

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-265

Juli 1999

ISSN 1437-322X

Archiv-Ex.:

Hans-Wolf Thümmel, Rudolf Brückner, Hartmut Guratzsch

Technologie zur Aktivierung gepreßter Targetmaterialien mit dem Protonenstrahl (12 MeV, 10 μ A) des Zyklotrons U-120



Herausgeber:
FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon +49 351 26 00
Telefax +49 351 2 69 04 61
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

Hans-Wolf Thümmel^{)}, Rudolf Brückner^{*)}, Hartmut Guratzsch^{*)}*

**Technologie zur Aktivierung gepreßter
Targetmaterialien mit dem Protonenstrahl
(12 MeV, 10 μ A) des Zyklotrons U-120**

^{*)}Universität Leipzig, Klinik für Nuklearmedizin

^{*)}Forschungszentrum Rossendorf

Zusammenfassung

Es wird eine Technologie für die Aktivierung von gepreßten Pulver-Materialien (bis 500 mg) in einem Protonenstrom (10 μ A) beschrieben. Das Verfahren wurde für die Herstellung von ^{94m}Tc am Rossendorfer Zyklotron U-120 aus angereicherterem $^{94}\text{MoO}_3$ -Pulver optimiert.

Die Bestrahlung des gepreßten Targetmaterials erfolgt in einem evakuierten und drucküberwachten Targetträger mit dünnem Strahleintrittsfenster. Durch die gute Wärmekopplung des Preßlings mit dem wassergekühlten Targetträger und der heliumgekühlten Fensterfolie kann das Targetmaterial mit einer absorbierten Strahlleistung bis zu 40 W belastet werden. Bei einem Folienbruch verhindert der geschlossene Heliumkreislauf das Entweichen von radioaktivem Material. Zur Reduktion der Energieabsorption im Target wird die Dicke des Targetmaterials der Wirkungsquerschnittsverteilung angepaßt. Nach der Entnahme des Targetträgers aus der Bestrahlungsanlage verbleibt das Targetmaterial bis zur Aufarbeitung in einem radiochemischen Labor in dem geschlossenen Targetträger.

Abstract

The technology described has been developed for safe activation of pressed powder materials (up to 500 mg) in a proton beam (10 μ A). The procedure has been optimized for the production of ^{94m}Tc with the Rossendorf U-120 cyclotron using enriched $^{94}\text{MoO}_3$.

The target material is irradiated inside an evacuated and pressure controlled targetholder equipped with a thin entrance window for the proton beam. The target withstands an absorbed beam power of about 40 W as the result of a good heat coupling between the target material and the water-cooled target holder as well as the helium-cooled entrance window. In the case of a window break the closed helium circuit prevents the escape of radioactivity. To diminish the energy absorption in the target the thickness is adapted to the distribution of the cross section. After taking the target holder out of the irradiation equipment, the target remains closed in the target holder until its processing in a radiochemical laboratory.

Inhalt

1. Einleitung
2. Anforderungen an die Bestrahlungstechnologie und den Targetträger
3. Bestrahlungsanlage
4. Konstruktion und Montage des Targetträgers
5. Bestrahlungstechnologie, Betriebsregime der Bestrahlungsanlage
6. Erprobung der Bestrahlungstechnologie
7. Herstellung von ^{94m}Tc

Literatur

1. Einleitung

Für verschiedene nuklearmedizinische Untersuchungen ist ein Vergleich der Single-Photon-Emission-Computer-Tomografie (SPECT) mit der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) bei gleicher pharmakokinetischer Verteilung des verabreichten Radiopharmakons im Körper des Patienten von Interesse [1,2, 3]. Dazu werden zwei mit unterschiedlichen Radioisotopen eines Elementes markierte Modifikationen des gleichen Radiopharmakons eingesetzt. Ein typisches Beispiel für ein Isotopenpaar mit dem SPECT-analoge PET-Untersuchungen durchgeführt werden können, ist der Positronenstrahler ^{94m}Tc und sein SPECT-Analogon ^{99m}Tc [4,5].

Das Nuklid ^{94m}Tc [$T_{1/2} = 53$ min] kann mit hoher Ausbeute über eine (p,n)-Reaktion beim Beschuß von angereichertem $^{94}\text{MoO}_3$ mit Protonen erzeugt [4] und als $^{94m}\text{TcO}_4^-$ mittels einer thermochromatografischen Methode (in < 30 min) abgetrennt werden [5]. Das verbleibende $^{94}\text{MoO}_3$ ist ohne chemische Aufarbeitung erneut einsetzbar. Rösch [5] arbeitete an einem Zyklotron mit einer Protonenenergie von 18 MeV, so daß die Protonen zur Vermeidung von (p,2n)-Reaktionen unter die Reaktionsschwelle von 15 MeV abgebremst werden mußten. In [5] konnte daher der $^{94}\text{MoO}_3$ -Preßling (200 mg) in einer allseitig wassergekühlten Kapsel bestrahlt werden, die mit einem sehr stabilen Aluminiumfenster (0,3 mm) verklebt war.

