

FORSCHUNGSZENTRUM
ROSSENDORF e.V.

FZR

Archiv-Ex.:
FZR 93 - 04
Januar 1993

Betriebsergebnisse
und Untersuchungen zur Stilllegung der
Anlage zur Molybdän-99-produktion
Rossendorf
- AMOR - I -

Herausgeber: G. Bernhard

Forschungszentrum
Rossendorf e.V.
- Zentralbibliothek -
Postfach 10 011
O - 8051 Dresden

**Betriebsergebnisse
und Untersuchungen zur Stilllegung der
Anlage zur Molybdänproduktion
Rossendorf - AMOR-I -**

Herausgeber: G. Bernhard

Autoren: G. Bernhard FZR 1)
H. Friedrich FZR 1)
W. Boeßert VKTA 2)
A. Eckardt VKTA 2)

1) Forschungszentrum Rossendorf e.V.

2) Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V.

Januar 1993

Zusammenfassung

Betriebsergebnisse und Untersuchungen zur Stilllegung der Anlage zur Molybdän-99-Produktion Rossendorf - AMOR-I -

Die Anlage AMOR-I diente der chemischen Aufarbeitung von originalen Forschungsreaktorbrennelementen zur Gewinnung von Spaltmolybdän. Während der zehnjährigen Betriebszeit wurden in über 400 Produktionsruns $8,5 \cdot 10^{15}$ Bq ^{99}Mo gewonnen.

Seit 1991 ist die Produktion von Spaltmolybdän eingestellt. Im Bericht werden die Betriebsergebnisse der Anlage dargestellt, die Zuverlässigkeit der Technologie bewertet und Aussagen zur Stilllegungsstrategie gemacht.

Es sind Untersuchungen zur Adsorption von Spaltprodukten auf Werkstoffoberflächen ausgewertet, Möglichkeiten der Dekontamination aufgezeigt und Aussagen zur gleichzeitigen Wirkung von radioaktiver Strahlung und chemischem Agens auf Werkstoffe gegeben.

Damit wurden die Voraussetzungen zur Einleitung des erforderlichen Genehmigungsverfahrens geschaffen.

Summary

Operation Results and Investigations on Decommissioning of the Molybdenum-99 Production Plant Rossendorf - AMOR-I -

Original fuel elements of a research reactor were reprocessed for fission molybdenum production in the facility AMOR-I.

In a 10 years operation $8.5 \cdot 10^{15}$ Bq ^{99}Mo were produced in more than 400 runs.

The production results and many experiences were described in this report.

Further a view is given on the strategy of decommissioning. There are shown results of fission product adsorption on and desorption from material surfaces. Possibilities of decontamination are described. The simultaneous effect of corrosion and radioactive radiation on different materials is discussed.

This paper is a basis of the licence procedure for decommissioning of the AMOR-I-plant.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Status der Anlage	4
2.1. Technologie	4
2.2. Räumliche Zuordnung	8
2.2.1. Zellsysteme	9
2.2.2. Lagersysteme	12
2.3. Gerätetechnische Ausrüstung und Materialauswahl	18
2.4. Genehmigungsrechtlicher Zustand	24
3. Untersuchungen zur Stilllegung	29
3.1. Betriebsergebnisse der Anlage	29
3.2. Bewertung der Standzeiten	35
3.2.1. Gerätetechnik	36
3.2.2. Materialien	41
3.2.3. Technologiebewertung im Hinblick auf eine Neuanlage	42
3.3. Erstellung des Kontaminationskatasters	44
3.4. Dekontaminationsuntersuchungen	50
3.4.1. Dekontamination der Spaltprodukte von Stahloberflächen im Labormaßstab	51
3.4.2. Dekontamination von originalen Anlagenteilen	53
3.5. Das Abklinglager als technologische Einheit	58
3.6. Entwicklung und Testung von Demontagetechnologien	62
4. Stilllegungsstrategie	68
5. Zusammenfassung	70
6. Literatur	72

1. Einleitung

Neben der dominierenden Nutzung der Kernspaltungsreaktion zur Energiegewinnung wird diese Reaktion innerhalb entwickelter Volkswirtschaften auch zur Erzeugung radioaktiver Nuklide ausgenutzt.

Gegenwärtiges Hauptgebiet der Anwendung dieser radioaktiven Nuklide ist die nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie.

Durch die Bereitstellung neuartiger Radiopharmaka auf der Basis von Technetium-99m ist das Spektrum dieser Untersuchungsmethoden erweitert und verbessert worden.

Dieses Technetiumisotop ist nur auf künstlichem Wege darstellbar. ^{99m}Tc ist das Tochternuklid des ^{99}Mo . Die Gewinnung dieses nuklearmedizinisch relevanten Nuklides ist daher ein Problem der Herstellung von ^{99}Mo (Abbildung 1).

