



Zyklotron – Medizinische Anwendung und Umwelt

Frode Willoch, MD PhD; NMS Representative in radiology and nuclear medicine

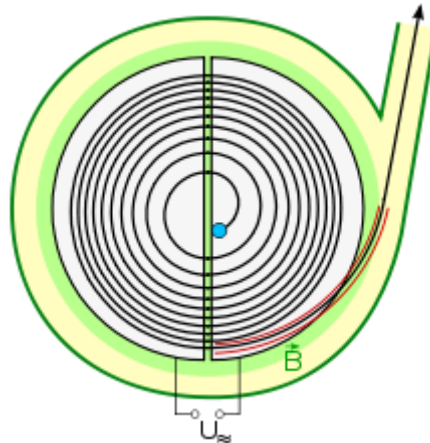
Hintergrund

In der Nuklearmedizin werden Spürsubstanzen seit Jahrzehnten diagnostisch und therapeutisch eingesetzt. Die Spürsubstanzen sind entweder radioaktive Teilchen (Radionuklide) die direkt für die Therapie/Diagnostik verwendet werden, z.B. radioaktives Jod für die Funktionsdarstellung und Therapie der Schilddrüse, oder Arzneimittel, die mit Radionukliden markiert sind (Radiopharmaka), z.B. Arzneimittel mit ^{99m}Tc für Szintigraphie/SPECT und mit ^{18}F -Fluorid für PET, um Infektionen, Demenz, Herzkrankheiten und Krebs zu diagnostizieren.

Im letzten Jahrzehnt hat eine Renaissance im Bereich der Behandlung von Krebs mit Radiopharmaka stattgefunden und die Entwicklung schreitet rasant fort. Die Radionuklide müssen bestimmte Eigenschaften besitzen damit sie für die medizinischen Zwecke nützlich sind, z.B. die Radionuklide dürfen nur kurzlebig sein damit sie im Körper und nach dem Ausscheiden schnell zerfallen und eine unbedenkliche Strahlenbelastung der Umwelt darstellen (die Lebensdauer der Radionuklide ist meistens von Minuten bis Stunden und bei wenigen Radionukliden bis zu wenigen Tagen). Die angewandten Radionuklide wie ^{99m}Tc und ^{18}F kommen nicht in natürlichen Mengen vor und müssen hergestellt werden. Einige Radionuklide können mittels eines sogenannten Zyklotrons produziert werden. In Deutschland gibt es 26 Zyklotronanlagen¹, die diese Radionuklide herstellen, die meisten befinden sich in Universitätskliniken.

Diese „Krankenhaus-Zyklotrone“ sind jedoch nicht technologisch ausgerüstet, um alle Radionuklide herzustellen, und viele Radionuklide (ca 80 %) werden deswegen in Atomkraftwerken (AKW) produziert. Die Schließung und Veralterung der AKWs hat zu mehreren Lieferengpässen und sogar fehlender Lieferung von medizinisch wichtigen Radionukliden in den letzten Jahren geführt. Zusätzlich steigt der Bedarf rasant durch neue bahnbrechende Krebsbehandlungen mit radioaktiv markierten Teilchen an (Theranostik). Die Herstellung kann von AKW auf technologisch leistungsstarke Zyklotrone und von uns patentierten Herstellungsmethoden umgelagert werden.

Ein Zyklotron ist ein ringförmiger Teilchenbeschleuniger. Mit Magnetfeldern bringt das Zyklotron Wasserstoffkerne (Protonen) auf einer spiralförmigen Bahn auf eine hohe Geschwindigkeit und lässt sie auf andere Teilchen prallen. Die Protonen entstehen aus einer Ionenquelle. Die Zielscheibe für den Protonenaufprall nennt man Target und kann aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Dabei entstehen die Radionuklide, die aus der Probe abgetrennt und für die Herstellung von Radiopharmaka verwendet werden. Das Zyklotron wird zur Abschirmung der Strahlung in einen Bunker eingebaut. Die radioaktiven Nuklide werden nur produziert, wenn das Zyklotron betrieben wird. In dem Moment wo das Zyklotron ausgeschaltet ist, entstehen keine Kernprozesse und man kann nach einer Ruhezeit den Bunker betreten.