In Vorbereitung auf einen Einsatz an der Klinik für Nuklearmedizin in Leipzig wurde dieses Verfahren für die Nutzung des Rossendorfer Zyklotrons modifiziert. Wegen der relativ geringen Protonenenergie, $E_p = 12$ MeV, sollte durch die Verwendung eines möglichst dünnen Strahlfensters eine unnötige Abbremsung der Protonen vor dem Auftreffen auf die Targetsubstanz vermieden werden. Die Bestrahlungstechnologie mußte aber so sicher funktionieren, daß auch bei einem Folienbruch am Targetträger keine radioaktive Substanz in den Beschleuniger oder in die Umgebung gelangen durfte.

2. Anforderungen an die Bestrahlungstechnologie und den Targetträger

Unter Berücksichtigung der konstruktiven Gegebenheiten am Bestrahlungskanal 2 des Rossendorfer Zyklotrons mußte die Bestrahlungstechnologie und insbesondere der Targetträger folgenden Anforderungen genügen:

- (1) geringe Abbremsung der Protonen vor dem Eintritt in das Target (Preßling)
- (2) geringer Wärmeeintrag in den Preßling
- (3) gute Wärmekopplung des Preßlings zur wassergekühlten Rückwand des Targetträgers
- (4) Auffangen bzw. Abführen von Gasausbrüchen aus dem Targetmaterial (Preßling), z.B. infolge von Restfeuchte und Lufteinschluß
- (5) Dichtheit des (beladenen) Targetträgers gegen Radioaktivitätsaustritt bzw. Substanzverlust während und nach der Bestrahlung
- (6) Überwachung der Dichtheit der Targetträger-Fensterfolie
- (7) einfaches Abkoppeln des Targetträgers nach der Bestrahlung
- (8) leichte Entnahme des hochaktiven Preßlings aus dem Targetträger
- (9) Wiederverwendbarkeit des Targetträgers.

3. Bestrahlungsanlage

Die am Zyklotron U-120 installierte Bestrahlungsanlage zeigt Abb. 1. Vor dem Strahlaustrittsfenster (2) des Zyklotron-Strahlrohres ($40\ \mu\text{m CrNiFe}$) befindet sich eine Blende, die den Strahldurchmesser auf 12 mm begrenzt. Im Zwischenraum zwischen diesem Fenster und dem Strahleintrittsfenster im Targetträger (3) fließt Helium (0,5 bar), um die beiden Fensterfolien zu kühlen. Der He-Kühlkreislauf (6c, 6e 10, 11, 12) mit der He-Einspeisung (6a, 6b, 7a, 8a, 8b) und der Evakuierungsstrecke (5b, 6g, 9) ist ebenfalls dargestellt. Zur Aktivierung wird der Targetträger (3), der den Preßling enthält, in den Führungsschlitz (Breite = 30,5 mm, Weite = 6 mm, Länge = 62 mm) der Bestrahlungsanlage eingeführt und zwischen zwei O-Ringen ($\varnothing 16\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$) gedichtet. Der Preßdruck wird an der strahlabgewandten Seite durch den Kühlwasserblock (4) ausgeübt. Der Kühlwasserfluß beträgt ca. 1 l/min.