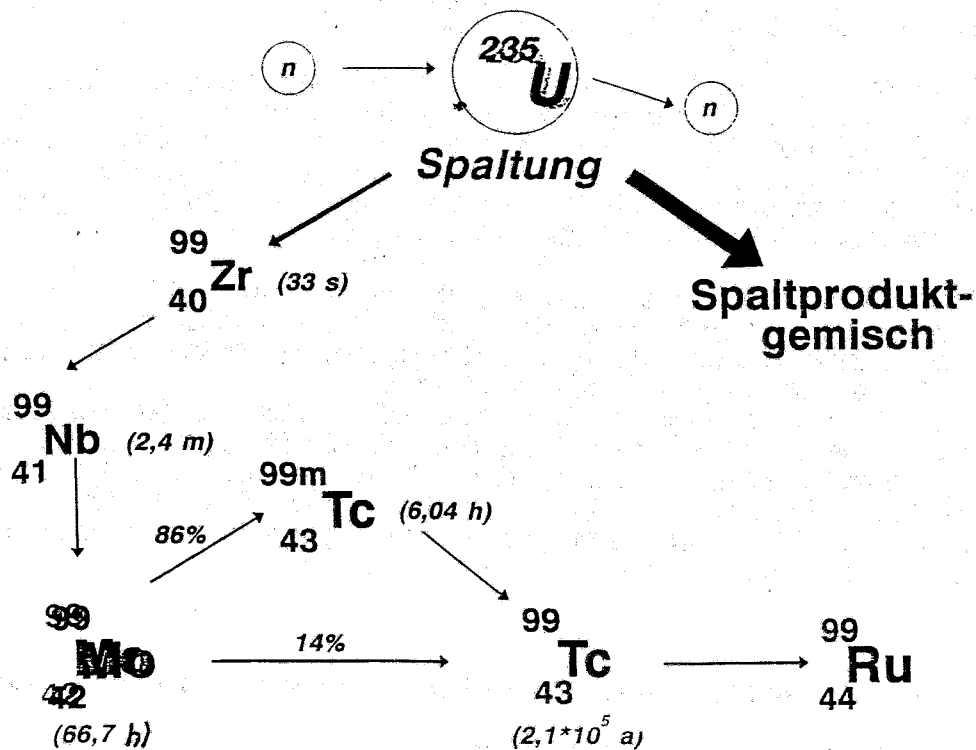


Abb. 1 Herstellung von ^{99}Mo durch Kernspaltung

^{99}Mo ist durch die Neutronenaktivierung des natürlichen Molybdäns oder durch die Kernspaltung des Uranium-235 erzeugbar. Die Produktionsmethode für ^{99}Mo mittels der (n,f) -Kernreaktion bietet die Möglichkeit, gemessen an der Aktivitätshöhe und der spezifischen Aktivität ein Produkt zur Herstellung der $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ -Generatoren zur Verfügung zu stellen, das man mit anderen Methoden nicht in der Lage ist zu erzeugen. Außerdem

können noch weitere Nuklide aus dem Spaltproduktgemisch separiert werden.

Das ehemalige Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf (ZfK) war eine der ersten Produktionsstätten, die die Kernspaltungsreaktion zur Gewinnung radioaktiver Nuklide für den direkten Einsatz in der Medizin angewendet hat.

Mit der Entscheidung, eine Produktionsanlage für Spaltmolybdän im "large scale-Niveau" zu errichten und zu betreiben, war es die Konsequenz, diese Anlage im atomrechtlichen Sinn als Kernanlage einzustufen.

In der Anlage zur Molybdänproduktion Rossendorf (AMOR) wurden seit 1981 im Produktionsregime originale aluminiumgemantelte Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR) zum Zwecke der Spaltmolybdänerzeugung chemisch aufgearbeitet.

Die Radioaktivität der aufzuarbeitenden Spaltproduktlösung betrug zum Produktionszeitpunkt ca. 10^{15} Bq und enthielt Kernmaterial mit einem Anreicherungsgrad von ca. 35% ^{235}U .

Das Genehmigungsverfahren für den Produktionsbetrieb dieser Anlage erfolgte auf der Grundlage des Gesetzes über die Anwendung der Atomenergie und zum Schutz vor ihren Gefahren - Atomenergiewirtschaftsgesetz - /1/, entsprechend der Anordnung über die Erteilung der Strahlenschutzgenehmigung für Kernanlagen - Kernanlagen-genehmigungsanordnung - /2/ der ehemaligen DDR.

Der Produktionsbetrieb wurde zum 26.11.1990 eingestellt.

Aufgrund des noch in der Anlage befindlichen Aktivitätsinventares fordert die Genehmigungsbehörde die Stilllegung entsprechend des nun gültigen Atomgesetzes /3/ durchzuführen.

Unter dem Begriff Stilllegung der Anlage AMOR-I sind im folgenden alle Maßnahmen zu verstehen, die nach dem Abschalten und Entleeren der Anlage durchgeführt werden, d.h. Dekontamination, Demontage sowie Konditionierung und Abtransport radioaktiver Abfälle. Der Standort verbleibt auch nach der Beseitigung bzw. Freigabe der Gebäude unter den Bedingungen des Atomrechtes.

Es war ein Ziel des vorliegenden Berichtes Aussagen zu erstellen

- zu den Betriebsergebnissen der Anlage
- zu allgemeingültigen Aspekten der Stilllegung von nuklear-chemischen Anlagen,
- zu der Genehmigungsfähigkeit der notwendigen Maßnahmen, gerade im Hinblick auf die Änderung der gesetzlichen Grundlagen in der Phase der Stilllegung,
- zur technisch-technologischen Durchführbarkeit der Stilllegung,
- zur Entsorgung der anfallenden radioaktiven Reststoffe.
- zur Bewertung der Standzeiten und der Zuverlässigkeit der angewandten Technologien auch im Hinblick auf zukünftige nuklear-chemische Anlagen,
- zur Entwicklung des Prozeß- und Anlagendesign von Neuanlagen in

- Bezug auf ihre "Stilllegungsfreundlichkeit",
- zur Adsorption von Spaltprodukten auf den unterschiedlichen Werkstoffoberflächen und ihre Verteilung im Prozeßcontainment in Abhängigkeit von den Verfahrensbedingungen

2. Status der Anlage

Infolge der Neugliederung des Forschungsstandortes Rossendorf ab 01.01.1992 in das Forschungszentrum Rossendorf e.V. (FZR) und in den Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik e.V. (VKTA) wurde der VKTA Eigentümer aller kerntechnischen Anlagen am Standort, so auch der AMOR Anlagen.

Ein Zielpunkt der Arbeit des VKTA ist dabei, die Denuklearisierung des Forschungsstandortes Rossendorf voranzubringen.

Nach der Durchführung des letzten Produktionsruns in der AMOR-I am 19.11.1990 wurden alle festen frischen Kernbrennstoffe in die vorgesehenen Lager überführt. Alle Prozeßleitungen und die zugehörigen Lagerbehälter wurden entleert. Diese Lösungen wurden im Abklinglager gesammelt. Gleichfalls wurden alle nichtverwendeten Betriebschemikalien aus den Anlagen entfernt und alle festen und flüssigen Betriebsabfälle zur Abfallbearbeitung verbracht. Ansonsten erfolgten bisher keine Demontagen oder Veränderungen der Anlagensysteme.

Die Probennahme zur Kontrolle des in den Abklinglagerbehältern befindlichen Kernmaterials muß technologisch auch weiterhin in der Heißen Zelle 2 erfolgen. Ein Abbau von Prozeßeinrichtungen vor der vollständigen Entleerung des Abklinglagers (durch Uranrückgewinnung über Anlage AMOR-II) ist deshalb nicht möglich. Gleichfalls werden Rohrleitungssysteme und Behälter in der Heißen Zelle dabei wieder mit Prozeßlösung kontaminiert.

2.1 Technologie

Die Anlage AMOR (Anlage zur Molybdänproduktion Rossendorf) besteht aus den Teilen

AMOR-I: Anlage zur ^{99}Mo -Gewinnung,
AMOR-II : Anlage zur Rückgewinnung des unverbrauchten Urans,
AMOR-III: Anlage zur Herstellung von Targetelementen /4/.

Die Gesamttechnologie, in Abbildung 2 dargestellt, die einen Kernbrennstoffzyklus (Brennelementauflösung, Uranrückgewinnung, Brennelementherstellung) verwirklicht, wird bestimmt von der Dimension, Zusammensetzung und Konstruktion des Bestrahlungstargets, der Höhe der zu bearbeitenden Radioaktivität, der Menge des eingesetzten spaltbaren Materials und der Aggressivität der verwendeten Chemikalien.

