach dem Zerfallsgesetz:

$$A(t) = A_{EOB} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (7)$$

²Quelle: <https://www-nds.iaea.org/medical/>

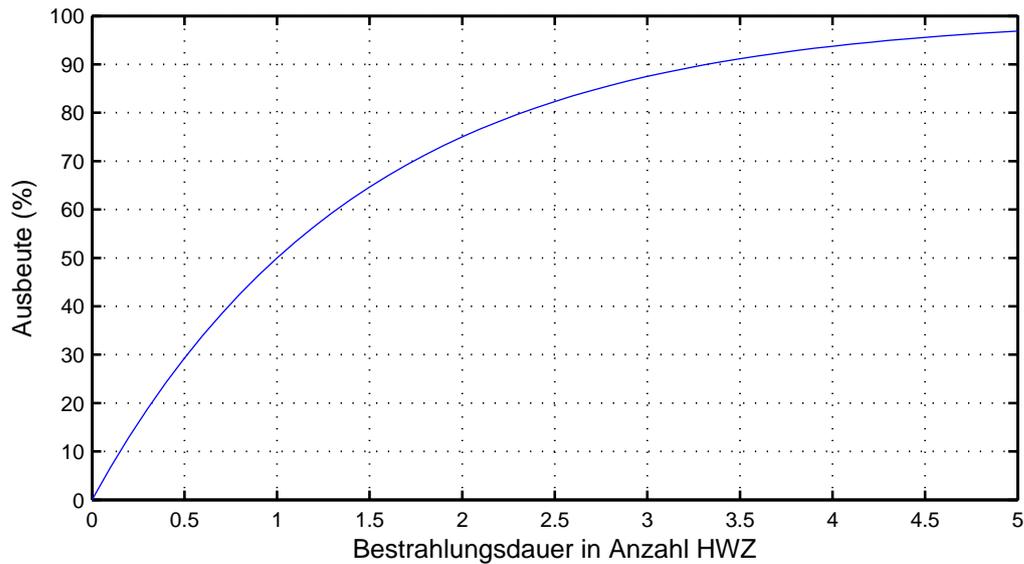


Figure 3: Darstellung der Ausbeute in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit.

mit Zerfallskonstante $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$ folgt:

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (8)$$

1.4 Liste von Kernreaktionen zur Erzeugung von Radionukliden

Nachfolgend sind einige Kernreaktionen zur Erzeugung typischer Radionuklide inklusive der Halbwertszeiten, dem Ausgangsstoff und dem Aggregatzustand dargestellt.

Kernreaktion	Halbwertszeit	Ausgangsstoff	Reaktionsprodukt
$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$	$T_{1/2} = 110 \text{ min}$	$\text{H}_2\text{O} (\text{l})$ (1) $^{18}\text{O}] \text{O}_2 (\text{g})$ und (2) $\text{Ar} + 0.2 \% \text{F}_2 (\text{g})$	F^- F_2
$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$	$T_{1/2} = 20 \text{ min}$	$\text{N}_2 + 0.1 \% \text{O}_2 (\text{g})$ $\text{N}_2 + 10 \% \text{H}_2 (\text{g})$	CO_2 CH_4
$^{86}\text{Sr}(p,n)^{86}\text{Y}$	$T_{1/2} = 14.74 \text{ h}$	$\text{SrCO}_3 (\text{s})$	Y
$^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$	$T_{1/2} = 12.7 \text{ h}$	$\text{Ni} (\text{s})$	Cu
$^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$	$t_{1/2} = 3.32 \text{ h}$	$\text{Zn} (\text{s})$	Cu
$^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$	$T_{1/2} = 3.27 \text{ d}$	$\text{Y} (\text{s})$	Zr

2 Das Zyklotron TR-FLEX

Die Radionuklidproduktion am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf erfolgt mit dem Zyklotron TR-FLEX der Firma ADVANCED CYCLOTRON SYSTEMS, INC.

Im Zyklotron werden Wasserstoffionen mit einem Ionenstrom von 10 - 300 μA auf Energien zwischen 18 - 30 MeV beschleunigt. Für die Radionuklidproduktion stehen sowohl Flüssigkeits-, Gas- als auch Feststofftargets zur Verfügung.

