

Verflechtung von Wissenschaft und Produktion im Zentralinstitut für Kern- forschung Rossendorf (1958-1991)

Prof. Dr. Siegfried Niese, Am Silberblick 9, 01723 Wilsdruff
<siegfried@niese-mohorn.de>

Bei der Produktion in einer Forschungseinrichtung gibt die unmittelbare Nähe von Forschern und Produzenten die Möglichkeit eines lang- und kurzfristigen Personal- und Erfahrungsaustausches mit günstigen Bedingungen für die Weiterbildung. Das ist wichtig, weil die Wissenschaft das entscheidende Mittel für das Wirtschaftswachstum ist, das in der Industriegesellschaft nicht mehr durch die Quantität sondern durch die Qualität der Produkte bestimmt wird.¹ Die Herstellung radioaktiver Präparate im Zentralinstitut für Kernforschung (ZfK) Rossendorf bei Dresden ist ein Beispiel für das Zusammenwirken von interdisziplinärer Forschung und Produktion. Dabei wurde ein wichtiger Beitrag für die Entwicklung der von Georg von Hevesy begründeten Nuklearmedizin in Deutschland geleistet. Ausführlich wird die Herstellung von ^{99}Mo beschrieben, weil das daraus gebildete $^{99\text{m}}\text{Tc}$ bei ca. 90% aller nuklearmedizinischen Untersuchungen eingesetzt wird, und weil dabei in den letzten Jahren immer wieder Engpässe in der Versorgung auftraten. Im Beitrag wird einleitend auch auf die ein halbes Jahrhundert vorher begonnene Herstellung von Radium eingegangen, weil sich daraus interessante Parallelen ergeben.

Die Herstellung radioaktiver Präparate bis 1958

Nach der Entdeckung der Radioaktivität und des Radiums durch Becquerel 1896 und Marie und Pierre Curie 1898 begann man in verschiedenen Firmen mit der Herstellung und dem Verkauf radioaktiver Präparate an Forschungseinrichtungen und Kliniken. Bei der Herstellung größerer Radiummengen fanden die Curies Unterstützung durch die *Société Centrale de Produits Chimiques*.² In Braunschweig trennte der Chemiker Friedrich Oskar Giesel Radioelemente aus den Rückständen der Chemiefabrik de Haën ab. Das von 1902 an in der Chininfabrik Buchler in einer von ihm geleiteten, speziellen Produktionsabteilung hergestellte

Radiumbromid hatte einen hohen Reinheitsgrad von 90%.³ Heute stellt das Unternehmen Nycomed Amersham-Buchler in Braunschweig-Wenden radioaktive Präparate für die Medizin her. Zwischen 1904 und 1907 wurde in Carl Auer von Welsbachs Österreichischer Gasglühlicht- und Elektrizitätsgesellschaft in Atzgersdorf bei Wien Radium aus den Uranrückständen der Blaufarbenfabrik in St. Joachimsthal hergestellt.⁴ Bis zum Zweiten Weltkrieg wurde dann die Hauptmenge des Urans von der Union Minière du Haut-Katanga in Belgisch Kongo gefördert und in Olen (Belgien) aufbereitet; dort wurde auch Radium hergestellt.

Als Frederik und Irène Joliot-Curie die künstliche Radioaktivität entdeckt hatten und man mit Beschleunigern und Neutronenquellen eine große Zahl neuer Radionuklide herstellen konnte, waren die gewonnenen Aktivitäten anfangs für eine industrielle Produktion zu gering, auch wenn mit dem leistungsfähigen Zyklotron von O. Lawrence in Berkeley schon ausreichend ^{32}P hergestellt werden konnte, um befreundete Kollegen wie G. v. Hevesy in Dänemark zu versorgen.⁵ Hevesy erkannte die Eignung natürlicher Radioisotope als Indikatoren für physikochemische Vorgänge. Er setzte das natürliche Bleiisotop ^{210}Pb für die Untersuchung der Aufnahme und des Austauschs von Blei beim Wachstum der Bohne ein und führte, mit den mit Neutronenquellen erhaltenen geringen Aktivitäten an ^{32}P , mit dem Austausch des Phosphors in Knochen beginnend,⁶ grundlegende Untersuchungen zum Stoffwechsel durch. Dafür erhielt er im Jahr 1943 den Nobelpreis für Chemie.

Nachdem mit leistungsfähigen Reaktoren und Beschleunigern genügend starke Strahlenquellen zur Verfügung standen, konnte man recht schnell von vielen radioaktiven Nukliden hohe Aktivitäten herstellen, die den Bedarf in den ersten Jahren überstiegen. 1946 wurde unter Leitung von Henry Seligman in Harwell ein Radiochemisches Zentrum der britischen Atomenergiebehörde gegründet, um – unter Nutzung der Schwerwasserreaktoren – markierte Verbindungen, Radiopharmaka und Strahlenquellen herzustellen und zu verkaufen.⁷

Gründung des ZfK Rossendorf, Inbetriebnahme des Forschungsreaktors

In Deutschland waren nach dem Zweiten Weltkrieg durch Beschluss des Alliierten Kontrollrates Forschung und Anwendung der Kernphysik untersagt. Nachdem dieses Verbot 1956 aufgehoben wurde, und nachdem auf der ersten Genfer Konferenz zur friedlichen Anwendung der Kernenergie im Jahr 1955 die Atommächte ihre bisherigen Forschungen auf diesem Gebiet der Öffentlichkeit vorgestellt hatten, begann auch in der DDR, in enger Zusammenarbeit mit der Sowjetunion,

eine intensive Arbeit auf diesem Gebiet.⁸ Es wurden wissenschaftliche Einrichtungen gegründet und für deren Leitung erfahrene Wissenschaftler gewonnen, die meist nach dem Krieg in der Sowjetunion in der Kernphysik und an der Entwicklung von Atomwaffen gearbeitet hatten, sich nach ihrer Rückkehr aus der UdSSR an Hochschulen habilitierten und auf Professuren berufen wurden.