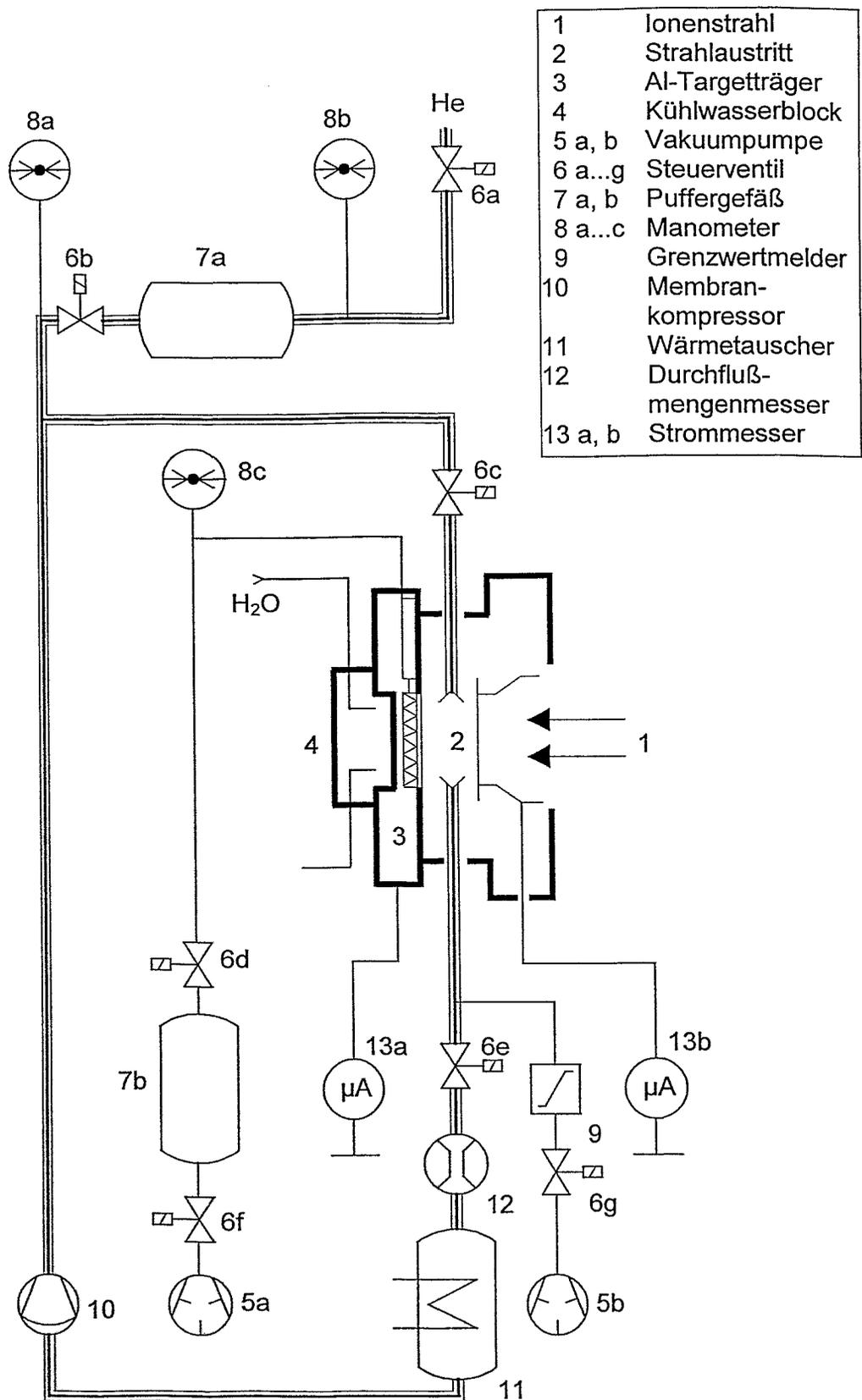


Abb.1: Schematische Darstellung der Bestrahlungsanlage

4. Konstruktion und Montage des Targetträgers

Der Targetträger (Abb. 2) besteht aus dem Grundkörper, dem Distanzblech und der Fensterfolie, die mit doppelseitigem Klebeband (Dicke ca. 50 μm) dicht aneinander geklebt werden.

Der Grundkörper (Länge 62 mm, Breite 30 mm, Dicke 5 mm) wird aus Aluminium-Walzmaterial gefertigt. An der Rückseite ist er mit einer Justierführung (\varnothing 20,5 mm, Tiefe 3 mm) für die Ankopplung des Kühlwasserblocks versehen. Strahlseitig enthält der Grundkörper eine Ausdrehung (\varnothing 20 mm, Tiefe 3 mm), die nach Aufkleben des Fensterträger-Distanzblechs zu einem Druckausgleichsvolumen von ca. 2 cm^3 führt. Durch die Einfräsung (1 mm x 2 mm) besteht eine Verbindung zum Targetraum. Die an der Schmalseite des Grundkörpers angebrachte Quetschdichtung (zwei hintereinander liegende Gaschromatografie-Gummidichtungen, \varnothing 3 mm) erlaubt das Einstecken einer Injektionskanüle (\varnothing 0,3 mm), um mit einem Schlauch die Verbindung zwischen dem Druckausgleichsvolumen und einem vorher evakuierten Puffergefäß (0,2 mbar; 10 l) herstellen zu können.

Das Fensterträger-Distanzblech (Länge 62 mm, Breite 30 mm) besitzt eine zur Strahlachse zentrierte Bohrung (\varnothing 14 mm) für die Aufnahme des Target-Preßlings. (Die Dicke des Distanzbleches ist der Dicke des Preßlings anzupassen; im vorliegenden Fall hat das Distanzblech eine Dicke von 0,4 mm.) Das Distanzblech wird auf den Grundkörper aufgeklebt. Dazu wird vorher das Klebeband ganzflächig auf das Distanzblech geklebt und im Bereich der Bohrung (\varnothing 14 mm) - mit dem Rand der Bohrung als Schablone - herausgeschnitten. (Es dürfen nach dem Aufkleben keine Klebebandreste in den Targetraum hineinragen, an denen der Preßling haften könnte, weil dann die Entnahme des Preßlings nach der Bestrahlung beeinträchtigt wäre.) Nach dem Aufkleben des Distanzbleches auf den Grundkörper wird strahlseitig ein ca. 20 mm breiter Streifen Klebeband auf das Distanzblech geklebt und die Fensteröffnung wieder freigeschnitten. Seitlich wird die Klebefläche durch Abdecken mit Al-Folie eingeengt, so daß ein ca. 3 mm breiter Bereich um die Fensteröffnung herum zum Aufkleben der Fensterfolie frei bleibt. Nach Einsetzen des Target-Preßlings wird der Targetraum mit der Fensterfolie (Flächenmaße etwa wie das