In Abbildung 4 sind die Hauptkomponenten des Zyklotrons schematisch dargestellt. Der Betrieb des Zyklotrons kann in 4 Bereiche unterteilt werden:

- Ionenerzeugung
- Ionenbeschleunigung
- Ionenextraktion
- Targetbestrahlung

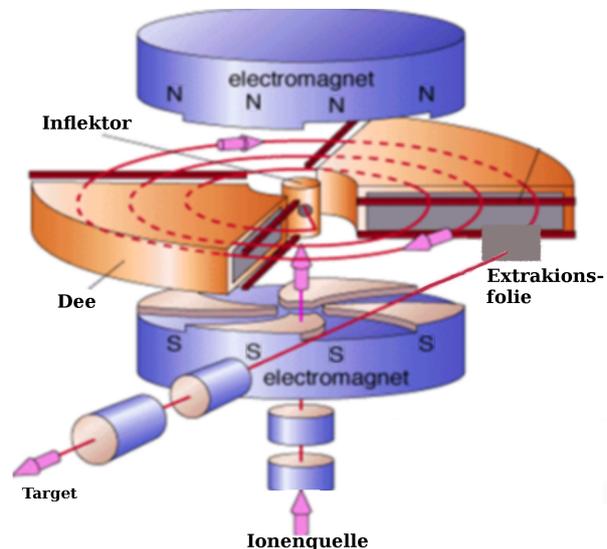


Figure 4: Schematische Darstellung der Zyklotron-Komponenten³

Nachfolgend sind die einzelnen Schritte beschrieben.

2.1 Ionenerzeugung und Einspeisung in das Zyklotron

Im Zyklotron TR-FLEX werden negative Wasserstoffionen in einer Plasmaionenquelle erzeugt und durch Beschleunigung auf ca. 27 kV ein Ionenstrahl generiert. Mittels elektrostatischen und magnetischen Strahlführungselementen wird dieser in den Inflektor des Zyklotrons geführt und von dort auf die Beschleunigungsebene abgelenkt.

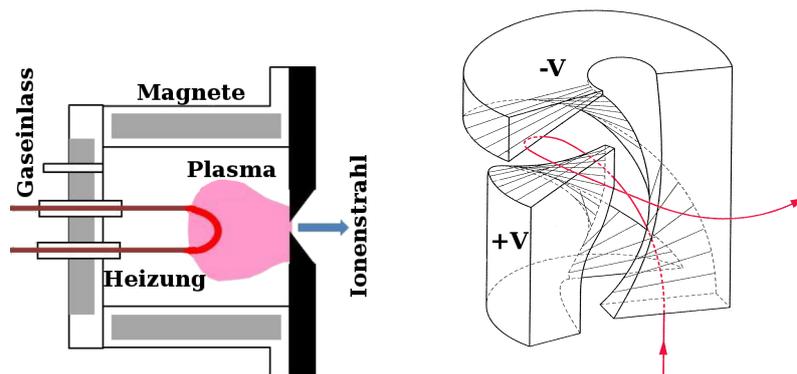


Figure 5: Schematische Darstellung einer Multi-Cusp Ionenquelle (links)⁴ und eines Inflektors (rechts)⁵. Der negative Ionenstrahl (rote Linie) wird durch das elektrische Feld zwischen der positiven und negativen von der vertikalen in die horizontale Ebene Elektrode abgelenkt.

³Quelle: Livingood, Cyclic Particle Accelerators

⁴Quelle: Fundamentals of Ion Sources, Berkeley Lab, Daniela Leitner

⁵Quelle: US Patent 20110291484 A1, 2011

Die Erzeugung der Ionen erfolgt in einer Multi-Cusp Ionenquelle wie links in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Elektronen werden durch Glühemission erzeugt und elektrostatisch in Richtung Plasmakammer beschleunigt. Die Plasmakammer ist mit dem Arbeitgas Wasserstoff gefüllt. Durch Elektronenstoßionisation entsteht ein Plasma mit positiv geladenen Ionen. Negativ geladene Teilchen werden durch Elektroneneinfang gebildet.