In Berlin-Buch wurde 1955 das Institut für angewandte Isotopenforschung gegründet, dessen Leitung Hans-Joachim Born übernahm. Born war in den dreißiger Jahren Doktorand und Assistent bei Otto Hahn gewesen und hatte sich vor dem Krieg im Kaiser-Wilhelm Institut (KWI) für Hirnforschung Berlin-Buch mit dem Verhalten von Radionukliden in Organismen beschäftigt. Im gleichen Gebäude wurde auch die Isotopenverteilungsstelle eingerichtet, die den Import und Vertrieb von Radioisotopen übernahm und später als Isocommerz GmbH nach Rossendorf umzog. In Rossendorf bei Dresden wurde am 1. Januar 1956 unter Leitung von Heinz Barwich das Zentralinstitut für Kernforschung (ZfK) und in Leipzig unter Leitung von Carl Friedrich Weiß das Institut für angewandte Radioaktivität gegründet. Im ZfK wurden für die verschiedenen Arbeitsrichtungen wissenschaftliche Bereiche gebildet, wobei Hans-Joachim Born die Leitung des Bereichs Radiochemie übernahm. Er folgte 1957 einem Ruf nach München und Kurt Schwabe übernahm die Leitung des Bereichs, wobei er die Leitung seines Instituts für Physikalische Chemie an der TH Dresden beibehielt. 1956 und 1957 wurden im Bereich Radiochemie zwei promovierte und sieben frisch diplomierte Chemiker eingestellt.⁹ Rudolf Münze, der 1957 in Rostock seine Promotionsarbeit angefertigt hatte, wurde mit dem Aufbau einer Isotopenproduktion beauftragt.

Die Chemiker mussten nicht erst auf die Fertigstellung der geplanten Laborgebäude in Rossendorf warten, sondern konnten als Gäste in gut eingerichteten chemischen Laboratorien des Instituts für angewandte Isotopenforschung in Berlin-Buch und im Institut für Kernphysik in Miersdorf unmittelbar mit experimentellen Arbeiten beginnen.¹⁰ Als sich der Bau des geplanten Laboratoriumsgebäudes für chemische und festkörperphysikalische Arbeiten in Rossendorf verzögerte, beantragte Hans-Joachim Born noch 1956 die kurzfristige Errichtung eines provisorischen eingeschossigen Laborgebäudes, das bereits Ende 1957 bezogen werden konnte. Dieser Flachbau wurde nach Einbau von Abschirmungen und mehrmaligen Erweiterungs- und Umbaumaßnahmen für die Herstellung radioaktiver Präparate genutzt solange das ZfK bestand. Radioaktive Isotope wurden für die Anwendungen in der DDR anfangs vor allem aus der UdSSR über die Isotopenverteilungsstelle Berlin-Buch importiert. Die Beschaffung kurzlebiger radioaktiver Isotope war nicht möglich. Da in vielen Betrieben und Forschungs-

instituten Isotopenlaboratorien und in den Kliniken Abteilungen für Nuklearmedizin gegründet wurden, stieg der Bedarf an kurzlebigen Radioisotopen stark an.

Am 16. Dezember 1957 ging der Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) mit einer Leistung von 2MW in Betrieb. Unmittelbar darauf wurde mit der Herstellung radioaktiver Präparate begonnen.¹¹ Der Reaktor war mit seinen Bestrahlungskanälen und Entladevorrichtungen, die ständig vervollkommen wurden, auf eine vielseitige Nutzung ausgerichtet. Dafür wurden auch die Neutronenflüsse durch Leistungserhöhungen schrittweise auf 4MW und 10MW und der Anreicherungsgrad an ²³⁵U in den Brennelementen von 10% auf 36% erhöht.

Herstellung radioaktiver Präparate in einem provisorischen Laborgebäude

Die Arbeiten zur Isotopenproduktion begannen mit einem Forschungsauftrag zur Herstellung kurzlebiger radioaktiver Isotope, dessen Ergebnisse unmittelbar zur Versuchsproduktion in dem eingerichteten Flachbau führten,¹² in dem anfangs auch die Forschungsarbeiten des gesamten Bereichs Radiochemie durchgeführt wurden. Ein knappes Jahr nach Inbetriebnahme des Forschungsreaktors erfolgte am 6. November 1958 die erste Auslieferung eines radioaktiven Präparats. Es handelte sich um mit ⁸²Br markiertes Ethylbromid mit einer Aktivität von $4 \cdot 10^{10}$ Bq.¹³ Das ⁸²Br hat eine Halbwertszeit (HWZ) von 1,68 Tagen. Das 1959 fertiggestellte dreigeschossige Laborgebäude für Radiochemie und Festkörperphysik war ursprünglich nur für inaktive Arbeiten vorgesehen, da für radioaktive Arbeiten zwei weitere Laborgebäude geplant waren. Als deren Errichtung in weite Ferne rückte, wurden für die radiochemischen Forschungsarbeiten und Arbeiten zur Entwicklung und Herstellung ³H-, ¹⁴C- und ³⁵S-markierter Verbindungen in dem Gebäude durch entsprechende Einbauten auch die Arbeiten mit Radionukliden ermöglicht.¹⁴ Für die nach den jeweiligen Kundenwünschen hergestellten markierten Verbindungen wurden die Grundstoffe aus der UdSSR importiert. Durch die Verlagerung dieser Arbeiten in das Gebäude für Radiochemie und Festkörperphysik wurden im Flachbau bessere Möglichkeiten für die Herstellung radioaktiver Präparate geschaffen.

Die umfangreiche Produktpalette (Tab. 1) beinhaltete u.a. als *Goldseeds* bezeichnete Kapseln mit ¹⁹⁸Au für die Strahlentherapie, Verbindungen von ¹³¹I für die radiologische Diagnostik und Therapie und von ³²P für die unterschiedlichsten biochemischen Forschungsaufgaben.¹⁵