Skizze der spiralförmigen Bahn der beschleunigten Protonen.

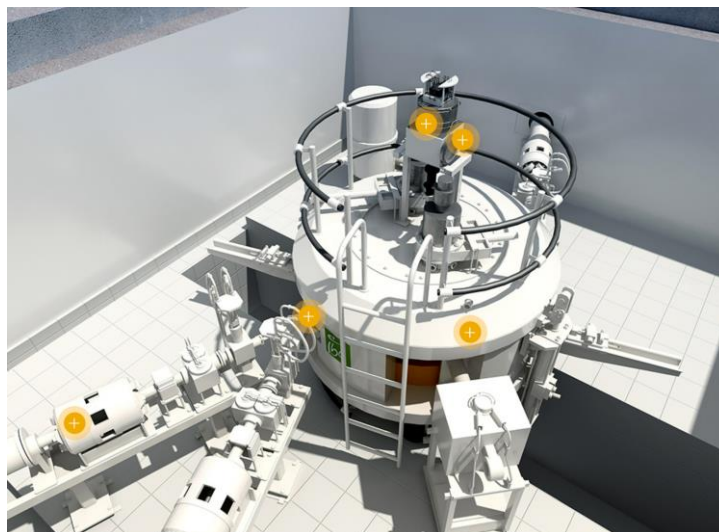
Strahlenschutz und Umwelt

Neben der offensichtlich, medizinisch nützlichen Anwendungen entstehen strahlenschutztechnische Komponenten, die berücksichtigt werden. Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) ist die verantwortliche Behörde und genehmigt und überwacht mit den weltweit höchsten Auflagen, den Umgang mit radioaktiven Stoffen und den Betrieb von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung nach dem Strahlenschutzgesetz² und der Strahlenschutzverordnung³ im medizinischen Bereich sowie in Industrie, Gewerbe und Forschung ([Strahlung - Startseite - LfU Bayern](#)).

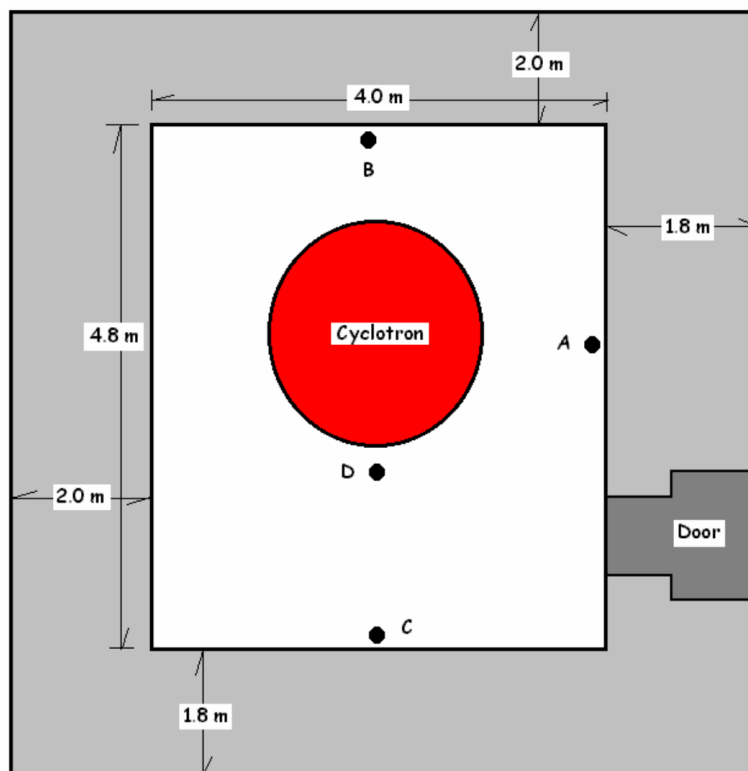
Wo kann es zu einer Kontamination und einer unerwünschten Strahlung kommen?