Innerhalb der Ionenquelle werden die Elektronen und somit das Plasma von einem Magnetfeld eingeschlossen um die Neutralisation an den Kammerwänden zu minimieren. Das Magnetfeld wird durch eine externe Anordnung von Dauermagneten erzeugt. Im Plasma herrscht ein Gleichgewicht zwischen positiven und negativen Ladungsträgern. Durch das Anlegen eines elektrischen Potentials an die Ionenquelle können vom Randbereich des Plasmas Ionen extrahiert werden. Diese werden mittels magnetischen und elektrischen Linsen zu einem Strahl formiert. Der Ionenstrahl wird mit dem Inflektor, siehe rechts in Abbildung 5, im Zentrum des Zyklotrons von der vertikalen Injektionsebene in die horizontale Beschleunigungsebene abgelenkt.

2.2 Teilchenbeschleunigung im Zyklotron

Wie in Abbildung 4 dargestellt, erfolgt die Beschleunigung geladener Teilchen im Zyklotron in einer Vakuumkammer zwischen zwei Magnetpolen. In der Vakuumkammer sind Beschleunigungselektroden, so genannte Duanten (engl. Dees), eingebaut. Durch das Anlegen einer Spannung an die Duanten werden geladene Teilchen beschleunigt.

Zwischen den zwei Magnetpolen wird in z -Richtung ein Magnetfeld B erzeugt. Dadurch werden in der x - y -Ebene bewegte Teilchen mit der Ladung e und der Geschwindigkeit \vec{v} gemäß der Lorentz-Kraft

$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (9)$$

auf eine Kreisbahn abgelenkt. Für einen stabilen Umlauf von Teilchen mit der Masse m im Abstand r vom Zentrum der Kreisbahn gilt, dass die Lorentzkraft gleich der Zentrifugalkraft

$$\vec{F}_Z = \frac{m \cdot v^2}{r} = F_L \quad (10)$$

ist. Daraus lässt sich die Umlaufgeschwindigkeit ω ableiten

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{e \cdot B}{m}. \quad (11)$$

Nähert sich das geladene Teilchen der Beschleunigungselektrode wird es im elektrischen Feld beschleunigt. Die Beschleunigungselektrode ist so aufgebaut, dass Teilchen diese passieren können. Innerhalb der Elektrode bewegt sich das Teilchen feldfrei. Die Elektroden werden mit einer hochfrequenten Wechselspannung beschalten. Während das Teilchen sich innerhalb der Elektrode befindet, wird diese umgeladen um das Teilchen beim Verlassen der Elektrode wiederum zu beschleunigen

Eine kontinuierliche Beschleunigung erfolgt nur, wenn die Hochfrequenz der Wechselspannung ω_{HF} ein ganzzahliges Vielfaches der Umlaufgeschwindigkeit der Teilchen ω ist.

$$\omega_{HF} = h \cdot \omega \quad (12)$$

Dabei bezeichnet h die Harmonischenzahl. Durch die relativistische Massenzunahme der Teilchen während der Beschleunigung nimmt ω im Laufe der Beschleunigung ab. Im Synchrozyklotron wird die Frequenz der Wechselspannung moduliert, um diese an die Umlaufgeschwindigkeit anzupassen. Somit kann pro Modulationumlauf immer nur ein Teilchenpaket beschleunigt werden. Das TR-FLEX am HZDR ist ein Isochronzyklotron. Im Isochronzyklotron steigt das Magnetfeld B mit steigendem Radius in der Form

$$B(r) \approx B_0 \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{q \cdot B_0}{m_0 \cdot c} \right) r^2 \right] \quad (13)$$

an. Der Vorteil des Isochronzyklotron gegenüber dem Synchrozyklotron ist, dass mit einer konstanten Hochfrequenz gearbeitet und somit die Teilchen kontinuierlich beschleunigt werden können.

Der Magnetfeldgradient $B(r)$ in radialer Richtung erzeugt Beschleunigungskräfte auf die Teilchen in z -Richtung, d.h. der Ionenstrahl wird defokussiert. Um dies zu kompensieren wird die Magnetfeldstärke im Isochronzyklotron, wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt, azimuthal variiert.