Schnittpunkte der Technologien der Einzelanlagen bilden die Lagersysteme, die eine unbeeinflusste Bearbeitung des Kernmaterials in den Einzelanlagen sichern.

Die weiteren Ausführungen beschränken sich auf die Anlage AMOR-I.

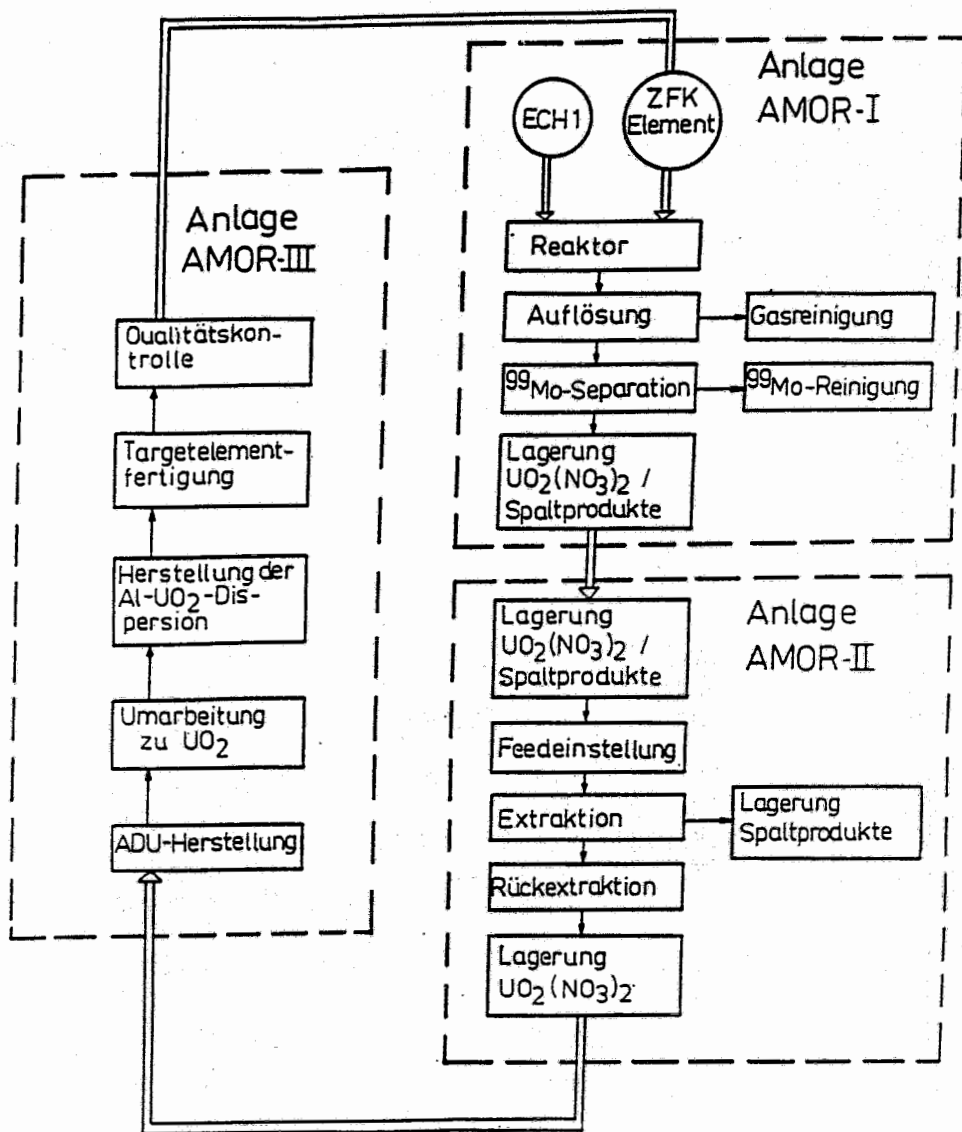


Abb. 2 Gesamttechnologie der AMOR-Anlage

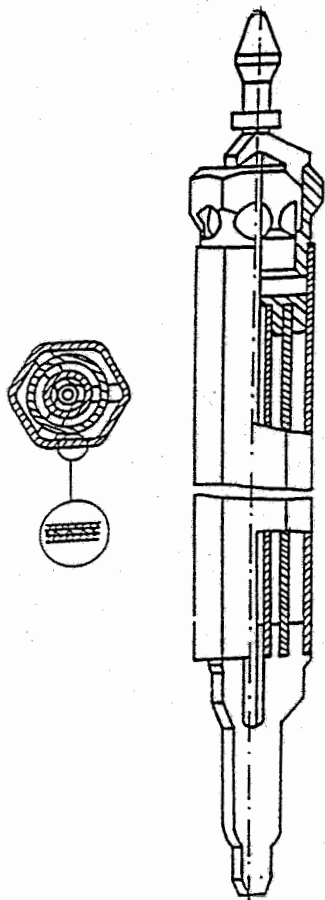
Die "large scale" Produktion von Spaltmolybdän in Rossendorf war charakterisiert durch die Aufarbeitung eines ca. 200 h im Reaktorcore eingesetzten originalen Brennelementes des Rossendorfer Forschungsreaktors /5/.

Das Brennelement (Abbildung 3) besteht aus drei konzentrisch angeordneten Doppelwandrohren. Zwischen den Wandungen dieser Aluminiumrohre befindet sich eine Matrix aus einer UAl₃-Legierung, bei neueren Fabrikaten eine Matrix aus UO₂-Al-Grieß.

Die Anreicherung des Matrixurans an Uranium-235 beträgt 36%. Das Aluminium ist zur Erhöhung der Festigkeit mit Silizium stabilisiert.

Der Urangehalt im Brennelement liegt je nach Typ im Bereich von

105 - 120 g, der Aluminiumanteil (mit Kopf- und Fußstück) bei 900 g.



Gesamtlänge	840 mm
aktive Länge	640 mm
Durchmesser außen	37 mm
Masse Uran	120 g
Masse Uran-235	43 g
Masse Aluminium ca.	900 g
Bestrahlungszeit	200 h
Neutronenfluß	$5 \cdot 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Abb. 3 WWR-M Brennelement

Das technologische Fließbild der AMOR-I zeigt die Abbildung 4. Nach einer Regelabkühlzeit von 48 h wird das Brennelement, nachdem Kopf- und Fußstück mechanisch abgetrennt wurden, in äquimolekularer, halbkonzentrierter Salpetersäure unter Quecksilberkatalyse vollständig aufgelöst /6/. Die Radioaktivitätskonzentration der Lösung beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. $3,7 \cdot 10^{13} \text{ Bq/l}$ (1000 Ci/l).