Radiochemikalien	Umschlossene Quellen	Markierte organ. Verbindungen	Radiopharmaka
$\text{H}_3^{32}\text{PO}_4$; $\text{Na}_2\text{H}^{32}\text{PO}_4$ $\text{H}_2^{35}\text{SO}_4$; $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$ $^{89}\text{SrCl}_2$; $^{91}\text{YCl}_3$ $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ -Oxalat $\text{Na}_2^{99}\text{MoO}_4$ Na^{125}I ^{133}Xe -Gas $^{132}\text{TeCl}_4$; $^{140}\text{BaCl}_2$, $^{141}\text{CeCl}_3$	^{60}Co -Quellen ^{90}Y -seeds ^{125}I -Quellen ^{192}Ir -Quellen ^{198}Au -seeds	^3H markierte biologisch interessante Verbindungen ^{14}C -markierte Alkohole; Kohlenwasserstoffe, Karbonsäuren; Aldehyde KCN; Cyanamide; Ethin; CO; und CO_2 ^{32}P -markierte organische Verbindungen, z.B. Adenosintriphosphat ^{35}S -markierte Verbindungen, z.B. Methionin, Cystein	$\text{Na}_2\text{H}^{32}\text{PO}_4$ $\text{Na}_2^{51}\text{CrO}_4$ ^{57}Co -Vitamin B12 ^{75}Se -Selenomethionin $^{89}\text{SrCl}_2$ ^{90}Y -Eisen-Kolloid $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sterilgenerator $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Markierungssätze $^{113}\text{Sn}/^{113\text{m}}\text{In}$ -Sterilgenerator Na^{125}I ^{125}I -Insulin ^{131}I -Bromsulfan ^{131}I -Diagnostikkapseln ^{131}I -Therapiekapseln ^{131}I -Humanserumalbumin ^{131}I -Hippurat

Tab. 1: Lieferprogramm.

Für die Herstellung von trägerfreiem ^{32}P wurde 1962 eine Anlage in zwei Boxen aus Stahlplatten untergebracht.¹⁶ In ihr wurden in Aluminiumbehälter eingeschmolzene und im Reaktor bestrahlte Schwefelkörper von 800g in Tetrachlorethylen gelöst, das aus dem Schwefel gebildete ^{32}P mit 0,1N HCl ausgewaschen und anschließend am Kationenaustauscher KPS-200 gereinigt. Die dabei erhaltene Aktivität an ^{32}P war um 12 Größenordnung höher als jene, die Hevesy 26 Jahre zuvor durch Bestrahlung von CS_2 mit einer Radon-Beryllium-Quelle erhalten und für seine ersten Tierversuche verwendet hatte.

Herstellung von $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren

Das universell einsetzbare Radionuklid $^{99\text{m}}\text{Tc}$ lässt sich gut in verschiedene Verbindungen einbauen, die spezifisch in den zu untersuchenden Organen angereichert werden. Die Halbwertszeit von 6 Stunden ist dem Untersuchungsvorgang, bestehend aus Markierung, Aufnahme in die Organe und Messung der Verteilung, gut angepasst. Die Reichweite der Gammastrahlung für die Untersuchung und die Energie für eine empfindliche Messung sind optimal, und die Strahlenbelastung der Patienten ist im Vergleich zu der durch andere Nuklide wesentlich geringer. Den Kliniken werden Lösungen mit ^{99}Mo (HWZ 60h) beziehungsweise $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren angeliefert. Das sind mit ^{99}Mo präparierte Ionenaustauschsäulen, von denen das Tochternuklid $^{99\text{m}}\text{Tc}$ mit einem anwendungsspezifischen Komplexbildner ausgewaschen und die so erhaltene Lösung in die Blutbahn gespritzt werden kann.

Der Flachbau wurde für die Herstellung von $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren eingerichtet. Zwei heiße Zellen für die Bearbeitung höherer Aktivitäten sowie ein Tresorhaus und eine Anlage zur Sammlung flüssiger radioaktiver Abfälle wurden angebaut. Damit wurde eine erste Produktionsanlage zur Herstellung von Radiopharmaka geschaffen.

Ein neues Gebäude für die Herstellung radioaktiver Erzeugnisse

Nach den ersten zehn Produktionsjahren war zu erkennen, dass, selbst im umgebauten und erweiterten Flachbau, der Bedarf an Radiopharmaka, der durch den Export in osteuropäische Länder und später auch in die BRD schnell stieg, langfristig nicht zu decken war. Deshalb wurde ein als Technologisches Zentrum (TZ) bezeichnetes neues Produktionsgebäude geplant, für 20 Millionen Mark errichtet und 1976 in Betrieb genommen. An den Flachbau schloss sich ein viergeschossiges Gebäude für inaktive Arbeiten und daran ein dreigeschossiges Gebäude für die Arbeiten mit hohen Radioaktivitäten an. Dies war mit jeweils zwei heißen und sechs warmen Zellen in je einem Trakt im Keller und im Erdgeschoss und einem Nebentrakt mit sechs Typenboxen im Erdgeschoss ausgestattet. Die lichten Abmessungen der Heißen Zellen betragen 2,0*3.0*2.4m (Tiefe*Breite*Höhe). Die Wände bestanden allseitig aus 1m Schwerbeton und waren innen mit mit Epoxidharz beschichtetem Normalstahl ausgekleidet. Die Apparaturen wurden mit Manipulatoren fernbedient.¹⁷ Die in den Zellen installierten Apparaturen für die Herstellung der verschiedenen Radioisotope waren meist aus

Stahl gefertigt. In dem Gebäude wurden auch die Anlagen zur Gewinnung von ^{99}Mo aus bestrahltem Uran installiert.

In der Strahlentherapie wurde nach dem Zweiten Weltkrieg das ein halbes Jahrhundert eingesetzte kostspielige Radium durch das ^{60}Co in so genannten Kobaltkanonen ersetzt, bevor diese wiederum von der, mit Hilfe von Beschleunigern erzeugten, harten Röntgenstrahlung abgelöst wurden. ^{60}Co -Quellen dienten damals auch in Wasserbrunnen zur Verhinderung der Verockerung. Der große Bedarf an ^{60}Co schien nicht abgesättigt zu werden, da das ^{60}Co mit einer Halbwertszeit von 5,3 Jahren abklingt und die Bestrahlungsanlagen nach wenigen Jahren mit neuen ^{60}Co -Quellen bestückt werden mussten. Im TZ wurden ^{60}Co -Quellen im Megacuriebereich (entspr. $3,7 \cdot 10^{16}$ Bq) zur Herstellung umschlossener Strahlenquellen gefertigt und in einem Wassertresor sicher verwahrt, in dem auch die zurückgelieferten, teilweise abgeklungenen Quellen gelagert wurden. 1976 hatten ca. 80 Beschäftigte insgesamt 35000 Sendungen ausgeliefert und dafür 6,6 Millionen Mark eingenommen. Der Anteil der Radiopharmaka an der Gesamtproduktion lag bei ca. 80%.¹⁸