Bereiche mit starkem B-Feld (hill) wechseln sich mit Bereichen mit schwachem B-Feld (valley) ab. An den Ein- und Austrittskanten des segmentierten Magneten findet eine Fokussierung bzw. Defokussierung des Ionenstrahls statt. Der Ionenstrahl durchläuft somit abwechselnd eine magnetische Sammel- und Zerstreulinse. Das Prinzip der starken Fokussierung besagt, dass die Kombination von Sammel- und Zerstreulinse mit entsprechendem Abstand stark fokussierend wirkt. Die axialen fokussierenden Kräfte F_z des Azimutal variierenden Feldes (AVF) sind stärker als die axialen defokussierenden Kräfte F_z in der Isochronbedingung.

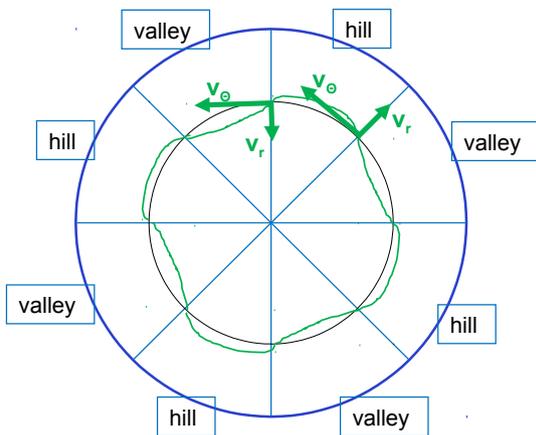


Figure 6: Schematische Darstellung des azimuthal variierenden Magnetfeldes.⁶

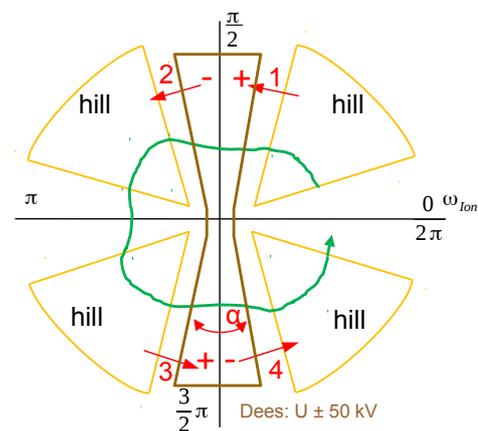


Figure 7: Schematische Darstellung der Beschleunigung im Zyklotron.⁶

In Abbildung 7 sind die Beschleunigungsphasen während eines Zyklotronumlafs schematisch dargestellt. In einem Zyklotron wie dem TR-FLEX mit 2 Dees beträgt die Anzahl der Beschleunigungsstrecken für einen Umlauf $N = 4$. Der Energiezuwachs ΔE im Zyklotron

⁶Quelle: Dipl. Ing. S. Preusche

je Umlauf lässt sich für ein Zyklotron mit einem Dee-Winkel α wie folgt berechnen

$$\Delta E = N \cdot e \cdot U \cdot \sin\left(\frac{h \cdot \alpha}{2}\right). \quad (14)$$

Im TR-FLEX beträgt der Winkel $\alpha = 40^\circ$, die Harmonischenzahl $h = 4$, die Beschleunigungsspannung $U = 50$ kV. Die Zyklotronfrequenz des TR-FLEX beträgt $\omega_{HF} = 85$ MHz.

2.3 Teilchenextraktion mittels Stripper-Folien

Es bestehen unterschiedliche Möglichkeiten die beschleunigten Teilchen aus dem Zyklotron zu extrahieren. Zum einen Ablenkung durch ein lokales elektrisches oder magnetisches Feld oder die Umladung der beschleunigten Teilchen und somit die Ablenkung durch das Zyklotron-Magnetfeld. Die Extraktion am TR-FLEX erfolgt mittels Stripperfolien. Passieren die negativ geladenen Wasserstoffionen die hochreinen Kohlenstoff-Folien werden die Elektronen "abgestreift", das Teilchen somit umgeladen. Die Lorentzkraft F_L wirkt nun in die entgegengesetzte Richtung und das Teilchen wird aus dem Zyklotron extrahiert.