Das gebildete Reaktionsgas besteht aus Stickstoffoxiden, Stickstoff, Wasserstoff, Spuren von gasförmigen radioaktiven Xenon und Iod neben mitgerissenen Aerosolen. Das Gas wird durch entsprechende Filter- und Reaktionssysteme gereinigt.

Nach dem Löseprozeß ist die Säurekonzentration der Prozeßlösung (Aluminiumnitrat - Uranylнитrat - gelöste Spaltprodukte), deren Zusammensetzung in Tabelle 1 angegeben ist, 0,1 - 0,3 M.

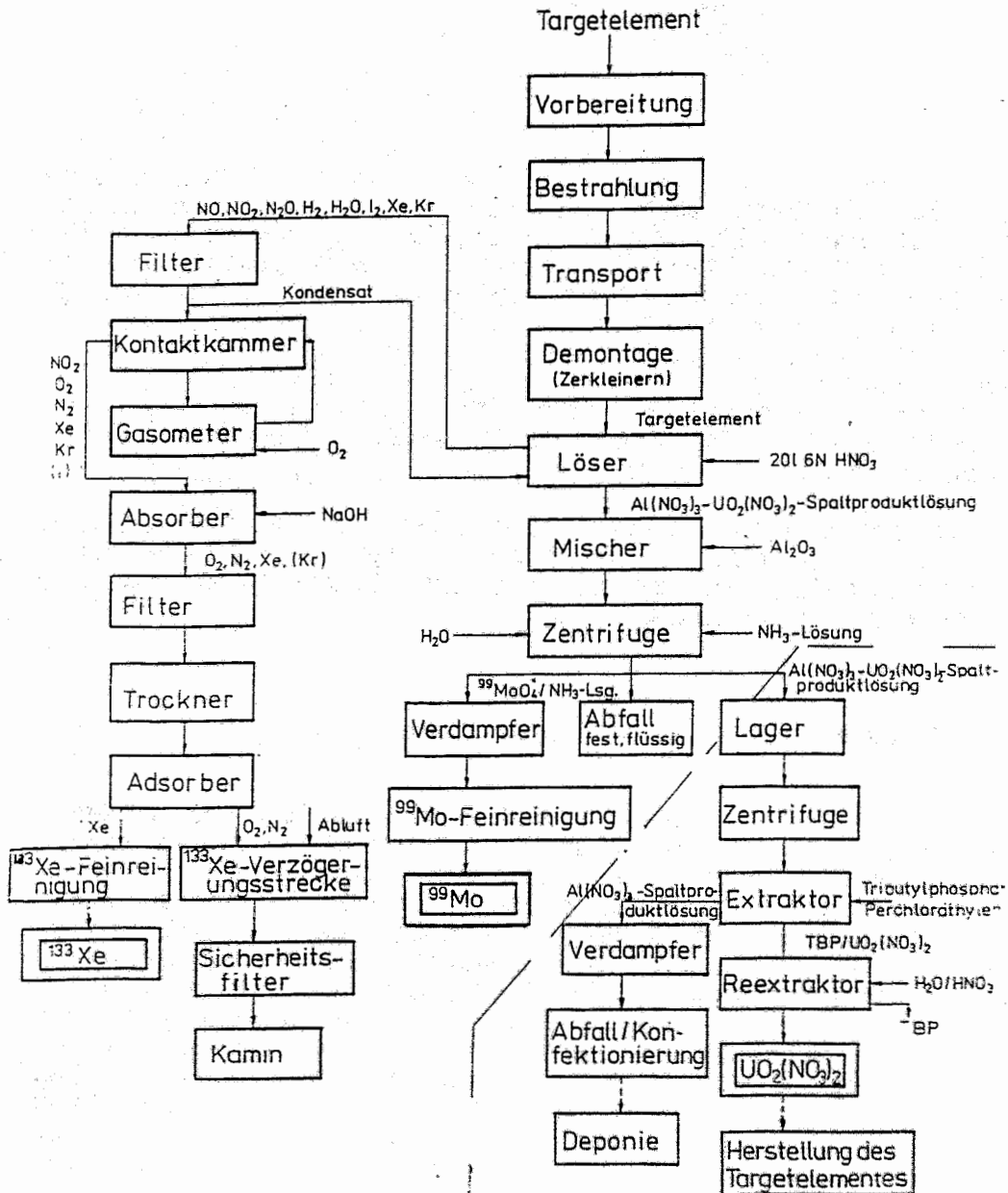


Abb. 4 Technologisches Fließbild der AMOR-I Anlage

Tab.1 Zusammensetzung der Prozeßlösung

Substanz	Konzentration (g/l)
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	329,4
$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$	8,5
$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$	0,31
Spaltprodukte	0,027
Pu	0,001
Si/SiO ₂	0,5...1
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	0,3

Die Abtrennung des ^{99}Mo erfolgt im Batch-Verfahren durch Ionenaustausch an Aluminiumoxid. Nach dem Waschen des beladenen Ionenaustauschers wird das Spaltmolybdän durch Elution mit Ammoniaklösung desorbiert. Zum Erreichen der erforderlichen Qualitätsparameter muß dieses Roheluat feingereinigt werden. Dies geschieht durch einen säulenchromatographischen und einen thermochromatographischen Prozeßschritt.

Eine chemisch und radiochemisch reine ^{99}Mo -Lösung ist das Endprodukt des Prozesses. Diese wird zur Herstellung von $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatoren verwendet.

Während des kurzzeitigen Reaktoreinsatzes des Brennelements werden nur ca. 1% des Urans verbraucht. Die Prozeßlösung wird 3 - 4 Jahre in einem Lagersystem stationiert, bevor in der Anlage AMOR-II das Uran zurückgewonnen wird.

2.2 Räumliche Zuordnung

Der Anlagenkomplex AMOR-I wurde in vorhandene Zellen des Technologischen Zentrums (TZ II) eingebaut. Das TZ II ist ein dreistöckiger Geschosbau, der überwiegend für den Umgang mit radioaktiven Stoffen genutzt wird. Dieser liegt in der "Inneren Zone" des Forschungsstandortes (Abbildung 5), in dem sich vor allem die Kernanlagen und radiochemische Einrichtungen befinden. Das Gebäude ist über das Straßensystem mit Schwertransportern zu erreichen.