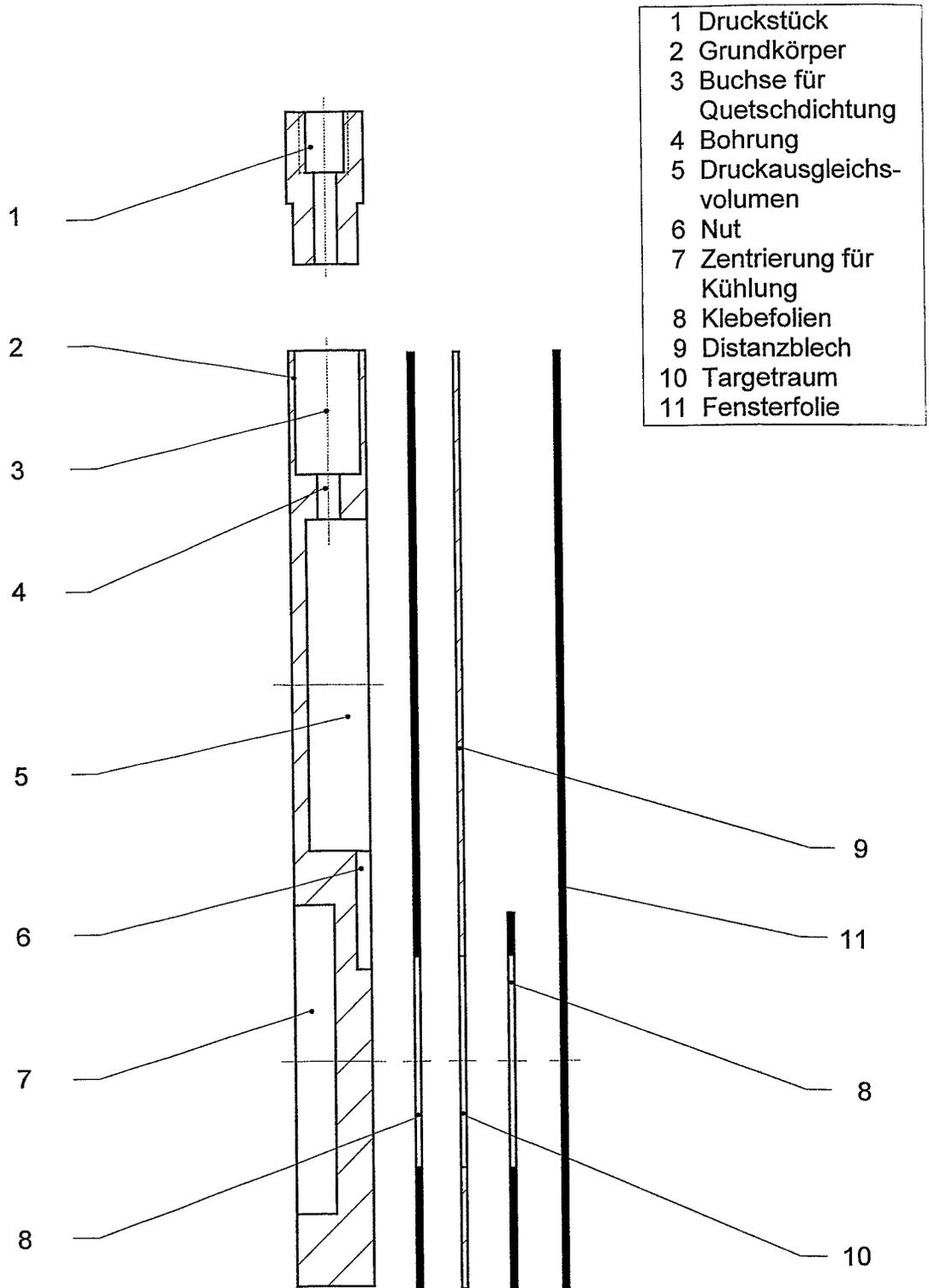


Abb.2: Schematische Darstellung des Targetträgers

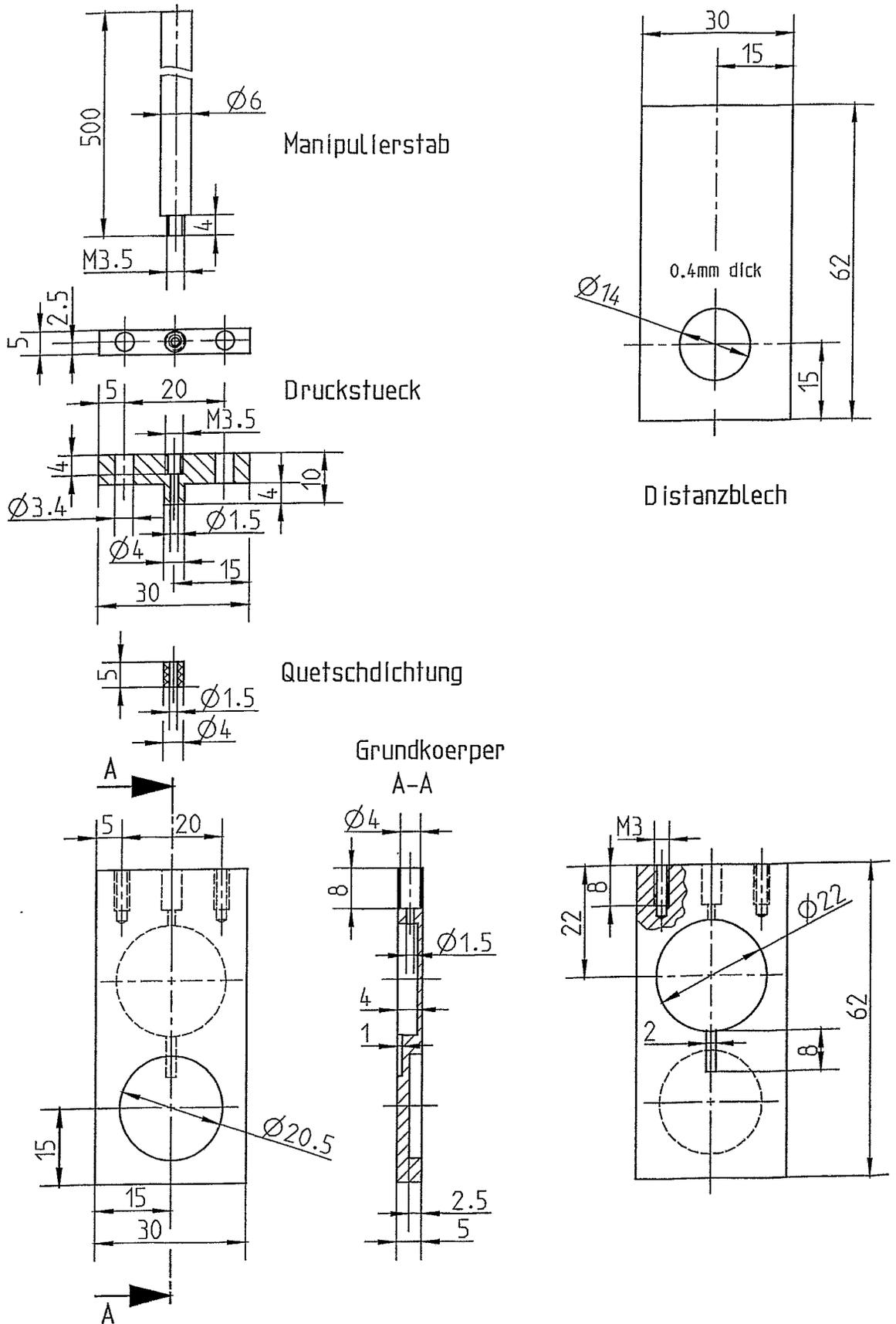


Abb.3: Einzelteile des Targetträgers (Maßzeichnungen)

Distanzblech) verschlossen. Die Fensterfolie klebt nur um die Fensteröffnung herum und kann nach der Bestrahlung am freien Ende leicht mit einer Pinzette gefaßt und zur Entnahme des bestrahlten Preßlings im Ganzen abgezogen werden.

Das Foto eines noch nicht mit der Fensterfolie versehenen Targetträgers, jedoch mit eingestochener Injektionskanüle, zeigt Abb. 4. Oben im kreisförmigen Targetraum ist die kleine Öffnung, die zum Druckausgleichsvolumen (2 cm^3) führt, zu erkennen.