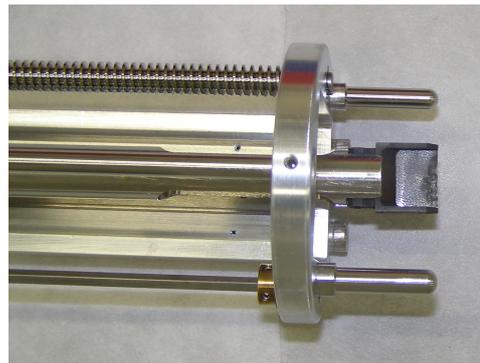
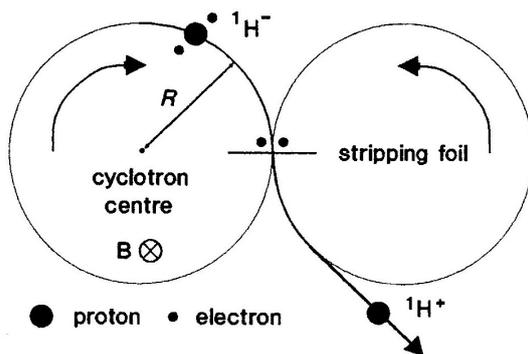


Figure 8: Schematische Darstellung der Umladung und darauffolgender Teilchenextraktion (links)⁷. Abbildung einer Stripper-Folie inkl. Extraktionssystem des TR-FLEX (rechts).

Am Zyklotron TR-FLEX sind zwei Stripper-Folien verbaut. Somit können die Teilchen zeitgleich an zwei Ausgängen extrahiert werden. Die Position der Stripper-Folien ist radial einstellbar und somit ist die Energie der extrahierten Teilchen im Bereich von 18 - 30 MeV variabel. In Abbildung 8 ist die Teilchenextraktion noch einmal schematisch dargestellt. Weiterhin ist eine Stripper-Folie des TR-FLEX inkl. Stripperhalter gezeigt.

2.4 Targetbestrahlung

Der letzte Abschnitt der Radionuklidproduktion am Zyklotron umfasst die Targettechnik. Das Projektil wird aus dem Vakuum der Beschleunigereinheit auf das gasförmige, flüssige oder feste Target gelenkt. Dabei muss eine Trennung des Vakuums und eine Kühlung des Targets erfolgen. Der Leistungseintrag in ein Target für einen typischen Ionenstrom von $I_{irr.} = 100 \mu A$ mit einer Energie von $E_P = 25$ MeV beträgt $P_{Strahl} = 2.5$ kW.

⁷Quelle: K. Strijckmans, Comp. Med. Imag. Graph. 25 (2001) 69-78

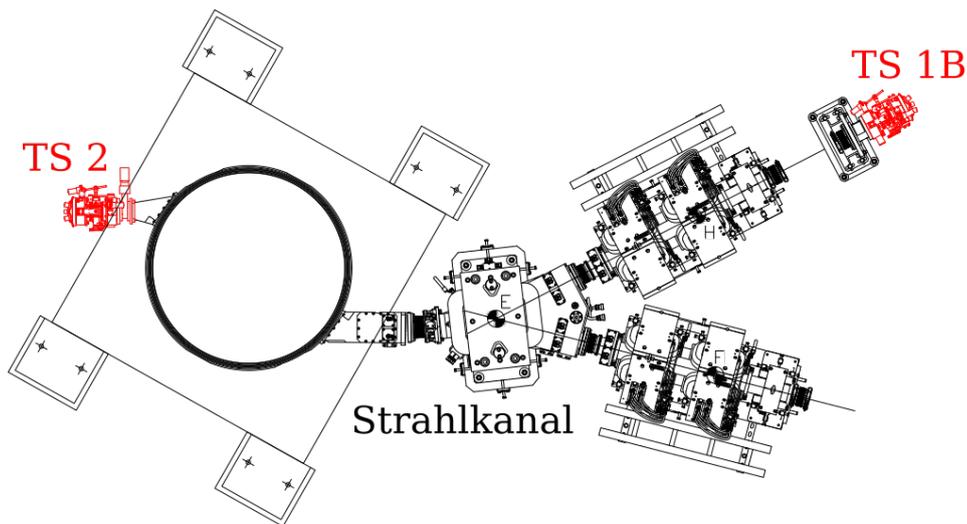


Figure 9: Schematische Darstellung des TR-FLEX mit den beiden Target-Selektoren TS 1B und TS 2.