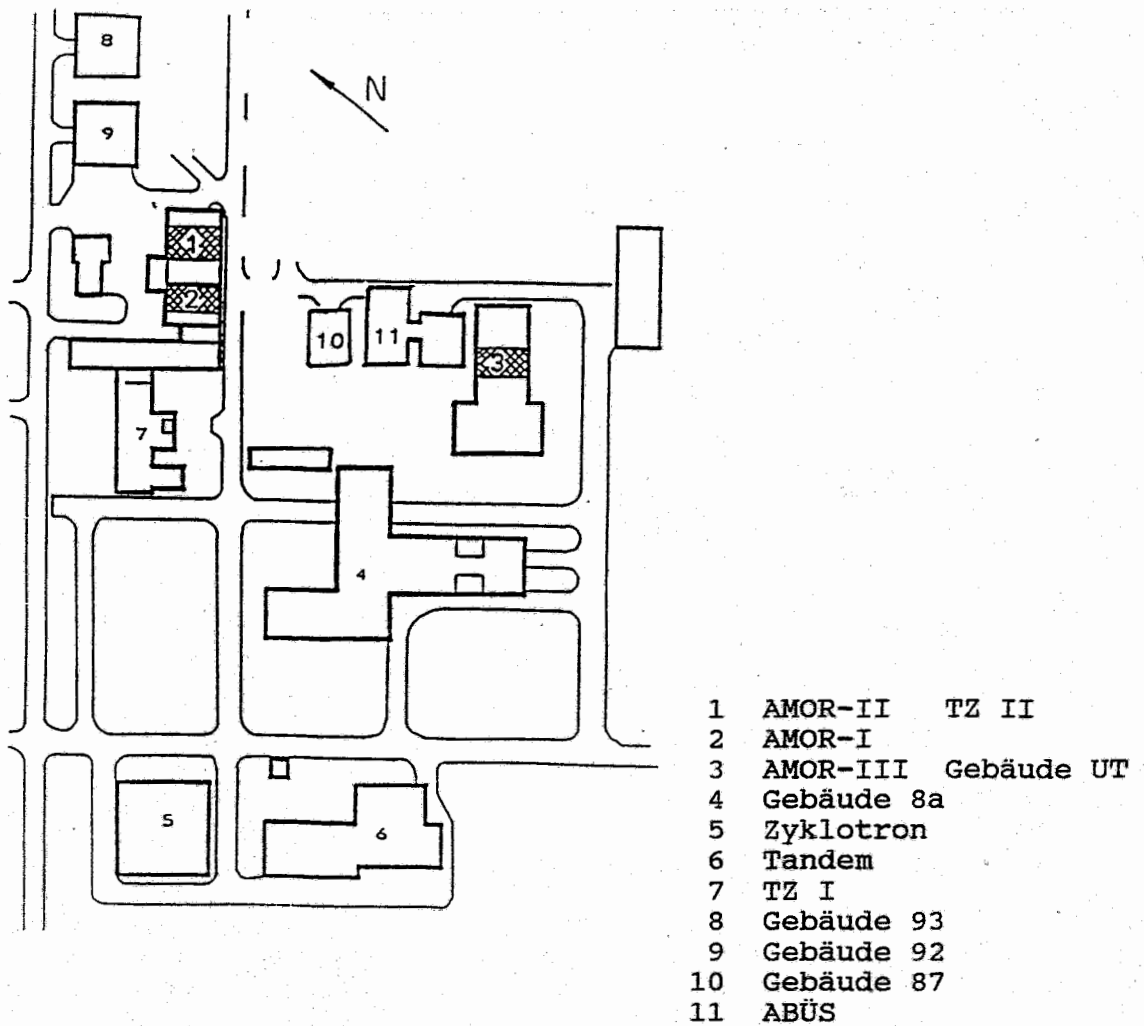


Abb. 5 Lage der Kernanlagen AMOR am Forschungsstandort

2.2.1 Zellensysteme

Zur Installation der Prozeßtechnologie standen "Heiße Zellen" (HZ) (Abschirmung $3,7 \cdot 10^{14}$ Bq ^{60}Co -Äquivalent, entspricht 1 m Schwerbeton) und "Warme Zellen" (WZ) (Abschirmung $3,7 \cdot 10^{12}$ Bq ^{60}Co -Äquivalent, entspricht 370 mm Gußstahlsteine) zur Verfügung (Abbildung 6). Der Hauptteil der AMOR-I-Technologie ist in zwei Heiße Zellen (Vorbereitungszelle, Prozeßzelle) und die Warmen Zellen 3 und 4 im Erdgeschoß des Gebäudes eingebaut. Außerdem wurde die rekonstruierte Mo-Feinreinigungsanlage in die Warme Zelle 15 im Kellergeschoß des Gebäudes installiert.

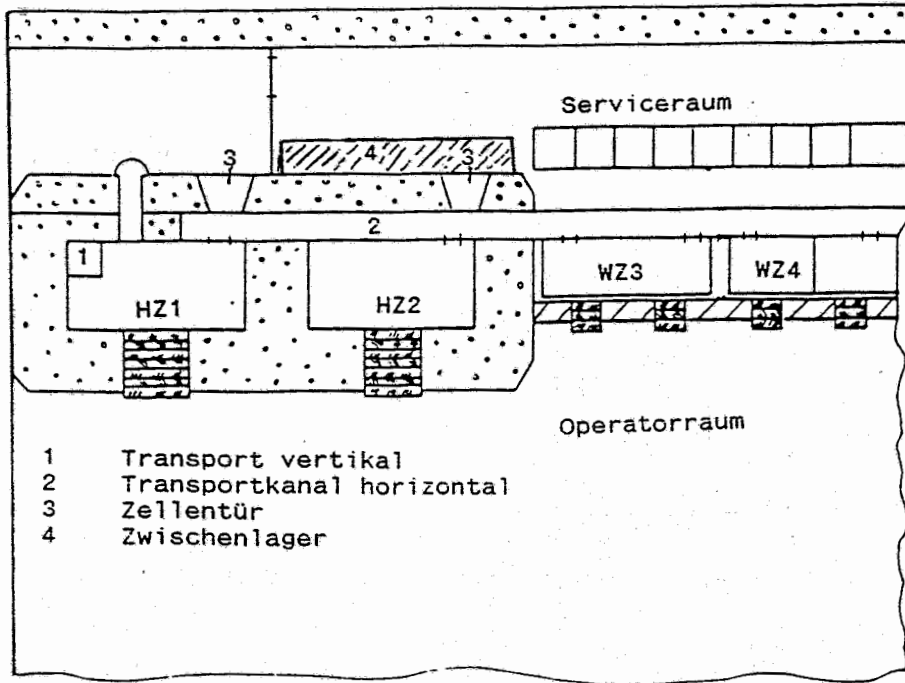


Abb. 6 Zellensysteme AMOR-I

* Heiße Zellen (HZ 1, 2):

Die lichten Abmessungen dieser Zellen betragen 2,0 x 3,0 x 2,4 m (Tiefe x Breite x Höhe). Die Wandung besteht allseitig aus 1 m Schwebeton und ist nach innen mit epoxidharzbeschichteten Normalstahl ausgekleidet. Die Bodenwanne der Zelle ist aus Edelstahl. Die Fernbedienung der Prozeßapparatur erfolgt über Master-Slave-Manipulatoren. Die Zuleitungen der inaktiven Prozeßmedien erfolgt vom Operatorraum aus. Einen Eindruck davon vermittelt Abbildung 7. Die aktiven Prozeßmedien werden in abgeschirmten Kanälen zu den Warmen Zellen und zum Zwischen- oder Abklinglager geführt.