Anlage zur Herstellung von ^{99}Mo aus bestrahlten Reaktorbrandelementen

Zur Herstellung von ^{99}Mo wurde zuerst Molybdän im Reaktor bestrahlt, wobei radioaktives ^{99}Mo durch Neutroneneinfang aus dem recht seltenen stabilen Isotop ^{98}Mo gebildet wird. Den Nachteil der dabei erhaltenen geringen spezifischen Aktivität versuchte man an anderen Orten durch Bestrahlung von an ^{98}Mo angereichertem Molybdän zu umgehen. Da ^{99}Mo auch ein Spaltprodukt von Uran ist, wurde in Rossendorf 1960 ein Verfahren zur Herstellung aus bestrahltem Natururan entwickelt und in Betrieb genommen. Das ^{99}Mo entsteht bei der Spaltung des im Natururan nur zu 0,7% enthaltenem Isotops ^{235}U . Außerdem entsteht aus dem zu 99,3% enthaltendem ^{238}U das extrem radiotoxische ^{239}Pu , dessen Entfernung vom ^{99}Mo sorgfältig kontrolliert werden muss. Das Verfahren lieferte nach Bestrahlung von 300g Uran zum Messdatum ca. $4 \cdot 10^{11}$ Bq. Aus dem ^{99}Mo wurden ausschließlich ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren hergestellt. Die ^{99}Mo -Herstellung und die Produktion der Generatoren wurden unter Leitung von Gerhard Wagner ausgeführt.¹⁹

Der Bedarf an $^{99\text{m}}\text{Tc}$ war inzwischen so stark angestiegen, dass pro Aktivierung ca. $5 \cdot 10^{13}$ Bq ^{99}Mo hergestellt werden mussten. Das war nur durch Bestrahlung von an ^{235}U angereichertem Uran möglich. Das in anderen Ländern eingesetzte mit 90% ^{235}U angereicherte Uran stand im ZfK nicht zur Verfügung. Deshalb

wurden Brennelemente (BE) des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR) eingesetzt, die 105-120g Uran mit einer ^{235}U -Anreicherung von 36% enthielten. Solch ein Brennelement war nach Abtrennung von Kopf- und Fußstück 640mm lang und bestand aus drei konzentrisch angeordneten Doppelwandrohren mit dem äußeren Durchmesser von 37mm. Zwischen den Wänden dieser Aluminiumrohre befand sich eine UAl_3 -Legierung, bei neueren Fabrikaten UO_2 -Al-Grieß. Im Jahre 1975 wurde mit der Entwicklung eines Verfahrens für die Herstellung von ^{99}Mo aus bestrahlten Brennelementen des RFR begonnen.²⁰ Der Bereich Technik des ZfK hat die Anlage zur Molybdänproduktion Rossendorf (AMOR I) konstruiert, gefertigt und in den Heißen Zellen des TZ installiert, so dass 1981 der Probebetrieb aufgenommen werden konnte. Die Anlage war auf der Grundlage einer Strahlenschutzgenehmigung für Kernanlagen der DDR genehmigt worden.²¹

Die Brennelemente wurden 100-200 Stunden im RFR bei einem Neutronenfluss von $5 \cdot 10^{13} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ bestrahlt. Da dabei ein Teil des ^{235}U gespalten wurde, verringerte sich der Anreicherungsgrad auf 35%. Die BE wurden nach 40 Stunden in Salpetersäure aufgelöst. Bei der Aufarbeitung eines BE wurde eine Gesamtaktivität von fast 10^{15} Bq an Spaltprodukten mit beträchtlichen Anteilen an sehr flüchtigen Iod- und Xenonisotopen bearbeitet. Das beim Auflösen entstehende Gas wurde durch entsprechende reaktive Filtersysteme gereinigt.²² Das ^{99}Mo wurde aus der Lösung an Aluminiumoxid durch Ionenaustausch absorbiert und anschließend mit Ammoniaklösung eluiert. Die Anlage war von 1982 bis 1991 in Betrieb. Jede Woche wurden $5 \cdot 10^{12} \text{ Bq}$ ^{99}Mo hergestellt. In der zehnjährigen Betriebszeit wurden in 415 Produktionszyklen aus 39kg Uran insgesamt $8,5 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$ ^{99}Mo gewonnen.²³ Die verbleibende Prozesslösung wurde bis zur Rückgewinnung des Urans drei bis vier Jahre gelagert. Auch wenn bei dem Prozess große Aktivitäten an ^{131}I entstanden, konnte dieses dabei nicht gewonnen werden, da bei der Uranspaltung gleichzeitig zu viele andere störende Iodisotope entstehen. ^{131}I wurde in einer anderen Anlage durch Ausheizen aus bestrahltem Tellurdioxid abgetrennt.²⁴

Die aus dem Gemisch von Uran und Spaltprodukten bestehende Abfalllösung der Anlage AMOR I wurde in $2,5\text{m}^3$ fassenden Keramikbehältern gelagert, die von rostfreiem Stahl und einer Betonkonstruktion umgeben waren. Mit der Abtrennung von spaltbarem Uran aus den Abfalllösungen wurde 1985 in der Anlage AMOR II begonnen.²⁵ Dazu wurde das Uran aus jeweils $0,2\text{m}^3$ Speiselösung mit einer Lösung von Tributylphosphat in Tetrachlorethan in die organische Phase nach dem Gegenstromprinzip in fünf Mischer-Absetzer-Gefäßen extrahiert und in fünf Stufen aus der organischen Lösung rückextrahiert. Die dafür entwickelten Mischergefäße arbeiteten unter Verzicht auf mechanisch bewegte Teile mit einblasener Luft. Die Anlage war zehn bis zwölf Wochen im Jahr bei einem Jah-

resdurchsatz von 5kg Uran im Betrieb. Für die Weiterverarbeitung zu neuen, für die ^{99}Mo -Herstellung eingesetzten, Brennelementen wurde aus der erhaltenen Uranlösung mit Silicagel noch $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ entfernt.²⁶ Mit der Verarbeitung des zurückgewonnenen Urans zu neuen Bestrahlungselementen in der Anlage AMOR III wurde ein Kernbrennstoffkreislauf realisiert.²⁷ Ein ähnliches Verfahren wurde 30 Jahre vorher bereits in Dounray (Großbritannien) zur Wiederaufarbeitung der Brennelemente von Materialtestreaktoren eingesetzt.²⁸ Im Vergleich zur Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK), in der von 1971 bis 1990 pro Jahr 35 Tonnen Uran in Brennstäben mit geringerer ^{235}U Anreicherung aus Kraftwerksreaktoren viel länger bestrahlt und dabei auch entsprechend mehr Spaltprodukte und Plutonium gebildet wurden, war der Durchsatz mit 5kg Uran pro Jahr um ca. vier Größenordnungen geringer.