Am TR-FLEX sind zwei Extraktionsports verbaut. Am ersten ist ein Strahlkanal angeschlossen. Über einen Umschaltmagneten kann der Ionenstrahl auf zwei verschiedene Target-Selektoren TS1A und TS1B gelenkt werden. Am zweiten Extraktionsport ist direkt der Target-Selektor TS2 montiert. In Abbildung 9 ist das Zyklotron mit dem Strahlkanal und zwei Target-Selektoren dargestellt. Am Target-Selektor 1B sind

- ein 90° Feststofftarget,
- ein $[^{18}\text{F}]\text{F}^-$ -Flüssigkeitstarget,
- ein $[^{11}\text{C}]\text{CH}_4$ -Gastarget

und am Target-Selektor 2 sind

- ein 30° Feststofftarget,
- ein $[^{18}\text{F}]\text{F}^-$ -Flüssigkeitstarget,
- ein $[^{18}\text{F}]\text{F}_2$ -Gastarget und
- ein $[^{11}\text{C}]\text{CO}_2$ -Gastarget montiert.

Die Targetselektoren können so verschoben werden, dass jeweils eines der montierten Targets im Protonenstrahl steht.

Targetaufbau

In Abbildung 10 ist exemplarisch der Querschnitt eines Flüssigkeitstargets dargestellt. Der rote Pfeil symbolisiert den Ionenstrahl. Ein Target muss folgende Funktionen gewährleisten:

- Einschluss des Targetmaterials,
- Vakuumabdichtung zum Strahlkanal,
- Abbremsung des Ionenstrahls im Targetmaterial,
- Kühlung des Targetmaterials und aller Targetkomponenten und
- automatische Lade- und Entladevorrichtung.

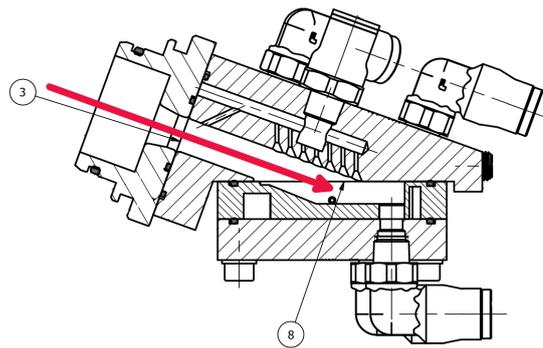


Figure 10: Schematische Darstellung eines Flüssigkeitstargets mit Kennzeichnung des Ionenstrahls (rot), der Vakuumfolie (3) und der Targetfolie (8).

Das Targetmaterial befindet sich in der Abbildung hinter der Targetfolie (8). Diese dient zum Einschluss des Targetmaterials und wird vom Ionenstrahl durchdrungen. Position (3) bezeichnet die Vakuumfolie. Diese trennt das Target vom Vakuum des Strahlkanals. Der Bereich zwischen beiden Folien wird zur Kühlung der Folien von Helium durchströmt.



Figure 11: Darstellung eines Gas- (links), Flüssigkeit- (rechts) und Feststofftargetts (unten) des TR-FLEX

In Abbildung 11 sind beispielhaft 3 unterschiedliche Targets des TR-FLEX dargestellt. Der prinzipielle Aufbau der Targets ist für Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase ähnlich. Das Feststofftarget besitzt keine Targetfolie, da der Feststoff nicht vom Helium getrennt werden muss.

3 Strahlenschutz

Das TR-FLEX befindet sich in einem Zyklotronbunker mit 2700 mm starken Betonwänden. Im Bunker ist während des Zyklotron-Betriebs Sperrbereich. Die ständige Überwachung der

Ortsdosisleistung (ODL) im Zyklotronbunker Raum 015 und Technikraum 013 ist eingebunden in das stationäre ODL-Messsystem in ausgewählten Räumen der Ebene 00. Die Anzeige der Messwerte und die Warnung von Personen bei Überschreitung vorgegebener Schwellwerte erfolgen durch eine zur Messstelle gehörende örtliche Anzeige-/Warneinheit (Signalblock) innen neben der Tür des Technikraum 013 und auf einer Zweitanzeige (PC) in der Schaltwarte Raum 016. Bei der Überschreitung der Schwelle von $10 \mu\text{Sv/h}$ wird mit einem roten Blinklicht gewarnt, bei dem Überschreiten der Marke von $100 \mu\text{Sv/h}$ an der Messstelle wird mit dem roten Blinklicht und einem akustischen Signal in Form eines Huptons gewarnt. Die örtliche Anordnung der Detektoren und der Signalblöcke ist in der Abbildung 12 ersichtlich.