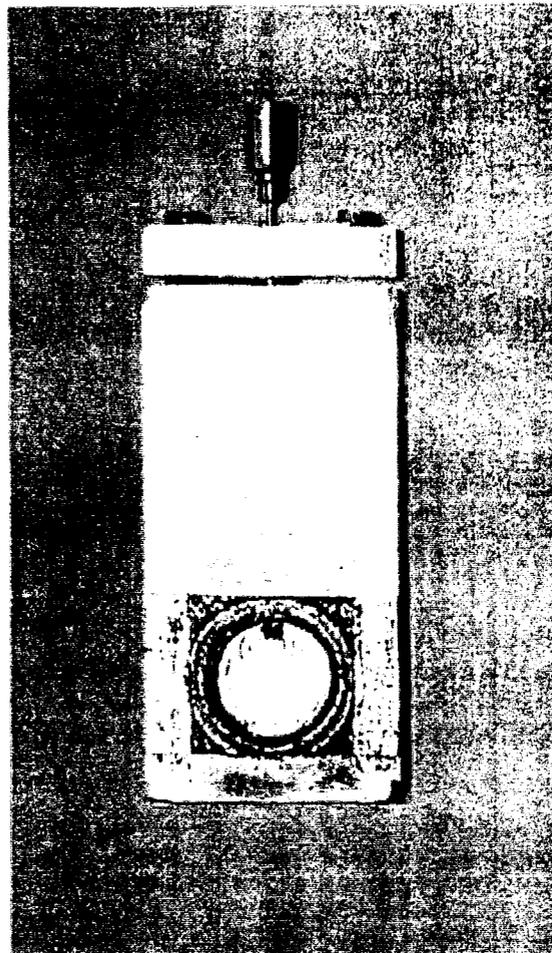


Abb. 4: Foto des montierten Targetträgers ohne Fensterfolie

5. Bestrahlungstechnologie, Betriebsregime der Bestrahlungsanlage

Der Targetträger und die Bestrahlungstechnologie erfüllen die unter 2. vorgestellten Anforderungen an die Bestrahlungsanlage:

- (1) Die geringe Abbremsung der Protonen wird durch die Verwendung dünner Strahl-eintrittsfenster aus Aluminium von 30 μm bis 40 μm Dicke gewährleistet, so daß der Energieverlust der Protonen unter 0,35 MeV liegt.
- (2) Der Energieeintrag in den Preßling wird reduziert, indem die Flächenmasse des Preßlings so eingestellt wird, daß Protonen unterhalb der Schwellenenergie wieder aus dem Preßling heraustreten und erst in der wassergekühlten Rückwand des Targetträgers absorbiert werden. Im Falle der $^{94}\text{Mo}(p,n)^{94\text{m}}\text{Tc}$ -Reaktion beträgt die Schwellenenergie 7 MeV. Bei einer verfügbaren Protonenenergie am Preßling von 11,2 MeV und einer Austrittsenergie von 7,2 MeV beträgt der Energieverlust der Protonen im Preßling 4 MeV und bei einem Strahlstrom von 10 μA die absorbierte Strahlleistung 40 W. Die Flächenmasse des MoO_3 -Preßlings wurde mit 120 mg/cm^2 festgelegt, was einer Restenergie der Protonen von ca. 7 MeV entspricht.
- (3) Der gute Wärmekontakt des Preßlings mit dem wassergekühlten Boden des Targetträgers (Dicke 2 mm) wurde während der Bestrahlung durch Anpressen des Preßlings an den (mit der hohen Oberflächengüte des Al-Walzmaterials versehenen) Targetträger gewährleistet. Den erforderlichen Preßdruck erzeugt das He-Kühlgas über die nur 40 μm dicke Al-Fensterfolie.
- (4) Das Abführen von Gasen und Dämpfen, die aus dem sich während der Bestrahlung erheizenden Preßling entweichen, wird erreicht, indem der Innenraum des verschlossenen (beladenen) Targetträgers bereits vor der Bestrahlung durch die 0,3 mm dicke Kanüle evakuiert wird und durch die auch während der Bestrahlung das Vakuum durch die Verbindung mit dem Puffergefäß aufrecht erhalten bleibt.
- (5) Die Sicherheit gegen Radioaktivitätsaustritt und Substanzverlust ist dadurch gegeben, daß innerhalb eines abgeschlossenen Volumens aktiviert wird. Noch vor Beginn der Bestrahlung wird von der Vakuumpumpe (Abb. 1, Teil 5a) auf das Vakuum-Puffergefäß mit Inertfilter (Abb. 1, Teil 7b) umgeschaltet.

- (6) Die Dichtheit der Fensterfolien wird während der Bestrahlung - auch zur Vermeidung von He-Verlusten - durch die Kontrolle des Druckes an den Manometern 8a und 8c überwacht.
- (7) Nach der Bestrahlung wird der Targetträger vom Vakuumsystem durch das Herausziehen der 0,3-mm-Injektionskanüle aus der Quetschdichtung getrennt. Die Dichtheit, insbesondere gegen Radioaktivitätsaustritt, bleibt bestehen. (Dickere Kanülen könnten zur Undichte führen.)
Zur Entnahme des Targetträgers aus dem Targethalter der Bestrahlungsanlage wird ein Manipulierstab (Länge 50 cm) in den Targetträger eingeschraubt (s. Abb. 1, Teil 4). Mit diesem wird der Targetträger nach Lösen des Kühlwasserblocks herausgezogen und im Transportkontainer abgelegt.
- (8) Die leichte Entnehmbarkeit des hochaktiven Preßlings aus dem Targetträger wird erreicht, indem das 40 µm dicke Al-Fenster nur in einer Ringbreite von ca. 3 mm angeklebt ist. Nach der Bestrahlung läßt sich (**nur im Abzug eines radiochemischen Labors!**) die Al-Folie ohne zu zerreißen an dem freien Ende als Ganzes abziehen. Der bestrahlte Preßling wird durch Umstürzen des Targetträgers in die thermochromatografische Apparatur eingebracht.