- Die im Zyklotron beschleunigten Protonen dringen nur wenige Millimeter in jede Masse ein und müssen deswegen in einer Vakuumkammer auf das Target gerichtet werden und tragen damit nicht direkt zu einer Strahlenbelastung außerhalb des Zyklotrons bei. Die Luft im Zyklotron wird verpresst (in Druckflaschen abgefüllt) und erst nach einer Strahlenschutzuntersuchung an die Umluft abgegeben. Ein unkontrolliertes Entweichen ist ausgeschlossen.
- Neutronenstrahlungen entstehen durch die Interaktion der Protonen mit dem Zyklotron. Weiterhin entstehen Photonen im Zielbereich (Target). Diese Strahlungsarten können außerhalb des Targets entstehen und werden bei den eingerichteten Abschirmungen berücksichtigt (DIN-6871 Teil 1 und 2). Ohne Sicherstellung der vollständigen Abschirmung wird keine Betriebserlaubnis erteilt.
- Die Photonen werden effektiv durch die Abschirmung des Zyklotrons und durch den Bunker abgebremst.

- Durch Neutronenreaktionen können im Metall des Zyklotrons neue Radionuklide entstehen⁴, die erst bei der Entsorgung des Zyklotrons eine Rolle spielen und nach kurzer Zeit abgeklungen sind.
- Die Neutronen außerhalb des mechanischen Aufbaus des Zyklotrons werden effektiv durch den Beton abgebremst. Eine kleine Fraktion niedrigerenergetische Neutronen können in den Bunkerraum zurückreflektiert werden. Hier können Neutronen einen Anteil des in der Raumluft befindlichen Argons (⁴⁰Ar), 0,46% des Raumluftvolumens, zu dem radioaktiv kurzlebigen Edelgas ⁴¹Ar (Beta-Strahler, Halbwertszeit 1.8 Stunden) transmutiert werden. In einer Studie der australischen Strahlenschutzbehörde⁵ zeigten sich in einem experimentellen Setting geringste Mengen an ⁴¹Ar in der Bunkerluft. Die Konzentration war weit niedriger (1/12) als der unterste messbare Schwellenwert des Nobelgasmonitors. Eine neuere Studie hat fehlende radiologische Relevanz der kontaminierten ⁴¹Ar bestätigt⁶.
- Die Einhaltung der internationalen IAEA-Richtlinien hält die Strahlenbelastung des gesamten Produktionsprozesses in der Umgebung ununterscheidbar von der natürlichen Strahlenbelastung⁷.
- Über eine längere Betriebszeit kann eine Aktivierung der Innenseite des Zyklotronbunkers entstehen. Die Aktivierung nimmt ab einer Tiefe von 30 cm signifikant ab und erreicht den Nulldurchgang bei einer Tiefe von 40 cm. Bei einer durchschnittlichen Wandstärke größer 1,5 m tritt keine Strahlung nach außen. Vorhandene Aktivierungen sind nach mehreren Abklingzeiten nicht mehr nachweisbar.
- Die Abschirmungen und der Zyklotronbunker müssen in allen Bereichen die Anforderungen an den Strahlenschutz² erfüllen.
- Aus Sicherheitsgründen werden Volumenstromregler vorgesehen und der erforderliche Raumdruck einreguliert. Somit entweichen nicht geringsten Mengen an evtl. Argongas in angrenzenden Räumen.
- Die Strahlenschutzbereiche werden dem tatsächlichen Betrieb des Zyklotrons angepasst und im Vorfeld mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt abgestimmt.
- Im Außenbereich wird die für die Umwelt notwendige Jahresgrenzwert angewandt.
- Der Zyklotronbunker lässt keine Aktivierung des Grund- oder Schichtwassers zu.



Darstellung eines Zyklotrons.



Skizze eines Zyklotronbunkers.

Referenzen

1. IAEA, 2019. Cyclotrons used for radionuclide production. <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/Cyclotron.aspx> accessed 01 January 2020.
2. Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 15) geändert worden ist.
3. Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2023, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4645) geändert worden ist.
4. Toyoda et al 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1046 012017
5. Radiation Protection in Australia (1994), Vol. 12, No. 4.
6. Modern Physics Letters A Vol. 32, No. 17, 1740014 (2017).
7. [IAEA Guidelines and formatting rules for papers for proceeding \(irpa.net\)](#)