Stationäre und tragbare Kontaminationsmessgeräte im Umfeld des Arbeitsbereiches Zyklotron sind in der Zeichnung dargestellt. Ein Hand-Fuß-Kleider-Monitor (HFK-Monitor) sowie ein tragbares Kontaminationsmessgerät sind vor dem Technikraum 013 platziert. Ein tragbares Messgerät kann nach Entnahme aus der Wandhalterung netzunabhängig betrieben werden. In regelmäßigen Abständen und nach Reparaturen am Zyklotron sind Oberflächenkontaminations-Messungen (OFK-Messungen) durch das Zyklotronpersonal in den Zyklotronräumen durchzuführen und die Ergebnisse zu protokollieren. Bei Kontaminationsverdacht sind die Messungen sofort durchzuführen.

Die Auslegungsleistung der Raumlufttechnischen (RLT) Anlagen gewährleistet ein Erreichen des 8-fachen Luftwechsels in allen Räumen des Kontrollbereich (KB) ZRT innerhalb von 15 Minuten. Alle Lüftungstechnischen Verbraucher im Arbeitsbereich Zyklotron werden durch die RLT-Anlage 1 versorgt. Die Ausrüstungen der Abluftanlagen befinden sich im Überwachungsbereich in Ebene 02. Die gefilterte Fortluft wird über einen auf dem Dach des Gebäudes 805 errichteten Kamin in die Atmosphäre abgegeben. Die radiologische Fortluftüberwachung erfolgt im Bypass-Verfahren in einem Fortluftüberwachungscontainer auf Ebene 03.

Die ODL der Abluft aus dem Zyklotronbunker Raum 015 wird durch eine ODL-Sonde, die an der aus dem Zyklotronbunker Raum 015 kommenden Abluftleitung im Technikraum 013 angeordnet ist, überwacht. Die Messwertanzeige erfolgt am Signalblock neben der Tür zum Technikraum 013, der in das stationäre ODL-Messsystem integriert ist.

Die über die Kanalisation für kontaminationsverdächtige Abwässer aus dem AB Zyklotron abfließenden Abwässer werden in Behältern der Abwasserauffanganlage im gesammelt. Einleitstellen sind das Waschbecken in der Nische im Flur F003 vor dem Technikraum 013 und die Bodeneinläufe Zyklotronbunker Raum 015 und Technikraum 013 sowie die Tauchpumpe unter dem Zyklotron.