1990 verließen etwa 100000 Lieferungen an radioaktiven Präparaten mit einem Jahresumsatz von ca. 20 Millionen Mark das ZfK Rossendorf. Es war maßgebend bei der Herstellung von radioaktiven Grundstoffen wie ^{32}P , ^{131}I , ^{99}Mo , sowie in der Herstellung von $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Markierungssätzen. Etwa 50% der radioaktiven Produkte wurden exportiert.²⁹ Hier soll auch erwähnt werden, dass eine Reihe von Radioisotopen medizinischer Bedeutung, z.B. das zur Tumorszintigrafie verwendete ^{67}Ga -Citrat, durch Bestrahlung am Rossendorfer Zyklotron gewonnen wurden.

Zusammenarbeit mit nuklearmedizinischen Kliniken

Die Direktoren der Nuklearmedizinischen Klinik an der medizinischen Akademie in Dresden, Konrad Hennig und Wolf-Gunter Franke, waren wichtige Partner bei der Entwicklung und Erprobung der Nuklearpharmaka. Das gilt auch für weitere Kliniken, insbesondere für die Charité in Berlin. In diesem Sinne wurde auch 1983 unter Leitung von J. Steinbach mit der Entwicklung der Positronen-Emissions-Tomografie (PET) begonnen. Zur Erzeugung der dazu notwendigen Positronenstrahler ^{11}C , ^{18}F und ^{123}I wurde das Rossendorfer Zyklotron genutzt, das durch ein 350m langes Rohrleitungsbündel mit einem 1986 eingeweihten Tierhaus verbunden war, wo auch die entsprechenden markierten Verbindungen hergestellt werden konnten.

Nationale und internationale Kooperationen und Versuche zur Ausgliederung der Isotopenproduktion aus dem ZfK

Die umfassende medizinische Anwendung der Radiopharmaka und die Lieferwünsche aller Kunden im In- und Ausland erforderte eine kontinuierliche wöchentliche Lieferung aller Hauptprodukte. Betriebspausen des Reaktors für Wartungs- und Rekonstruktionsaufgaben wurden durch Kooperationen mit Partnern in Polen und in der Tschechoslowakei überbrückt. Für die Bestrahlung und den Transport von bestrahlten Brennelementen aus der CSSR und aus Polen hatte die UdSSR eine Genehmigung erteilt. Aufgrund der umfangreichen Erfahrungen war das ZfK auch bei der Unterstützung und dem Aufbau von Isotopenproduktionsanlagen in sieben Entwicklungsländern im Auftrag der IAEA und in zwei Ländern auf bilateraler Basis tätig. Nach der Stilllegung der Rossendorfer Produktionsanlagen sind mehrere ehemalige Mitarbeiter für die in der Schweiz ansässige Firma Gamma-Service Group International weiterhin auf diesem Gebiet tätig.

Die Haltung der Akademieleitung zur Herstellung radioaktiver Präparate war schwankend. Auch wenn man die Akademie der Wissenschaften der DDR (AdW) auf die Grundlagenforschung ausrichten wollte, war man über die Einnahmen aus der Isotopenproduktion äußerst erfreut. Es gab auch einen Beschluss des Ministerrates der DDR vom 16. August 1972, in dem der Akademiepräsident und der Minister für Chemische Industrie verpflichtet wurden, bis Juni 1973 eine gemeinsame Vorlage zur Weiterführung der Isotopenproduktion auszuarbeiten. Der Chemieminister Günter Wyschofsky erklärte dem Akademiepräsidenten am 24. Oktober 1972 ausdrücklich seine

Bereitschaft zur Übernahme der Isotopenproduktion in den Bereich der Chemischen Industrie. Als Zeitpunkt akzeptiere ich den 1.1.1976. [...] [Ich halte] es für zweckmäßig, einen juristisch selbstständigen Betrieb, den VEB Isotop, zu diesem Zeitpunkt zu bilden und diesen der VVB Pharmazeutische Industrie zu unterstellen.³⁰

Eine Arbeitsgruppe zur Ausgliederung der Isotopenproduktion, die bereits am 23. August 1972 ihre Arbeit aufnahm, kam jedoch zu dem Ergebnis, dass eine solche Maßnahme unwirtschaftlich sei, weil zu viele administrative Funktionen und Versorgungseinrichtungen parallel aufgebaut werden müssten.³¹

Qualifikation der Mitarbeiter

Indem ständig neue Produkte in die Produktion überführt und neue Anlagen in Betrieb genommen wurden, erfolgte eine kontinuierliche Qualifikation der Mitarbeiter an ihren Arbeitsplätzen. Die Entwicklung neuer Präparate und Herstellungsmethoden im Rahmen der Forschung ermöglichte es den Mitarbeitern auch im Rahmen von Ingenieur-, Diplom-, Promotions- und Habilitationsarbeiten höhere Qualifikationsstufen zu erreichen. Zusätzlich bildeten sich im Fernstudium viele Laboranten zu Ingenieuren und Ingenieure zu Diplomchemikern weiter. Die Promotionsprüfungen wurden anfangs an den Universitäten, insbesondere der TU Dresden, abgelegt. Nachdem das ZfK der Deutschen Akademie der Wissenschaften (später: AdW) zugeordnet worden war und die AdW das Promotionsrecht erhalten hatte, wurden auch Promotionen an der AdW durchgeführt. Das gleiche galt auch für die Habilitation, an deren Stelle später der Titel „Doktor der Wissenschaften“ trat. Auf die lange Liste der der Entwicklung der Radiopharmaka gewidmeten Publikationen kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Stellvertretend soll hier nur die Promotionsarbeit B von Bernd Johannsen und Hartmut Spies über Technetiumverbindungen erwähnt werden.³²