6. Erprobung der Bestrahlungstechnologie

Die ersten Experimente zur Bestrahlungstechnologie betrafen die Stabilität des Strahlfensters und des Preßlings, die entscheidend von der Wärmeabfuhr und der Strahlhomogenität abhängen. Die Untersuchungen wurden aus Kosten- und Aktivitätsgründen zunächst mit Al₂O₃-Preßlingen, deren radioaktive Produkte sehr rasch abklingen, durchgeführt.

- (1) Die Strahlverteilung über dem Targetquerschnitt war vielfach ungleichmäßig, was an Verfärbungen einer Thermolackfarbe, die auf die Fensterfolie aufgetragen und mitbestrahlt wurde, sichtbar war. Durch Optimieren der Beschleunigereinstellungen können lokale Überhitzungen vermieden werden. Ohne Evakuierung des Targetinnenraumes zeigten auch die weißen Al₂O₃-Preßlinge lokale grau-schwärzliche Verfärbungen. Bei evakuiertem Targetinnenraum trat dieser Effekt nicht mehr auf.

- (2) Auswahl der Fensterfolie: Für die Dichtheit des Targetträgers erschien zunächst die Verwendung von mechanisch stabilem Fenstermaterial wünschenswert. Fenster aus 20 μm Ti und 20 μm Mo erwiesen sich jedoch als ungeeignet, weil die geringe Wärmeleitfähigkeit zum Schmelzen in Bereichen lokaler Überhitzung führte. Auch eine relativ dicke Al-Folie (70 μm bzw. 100 μm) neigte in solchen Punkten wegen der höheren Energieabsorption eher zum Durchbrennen als eine dünnere Al-Folie. Ein Kompromiß zwischen thermischer und mechanischer Stabilität stellte eine Al-Folie mit einer Dicke von etwa 30 μm bis 40 μm dar, die bis zu einem Strahlstrom von 10 μA nicht zerstört wurde. (Größere Ströme wurden nicht verwendet.)
- (3) Das Evakuieren des Targetträger-Innenraumes vor dem Auspumpen des Helium-Spülraumes hat sich bewährt. Es bietet folgende Vorteile:
- (a) Die Al-Targetfensterfolie wird von vornherein an den Preßling gesaugt; sie wölbt sich beim Evakuieren des He-Spülraumes nicht erst entgegen der Strahlrichtung aus, um sich nach Einströmen des He-Spülgases (0,5 bar) in umgekehrter Richtung an den Preßling anzulegen. Dadurch wird die vorher beobachtete Faltenbildung vermieden.
 - (b) Im Targetraum treten während der Bestrahlung trotz evtl. hoher Temperaturen keine Oxidationen ein.
 - (c) Der Preßling braucht nicht getrocknet zu werden. Unter der Bestrahlung freiwerdende Gasanteile aus dem Preßling, die bei hermetisch verschlossenem Targetträger zur Auswölbung der Fensterfolie (entgegen dem He-Spülgasdruck) führten, werden in das Vakuumpuffergefäß abgesaugt. Wird bei Bestrahlungsbeginn der Strahlstrom langsam bis zum Endwert erhöht, so ist der Verlauf des Gasaustritts (Druckanstieg im Druckausgleichsgefäß) aus dem gepreßten Targetmaterial gut erkennbar. Bei Bestrahlung von Al_2O_3 steigt der Druck kurz nach Bestrahlungsbeginn von anfangs 1 Torr auf 10 Torr an. - Ein weiterer Druckanstieg würde die Undichte der Fensterfolien mit Verlust von He aus dem Kühlkreislauf sowie die Gefahr eventuellen Radioaktivitätsaustritts signalisieren.
- (4) Die Wärmeabführung aus dem Preßling hängt vom Abstand zwischen gekühltem und zu kühlendem Körper ab. Nach [6] läßt sich die Kühlleistung berechnen. Mit 5 μm Abstand wird bei Vakuum im Innenraum des Targetträgers eine maximale Kühlleistung von ca. 5 W durch das He und ca. 50 W durch das Wasser aufge-

bracht. Solange keine lokalen Überhitzungen auftraten, erwies sich die Kühlung des Targetträgers bis 40 W der im Preßling absorbierten Strahlleistung als ausreichend. Oberflächengüte und Anpreßdruck des Preßlings genügen daher den Anforderungen für eine Nuklidproduktion.