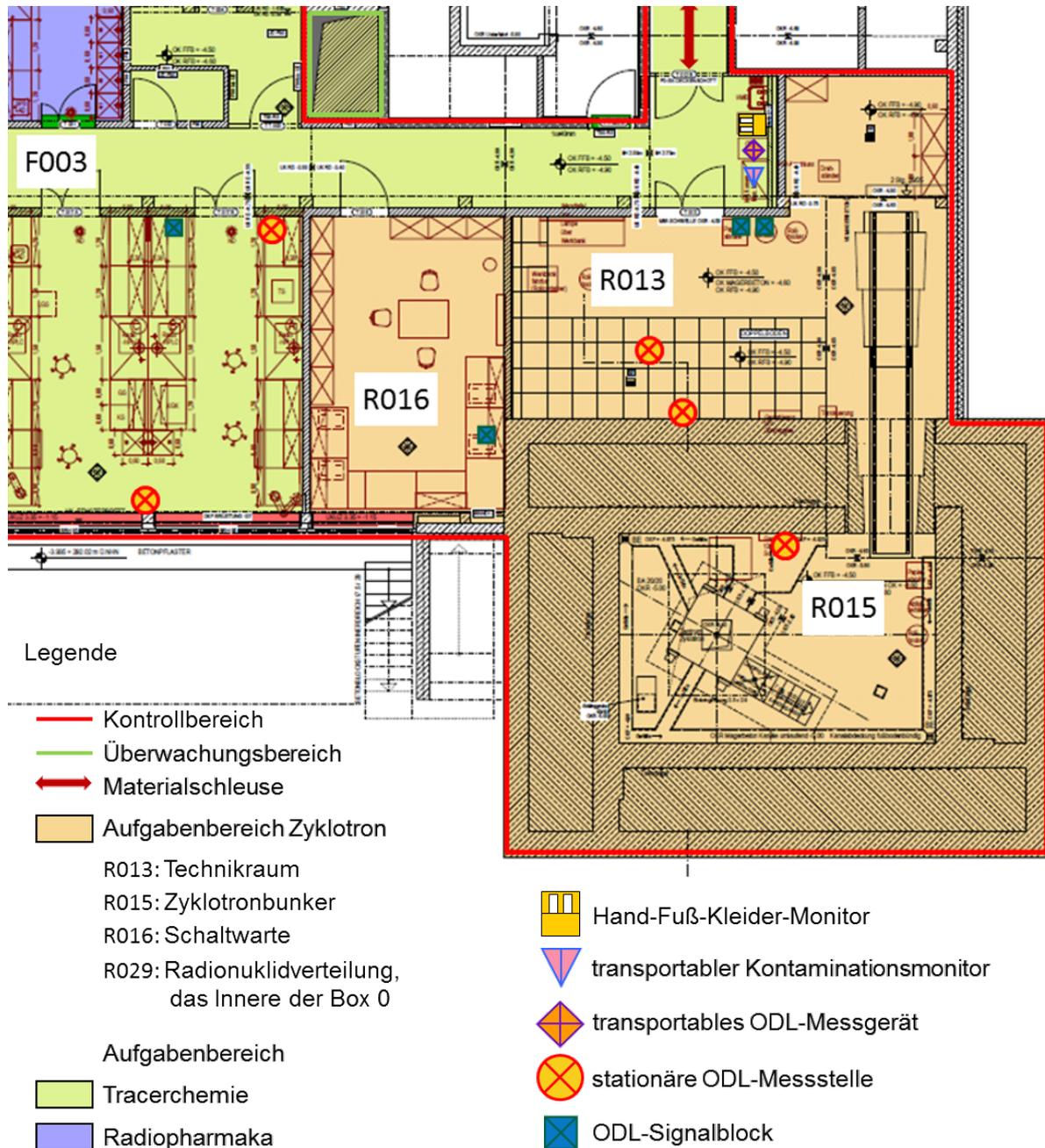


Figure 12: Übersicht der Strahlenschutzeinrichtungen des TR-FLEX

Praktikumsaufgabe

Herstellung von ^{11}C am Zyklotron TR-FLEX.

Mittels der Kernreaktion $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ wird in einem $[^{11}\text{C}]\text{CO}_2$ -Target das Isotop ^{11}C mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 20$ min erzeugt. Die Bestrahlung findet mit folgenden Parametern statt:

- Bestrahlungszeit: $t_{\text{irr}} = 15$ min
- Targetstrom: $I_{\text{T}} = 30 \mu\text{A}$

Die Sättigungsaktivität des Targets beträgt $A_{\text{sat}} = 5.5 \text{ GBq}/\mu\text{A}$.

Aufgaben

1. Welche Aktivität A_{EOB} ist mit den Vorgaben für EOB⁸ zu erwarten?
2. Die ^{11}C Synthese beginnt 4 Minuten nach EOB.
Wie groß ist die Ausgangsaktivität zum Zeitpunkt BOS⁹?
3. Wie groß ist der prozentuale Aktivitätsverlust?
4. Vergleichen Sie den unter 3. bestimmten Wert mit dem Aktivitätsverlust unter gleichen Bedingungen für das Radionuklid ^{18}F (Halbwertszeit $t_{1/2} = 110$ min).
5. Welche Schlussfolgerungen ergeben sich aus 3. und 4.?

⁸EOB = End of Bombardment

⁹BOS = Begin of Synthesis