Die Zelle ist mit einem in der Zellenlängsrichtung verfahrbaren Hebezeug (500 kp) ausgerüstet. Für das Ein- und Ausschleusen kleinerer Geräte und Produktionshilfsmittel (bis ca. 5 kg) stand ein Horizontalförderer, der sämtliche Zellen miteinander verbindet, zur Verfügung. Die Schleusung sperriger Geräte (notwendig nur bei Ausfall wechselbarer Geräte) erfolgte mit einer fernbedienten Hilfseinrichtung (fahrbarer Hubwagen) über die Tür in der Zellenrückwand in Richtung Serviceraum.

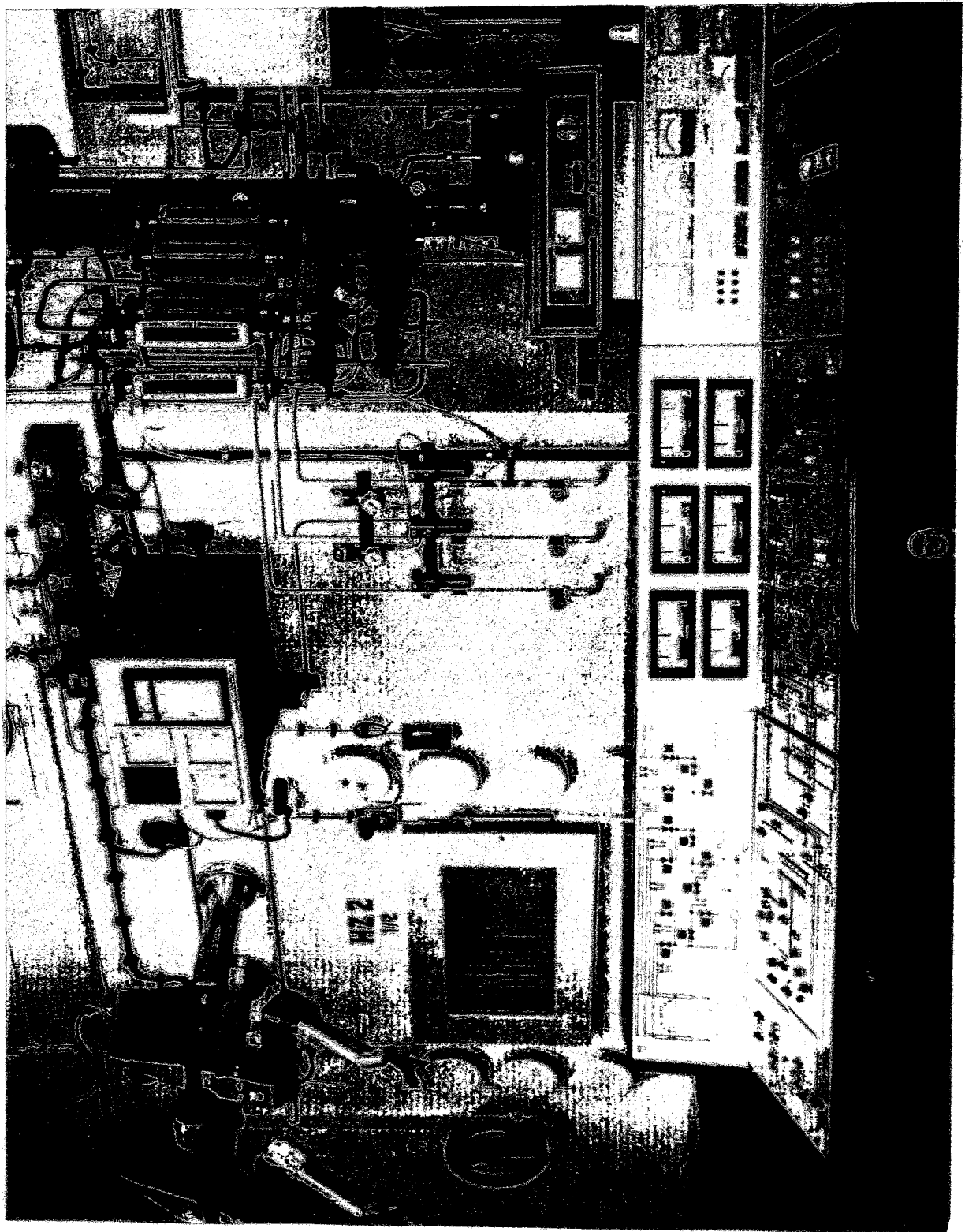


Abb. 7 Operatorraum HZ

Die chemisch-verfahrenstechnischen Hauptprozesse der AMOR-I-Anlage (Auflösung des Brennelements, Gasreinigung, Spaltmolybdäntrennung) wurden in dieser Zelle durchgeführt. Die Abbildung 8 gibt einen Eindruck von der installierten Prozeßtechnik wieder. Das Bild dokumentiert die Anlage in der Bauphase und zeigt die räumliche Konzentriertheit.

* Warme Zellen (WZ 3, 4, 15)

Die lichten Abmessungen dieser Zellen betragen 1,0 m x 3,0 m x 2,0 m (Tiefe x Breite x Höhe). Das Zellengehäuse (Containment) ist in Normalstahl ausgeführt. Die Abschirmung zum Operatorraum besteht aus 370 mm bzw. 200 mm (ab Höhe 2 m) dicken Gußstahlsteinen. Zum Serviceraum ist die Zelle durch 700 mm dicke Betonsteine (ab 2 m Höhe durch 50 mm Bleisteine) abgeschirmt.

Zur Fernbedienung der Apparaturen stehen fünf Stabmanipulatoren je Zelle zur Verfügung (Abbildung 9).