Der mit der angewandten Kernphysik und verschiedenen Richtungen der Chemie gut vertraute Leiter der Abteilung und des späteren Bereichs Radiochemie, Rudolf Münze, war dabei meist als Betreuer bzw. Gutachter tätig.³³ Auf seine Initiative wurde an der TU Dresden der Fernstudiengang „Radiochemie“ mit Vorlesungen und Praktika zur Radiochemie, zur angewandten Kernphysik und zum Strahlenschutz eingerichtet, der nach einer Abschlussarbeit und einer mündlichen Prüfung mit dem Titel „Fachchemiker für Radiochemie“ abschlossen wurde. Aus dem Bereich Radiochemie sind die fünf Direktoren Bernd Johannsen, Gert Bernhard, Jörg Steinbach, Frank Rösch und Ulrich Abram hervorgegangen. Sie hatten sich mit Arbeiten zur Entwicklung und Herstellung von Nuklearpharmaka habilitiert. Nach 1990 wurden sie mit der Leitung der Institute für Bioanorganische Chemie, Radiochemie und Radiopharmazie in Rossendorf, des Instituts für Kernchemie in Mainz und des Instituts für Anorganische Chemie der Freien Universität Berlin betraut. Gerd Beyer beschäftigte sich später in Genf im CERN mit der Entwicklung von Radiopharmaka.

Das Ende des Forschungsreaktors und der Produktion von Radioisotopen

Aus dem Einigungsvertrag zwischen der BRD und der DDR ergab sich mit Wirkung vom 31. Dezember 1991 das Ende der Existenz der Akademie der Wissen-

schaften der DDR mit ihren Gremien, Instituten, Arbeitsverträgen und Genehmigungen, darunter auch solchen, die das Atomrecht betrafen. Nach 30-jähriger Laufzeit waren der Kern und der Behälter des RFR planmäßig erneuert worden. Der Reaktor war gerade erst wieder in Betrieb gegangen und für eine vielfältige Nutzung bereit. Neben der Herstellung radioaktiver Präparate sind u.a. die Neutronendotierung von Silizium, die Neutronenaktivierungsanalyse und die Neutronendiffraktometrie zu nennen. Die von den Aufsichtsbehörden der DDR erteilten Betriebsgenehmigungen entsprachen nicht den in der BRD geltenden Regeln. Zu einer für deren Befriedigung erforderlichen Nachrüstung konnte man sich trotz intensiver Bemühungen des Direktors des ZfK, Wolf Häfele, der sich zuvor viele Jahre in der BRD beim Aufbau eines schnellen Brutreaktors engagiert hatte, nicht durchringen. Möglicherweise wollte man das Projekt des Münchener Forschungsreaktors FRM II nicht gefährden.

Um nach der Stilllegung des RFR eine weitere Nutzung der Anlagen zu ermöglichen, wurden vom ZfK Verträge für die Ausgliederung der Produktion radioaktiver Präparate aus dem ZfK ausgearbeitet. Beim Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung wurde für den Umgang mit radioaktiven Stoffen eine eigene atomrechtliche Genehmigung beantragt. Da diese nicht rechtzeitig erteilt wurde, musste gleichzeitig mit der Stilllegung des RFR am 31. Dezember 1991 auch die Herstellung radioaktiver Präparate eingestellt werden. Im Jahr 1989 waren 120 Mitarbeiter/innen direkt in der Isotopenproduktion tätig. Inzwischen wurden alle Einrichtungen zur Herstellung radioaktiver Präparate, mit Ausnahme der Einrichtungen zur Herstellung von inaktiven Markierungssätzen zur Markierung mit ^{99m}Tc , stillgelegt und zurückgebaut.

Rossendorf blieb jedoch als Forschungs- und auch Wirtschaftsstandort erhalten. Heute ist dort das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) angesiedelt, das eng mit dem Bereich Radiopharmaka für Krebsforschung und Diagnostik des Klinikums der Technischen Universität Dresden zusammenarbeitet. Das PET-Zentrum in Rossendorf wird von der TU Dresden und dem HZDR gemeinsam betrieben. In Rossendorf hat sich auch das Unternehmen Rossendorfer Isotope (ROTOP-Pharmaka) etabliert, das 2001 mit zehn Beschäftigten begann und wo heute 40 Mitarbeiter vor allem Technetium-Kits produzieren.

Die Versorgung mit ^{99m}Tc ist eine wichtige Aufgabe für die Volksgesundheit. Mit ^{99m}Tc werden ca. 80% aller nuklearmedizinischen Untersuchungen in Europa durchgeführt, die 2009 auf über 9 Millionen im Jahr angestiegen sind.³⁴ Da ^{99}Mo nicht gelagert werden kann, ist eine kontinuierliche Herstellung in Forschungsreaktoren notwendig. Die Aktivierung erfolgte 2009 in Europa in den drei Reaktoren HFR (Petten, NL), BR2 (Mol, B) und OSIRIS (Saclay, F), die alle über 40

Jahre alt sind und bis 2015-2025 in Betrieb bleiben sollen. Bei zeitweiligen Stilllegungen traten immer wieder Lieferschwierigkeiten auf. Über einige Jahre wurde ^{99}Mo auch im Forschungszentrum Karlsruhe hergestellt.³⁵ In Deutschland soll in wenigen Jahren am Münchner Forschungsreaktor FRM II die Bestrahlung für die Produktion an ^{99}Mo aufgenommen werden. Die chemische Aufarbeitung erfolgt in Anlagen der Firmen Covidien in Petten und IRI in Fleurus (Belgien). Herstellung und Vertrieb der $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren wurden in mehreren Einrichtungen durchgeführt. Die größten sind Covidien in Petten, GE Healthcare in Amersham (USA) und IBA in Saclay. Der Wert der $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Präparate wird von der Pharmaindustrie in der Größenordnung von 1000 Millionen Euro, der Marktwert des erzeugten ^{99}Mo auf 15-20% der $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Präparate und der Bestrahlungsdienst der Reaktoren auf 10-15% des Marktwertes von ^{99}Mo geschätzt.