7. Herstellung von ^{94m}Tc

Die beschriebene Bestrahlungstechnologie wurde zur Herstellung von ^{94m}Tc genutzt. Aus 150 mg $^{94}\text{MoO}_3$ (Anreicherung 93 %) wurde mit einer Preßkraft von ca. 10^4 N ein Preßling von 13 mm Durchmesser angefertigt und in den Targetträger eingesetzt. Die Bestrahlungsdauer betrug 3 min, der Protonenstrom 10 μA . Normiert auf das Bestrahlungsende wurde eine Aktivität von ca. 350 MBq erzeugt. Eine längere Bestrahlungszeit war nicht gewünscht worden, weil für eine höhere Aktivität die strahlenschutzmäßigen Voraussetzungen für den Transport nach Leipzig und die Verarbeitung im radiochemischen Labor zum Versuchstermin nicht gegeben waren [7]. Nach 1 h Strahlzeit hätte eine Aktivität von 5,5 GBq erzeugt werden können. Eine darüber hinaus gehende Bestrahlungszeit erscheint nicht sinnvoll, weil dann das Aktivitätsverhältnis des nuklearmedizinisch interessanten Isomers ^{94m}Tc [$T_{1/2} = 54$ min] zum unerwünschten, aber unvermeidlich miterzeugten, ^{94g}Tc [$T_{1/2} = 4,9$ h] ungünstiger würde. Bereits beim Übergang von 3 min zu 1 h Bestrahlungszeit wächst zum jeweiligen Bestrahlungsende der Aktivitätsanteil des ^{94g}Tc von ca. 6 % auf über 20 %. Durch Warte- und Bearbeitungszeiten verschlechtert sich dieses Aktivitätsverhältnis noch weiter, weil das kurzlebige ^{94m}Tc schneller als das ^{94g}Tc abklingt.

Thermochromatisch wurde das Tc innerhalb von 30 min vom MoO_3 getrennt. Hierbei erwies sich das in [5] beschriebene Verfahren als sehr gut handhabbar. In [7] sind die Ergebnisse zur thermochromatischen Trenngüte (>90%) ausführlich dargelegt. Das nach dem Trennprozeß wiedergewonnene MoO_3 ist infolge nicht ganz vollständiger Abtrennung der Tc-Isotope ^{94m}Tc [54 min], ^{94g}Tc [4,9 h], ^{95m}Tc [60 d], ^{96g}Tc [4,3 d] und ^{97m}Tc [91 d] noch schwach radioaktiv und kann erst nach einer angemessenen Abklingzeit wieder verpreßt werden [5, 7]. Die Wartezeit hängt davon ab, mit welcher Restaktivität ein Wiederverpressen (im radiochemischen Labor!) strahlenschutzmäßig beherrschbar ist. Unter Produktionsbedingungen (150 mg MoO_3 , 10 μA Strahlstrom, 1 h Bestrahlungszeit) würde die Restaktivität nach 10 Tagen noch ca. 10 kBq (vorwiegend

^{96g}Tc und ^{95m}Tc) und nach 100 Tagen ($\sim \frac{1}{4}$ Jahr) 3 kBq (^{95m}Tc) betragen, wenn nach der Trennung das rückgewonnene MoO_3 noch 1 % TcO_4^- enthielte.

Die vorgestellte Bestrahlungstechnologie sollte prinzipiell zur Produktion von Aktivitäten im Bereich einiger GBq durch Beschuß auch anderer gepreßter Targetmaterialien mit Protonen oder bei entsprechender Dimensionierung des Targets auch mit Deuteronen geeignet sein. Das benutzte thermochromatische Trennverfahren [5] ist jedoch nur anwendbar, wenn der Siedepunkt des Produktnuklids im Bereich weniger hundert Grad und deutlich unterhalb des Siedepunktes der Targetsubstanz liegt.

Literatur

- [1] Büll, U., Schicha H., Biersack H.-J., Knapp W.H., Reiners C., Schober O. (eds.) - Nuklearmedizin, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1994
- [2] Rösch, F., Preparation and evaluation of suitable radionuclide: current and future strategies. Symposium on Tumour Targeting with Radio Labelled Hormones and Antibodies. Nuremberg (Germ.), Dec. 9-10, 1994.
- [3] Herzog H., Rösch F., Stöcklin G., et al., Measurement of pharmacokinetics of ^{86}Y radiopharmaceuticals with PET and radiation dose calculation of analogous ^{90}Y radiotherapeutics. J. Nucl. Med. 34: 2222 (1993)
- [4] Rösch, F., S.M. Qaim, Nuclear data relevant to the production of positron emitting radioisotope Technetium isotope $^{94\text{m}}\text{Tc}$ via $^{94}\text{Mo}(p,n)$ -reaction, Radiochim Acta 62 (1993) 115-121
- [5] Rösch, F., Novgorod A.F., Qaim S.M., Thermochromatic separation of $^{94\text{m}}\text{Tc}$ from enriched Molybdenium targets and its large scale production from nuclear medical application, Radiochim. Acta 64: 113 (1994).
- [6] Jahn, G., Probleme der Wärmeübertragung bei Bestrahlung von Festkörpern, HMI-B 349, März 1981 (Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung, Berlin)
- [7] Thümmel, H.-W., I. Kämpfer, G. Krummeich, Herstellung von $^{94\text{m}}\text{TcO}_4^-$ für die nuklearmedizinische PET-Diagnostik durch Beschuß von $^{94}\text{MoO}_3$ mit 12,4 MeV-Protonen am Zyklotron U-120 des Forschungszentrums Rossendorf und anschließender thermochromatografischer Abtrennung in Leipzig, Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universität Leipzig, März 1998 (unveröffentlicht)