Das Ausschleusen von defekten sperrigen Geräten ist nur durch einen Manneingriff über die Zellentür in Richtung Serviceraum möglich.

Die Zugabe inaktiver Prozeßmedien erfolgt über Rohrleitungen vom Operatorraum aus. Auch diese Zellen sind mit dem Horizontalförderer erreichbar.

Abbildung 10 zeigt die in den Zellen installierten Sublimationsöfen zur Feinreinigung der ^{99}Mo -Aktivität.

2.2.2 Lagersysteme

Die flüssigen Prozeßströme wurden während der Produktionsphase in Lagertanks innerhalb der Heißen Zelle gelagert.

Im Zuge der Produktionsnachbereitungsphase wurden die Flüssigkeiten dem Zwischenlager zugeführt. Der Gasraum über der Flüssigkeit wurde zur Wasserstoffverdünnung mit Luft gespült. War die Zwischenlagerkapazität erschöpft, wurden die am längsten stationierten Lösungen (am weitesten abgeklungenen) den Abklinglagertanks zugeleitet. Hier wurden die Lösungen 3 - 4 Jahre gelagert, ehe die Rückgewinnung des Urans in der Anlage AMOR-II erfolgen konnte (Auslegung der Abschirmung der Prozeßzellen dieser Anlage).