Auf die in den letzten Jahren häufig auftretenden Versorgungsschwierigkeiten hat auch der Bund Deutscher Nuklearmediziner hingewiesen.³⁶

Folgerung

Mit der Produktion radioaktiver Präparate in Rossendorf leistete das ZfK einen wichtigen Beitrag zur Versorgung der Nuklearmedizin in der DDR und den Nachbarstaaten und gehörte zu den bedeutendsten Lieferanten der Welt. Bemerkenswert ist die Auslieferung der ersten Präparate nur wenige Monate nach Inbetriebnahme des Forschungsreaktors und die Verwendung von Brennelementen des Forschungsreaktors als Ausgangsmaterial für die Herstellung des für die Nuklearmedizin äußerst wichtigen ^{99}Mo . Auch wenn die Herstellung radioaktiver Präparate im Prinzip keine Aufgabe einer Forschungseinrichtung ist, war es in der relativ kleinen DDR wegen der schnellen Entwicklung der Nuklearmedizin mit ihren wechselnden Bedürfnissen und wegen des begrenzten Marktes nicht sinnvoll, eine solche Aufgabe einem chemischen oder pharmazeutischen Betrieb zu übertragen, der dann auch den Anforderungen des Strahlenschutzes hätte gerecht werden müssen. Die Möglichkeit, die Mitarbeiter sowohl mit Forschungs- als auch mit Produktionsaufgaben zu betrauen, und ihnen dabei eine ständige Weiterqualifikation zu ermöglichen, erwies sich als vorteilhaft. Die enge Verbindung von Wissenschaft und Produktion ist besonders notwendig bei Produkten und Dienstleistungen, die sehr kompliziert sind oder ein besonderes Risiko für Betreiber und Nutzer darstellen. Auch wenn Forschung und Produktion in verschiedenen Einrichtungen durchgeführt werden, sollten deshalb alle Möglichkeiten des Personalaustauschs gefördert werden.

Summary: The Entanglement of science and production at the Nuclear Research Center Rossendorf (1958-1991)

The production of radio pharmaceuticals in the Nuclear Research Center Rossendorf (NRCR) is an excellent example for a close cooperation of interdisciplinary research and fabrication with outstanding possibilities for the exchange of personnel and of experiences. For the short lived ^{99m}Tc , which is used in about 90% of the diagnoses in nuclear medicine, the whole process from irradiation of enriched U, chemical isolation of the longer lived mother nuclide ^{99}Mo and the production of the Tc- generators were done in the institute. The NRCR was one of the most important producers of radio pharmaceuticals worldwide until 1991. After the reunification of Germany, the government considered transforming the scientific institute into a pharmaceutical enterprise in order to continue the production of radio pharmaceuticals. However, this was not realized for economic reasons.

- ¹ Karl-Heinz Paque, *Wachstum! Die Zukunft des globalen Kapitalismus* (München 2010).
- ² Beate Ceranski, *Tauschwirtschaft, Reputationsökonomie, Bürokratie – Strukturen des Radiummarktes vor dem Ersten Weltkrieg* (Basel 2008).
- ³ Rudolf G.A. Fricke, *Friedrich Oskar Giesel – Pionier der Radioaktivitätsforschung – Opfer seiner Wissenschaft* (Wolfenbüttel 2001).
- ⁴ Ludwig Heiting, Karl Ulrich, *Mitteilungen der Radiumkommission der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien 2* (1908), zit. in: E. Ebler, W. Bender, „Neue Methoden zur Gewinnung von Radium aus Uranerzen“, *Angewandte Chemie* 28 (1915), S. 25-48.
- ⁵ Siegfried Niese, *Georg von Hevesy – Wissenschaftler ohne Grenzen* (Münster 2009), S. 284.
- ⁶ Ole Chievitz, „Georg von Hevesy: Radioactive indicators in the study of phosphorus metabolism of rats“, *Nature* 136 (1935), S. 774-776.
- ⁷ Henry Seligman, „Die Gewinnung von Radioisotopen in der Pile“, *Angewandte Chemie* 66 (1954), S. 95-99. Henry Seligmann war Leiter der Isotope Division, Atomic Energy Research Establishment in Harwell (Großbritannien) und später der Isotope Division in der International Atomic Energy Agency (IAEA). Dabei gründete er die IAEA Laboratorien in Seibersdorf und Monaco.
- ⁸ Vgl. Peter Liewers, Johannes Abele, Gerhard Barkleit, *Zur Geschichte der Kernenergie in der DDR* (Frankfurt am Main 2000); ferner Karl Lanus, „Erinnerung an den Beginn“, in:

- Alexander Andreeff, Dieter Seeliger (Hg.), *50 Jahre Forschung für die friedliche Nutzung der Kernenergie*. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät 89 (Berlin 2007), S. 11-18.
- ⁹ Siegfried Niese, „Kernforschung im Spannungsfeld zwischen Tradition und Programm“, *FZR Intern* (2006).
- ¹⁰ Günther Vormum, „Das Institut für angewandte Isotopenforschung in Berlin-Buch der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin“, *Isotopenpraxis* 2 (1966), S. 140-145.
- ¹¹ Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf (VKTA) e.V. (Hg.), *Beiträge zur Geschichte des Rossendorfer Forschungsreaktors*, als Manuskript gedruckt (Dresden 2008).
- ¹² Klaus Wagner, „Der Bereich Radiochemie im ZfK Rossendorf“, *Kernenergie* 4 (1961), S. 990.
- ¹³ Karl Jantsch, „Herstellung radioaktiver Präparate im ZfK Rossendorf“, in: VKTA, *Beiträge*, Abschnitt 6.4.
- ¹⁴ Marianne Bubner, Lothar Schmidt, *Die Synthese I4C – markierter Verbindungen* (Leipzig 1966).
- ¹⁵ Rudolf Münze, „Spezielle Fragen der Produktion radioaktiver Nuklide“, *Isotopentechnik* 2 (1962), S. 23; Rudolf Münze, Lutz Baraniak, Günther Reinhard, Wolfgang Leuschke, „Herstellung von trägerfreien ³²P im Produktionsmaßstab“, *Kernenergie* 6 (1963), S. 489-493; Rudolf Münze, „Produktion radioaktiver Isotope und markierter Verbindungen: 10 Jahre Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf“, *Spektrum* 11 (1965), S. 489-490.
- ¹⁶ Rudolf Münze, Lutz Baraniak, Günther Reinhard, Wolfgang Leuschke, „Herstellung von trägerfreien ³²P im Produktionsmaßstab“, *Kernenergie* 6 (1963), S. 489-493.
- ¹⁷ Karl Jantsch, Dieter Novotny, „Das Technologische Zentrum – eine neue Anlage zur Herstellung radioaktiver Erzeugnisse im ZfK Rossendorf“, *Isotopenpraxis* 12 (1976), S. 253-257.
- ¹⁸ Jantsch, „Herstellung“.
- ¹⁹ Jantsch, „Herstellung“.
- ²⁰ Rudolf Münze, Oswald Hladik, Gerd Bernhard, Wolfgang Boeßert, Rolf Schwarzbach, „Large Scale Production of Fission ⁹⁹Mo by Using Fuel Elements of a Research Reactor as Starting Material“, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* 35 (1984), S. 749-754; siehe auch: Gerd Bernhard, Wolfgang Boeßert, Oswald Hladik, „Eine Technologie zur Spaltmolybdänerzeugung aus bestrahlten Natururaniumtargets“, *Report ZfK* 632 (1988); Wolfgang Boeßert, Gerd Bernhard, Oswald Hladik, „An Advanced Modular Hot Cell Technique“, *Isotopenpraxis* 26 (1990), S. 3.
- ²¹ Gesetz über die Anwendung der Atomenergie und den Schutz vor ihren Gefahren – Atomenergiegesetz – Gesetzblatt der DDR, Teil I, Nr. 34 (1983); Anordnung über die Erteilung der Strahlenschutzgenehmigung für Kernanlagen – Kernanlagen-Genehmigungsordnung – Gesetzblatt der DDR, Teil I, Nr. 21130719979; Atomgesetz mit Verordnungen, 13. Auflage (Baden-Baden 1990).

- ²² Gerd Bernhard, Wolfgang Boeßert, Oswald Hladik, „Zur Auflösung aluminiumgemantelter Brennelemente“, *Kernenergie* 27 (1984), S. 27-29; Rolf Schwarzbach, Oswald Hladik, „Ein Filter zur Luftüberwachung auf Radioiod“, *Kernenergie* 27 (1983), S. 11.
- ²³ Gerd Bernhard, Heidemarie Friedrich, Wolfgang Boeßert, Armin Eckardt, „Betriebsergebnisse und Untersuchungen zur Stilllegung der Anlage zur Molybdän-99-Produktion Rossendorf AMOR“, *Report FZR-93-04*.
- ²⁴ Gerhard Wagner: persönliche Mitteilung (7.7.2011).
- ²⁵ Oswald Hladik, Gerd Bernhard, Wolfgang Boeßert, Thomas Grahner, Rudolf Münze, „The Recovery of Uranium from the Waste Solution of Fission ⁹⁹Mo-Produktion“, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* 38 (1987), S. 619-622; siehe auch Wolfgang Boeßert, Oswald Hladik, *DDR Patent 153579* (1982).
- ²⁶ Thomas Grahner, Gerd Bernhard, Wolfgang Boeßert, Oswald Hladik, „Operation Results and Experience with the Uranium Recovery Facility AMOR II“, *Isotopenpraxis* 26 (1990), S. 167-169.
- ²⁷ Gerd Bernhard, Wolfgang Boeßert, Thomas Grahner, Oswald Hladik, Reiner Krompass, „A Fuel Cycle of the Fission Molybdenum Production“, *Isotopenpraxis* 26 (1990), S. 93-97; Reiner Krompass, Rolf Eichler, Reinhard Winkel; Wolfgang Kurze, Gudrun Hüttig, „Zur Herstellung von Targetkassetten für die ⁹⁹Mo-Gewinnung im Rossendorfer Forschungsreaktor“, *Kernenergie* 31 (1988), S. 142.
- ²⁸ C. Buck, C.R. Howells, T.A. Parry, B.F. Warner, J.A. Williams, „Chemical Processes at U.K.A.E.A. Works, Dounray“, *Proceedings of the Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, (Genf 1959), Paper 82, zit. in: Siegfried Niese, Manfred Beer, Dieter Naumann, Ralf Köpsel, *Extraktive Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe* (Berlin 1960).
- ²⁹ Jantsch, „Herstellung“.
- ³⁰ Schreiben des Ministers der Chemischen Industrie an den Präsidenten der Akademie der Wissenschaften der DDR (24.10.1972): ZfK-Archiv, 0/1009, zit. in: Johannes Römer, *Entwurf zur Geschichte des Bereichs Radiochemie des ZfK Rossendorf: Arbeitsbericht zum Vorhaben 4-7541.82-FZR/302* (Dresden 1993).
- ³¹ Römer, *Entwurf*.
- ³² Bernd Johannsen, Hartmut Spies, *Chemische und radiopharmakologische Untersuchungen von Technetiumverbindungen unter besonderer Berücksichtigung von Technetium-Thiol-Komplexen*, Dissertation zur Promotion B, TU Dresden (Dresden 1981).
- ³³ Gerd Beyer, Erhard Mittag, „Laudatio Rudolf Münze“, *Isotopenpraxis* 26 (1990), S. 89-90.
- ³⁴ *Scenario for sustainable molybdenum 99 production in Europe*. Position paper by CEA, NRG, SCK·CEN & TUM (13.4.2010), <<http://www.oecd-nea.org/med-radio/docs/Multi-sources%20Mo-99%20production%20scenario%20for%20Europe%20%20Position%20paper-CEA-NRG-TUM-SCK%20CEN.pdf>> (10.7.2011).
- ³⁵ Ali Sameh, Hans Joachim Ache, „Production Techniques of Fission Molybdenum-99“, *Radiochemica Acta* 41 (1987), S. 65-72.

³⁶ Manfred Gaillard, *Versorgungsengpässe in der Nuklearmedizin* <<http://www.bdn-online.de/versorgungsengp%C3%A4sse-in-der-nuklearmedizin>> (23.10.2010).