Abb. 8 Prozeßtechnik HZ 2

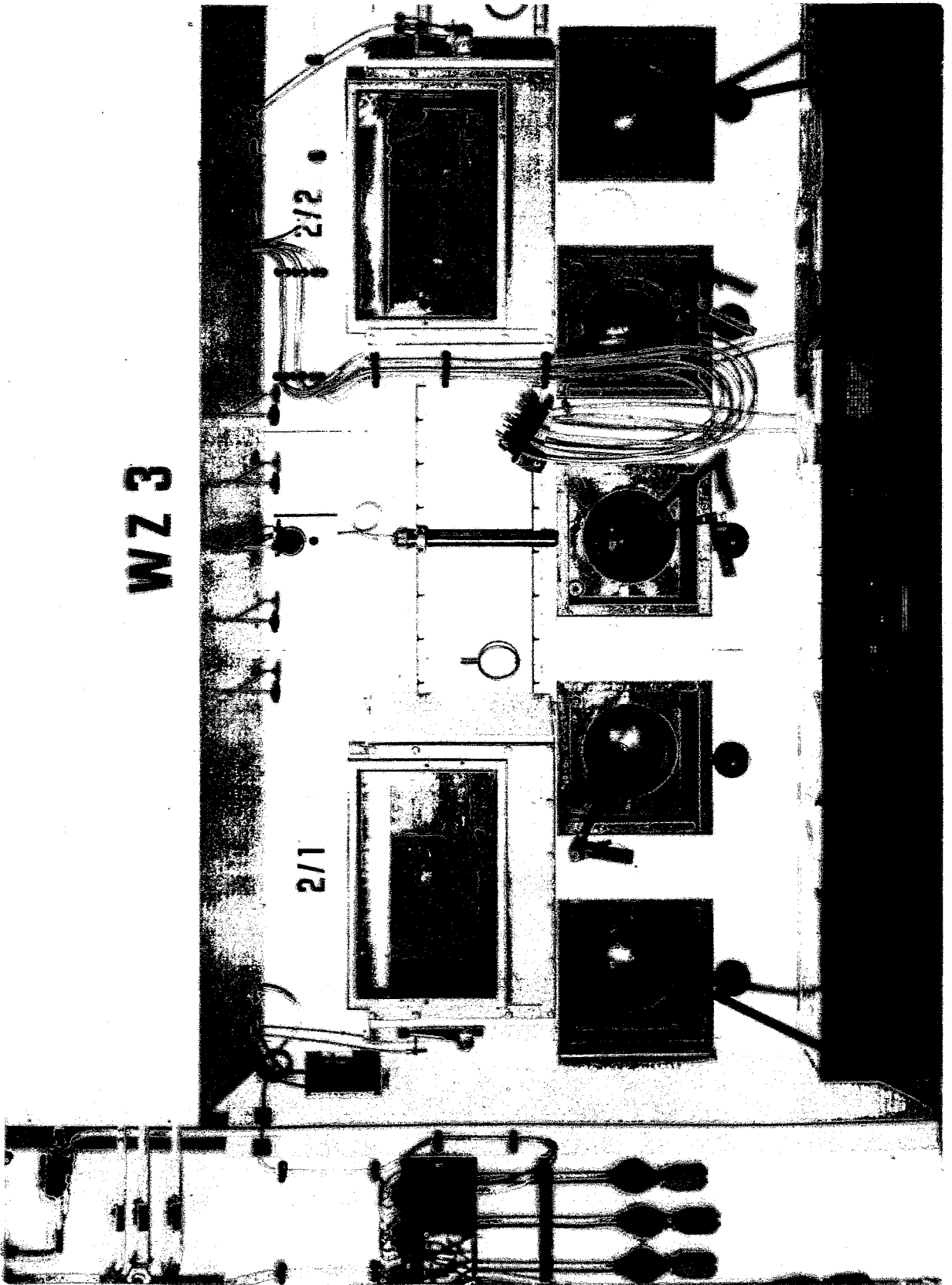


Abb. 9 Operatorraum WZ

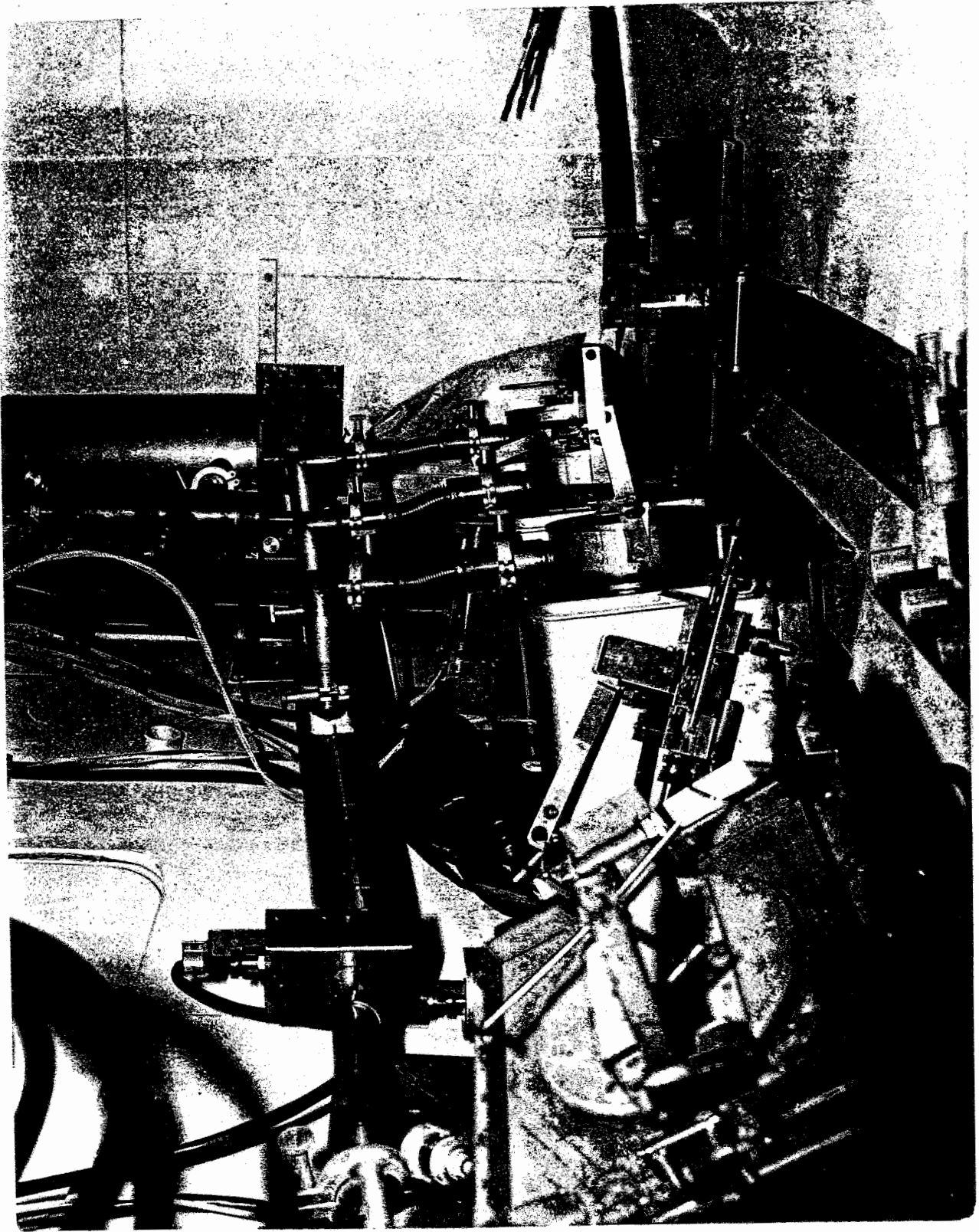
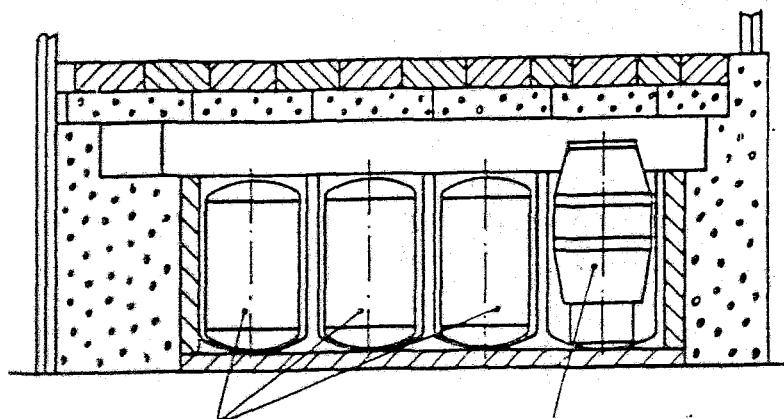
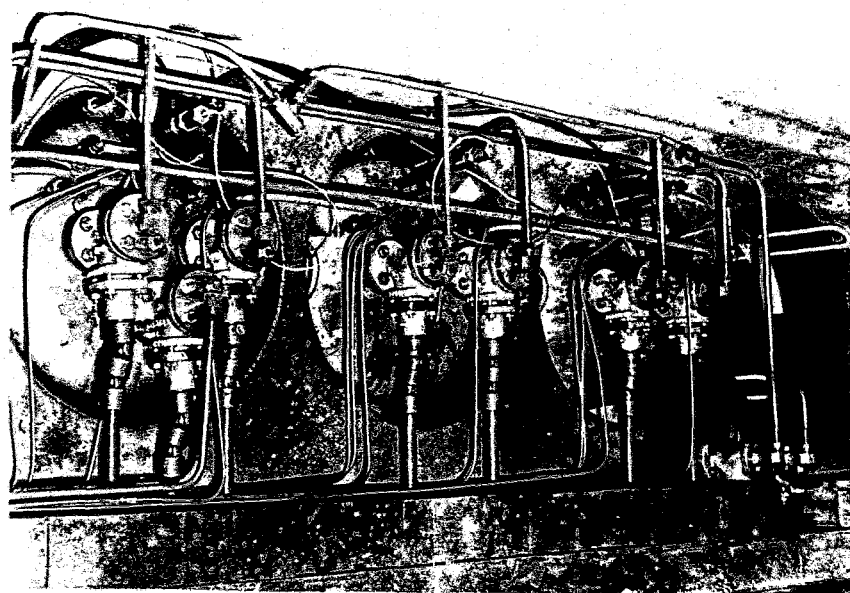


Abb. 10 Prozeßtechnik WZ 3

* Zwischenlager

Das Zwischenlager besteht aus drei abgeschirmten geschlossenen Behältern von ca. 100 l Fassungsvermögen. Diese Behälter sind mit Kühlungen ausgelegt und in je einem zugehörigen Sicherheitsbehälter installiert (Abbildung 11). In der ungekühlten Prozeßlösung wurde 2 Tage nach Aufarbeitung eine Temperatur von 40 °C gemessen und die Freisetzung von Wasserstoff nachgewiesen. Eine kombinierte Beton-Blei-Abschirmung umgibt die Einzelbehälter. Desweiteren ist ein Aufnahmebehälter für verbrauchte Filtermassen der Radioiodadsorptionsfilter integriert, um eine Zwischenlagerung vor der Aufarbeitung dieser Filtermassen zu gewährleisten. Die Medienförderung geschieht generell durch ein eingebautes Gefälle, unter Anwendung geringer Drücke und von Vakuum.



Lagerbehälter für
radioaktive Flüssigkeiten

Lagerbehälter für
Filtermassen

Abb. 11 Zwischenlager, Draufsicht, Schnitt

* Abklinglager

Das Abklinglager wurde als bauliche Einheit getrennt vom eigentlichen Produktionsgebäude errichtet. Über einen Kanal werden die Rohrleitungen zugeführt.

Das Lager ist in sechs Kammern unterteilt (Abbildung 12), die durch 200 mm dicke Betonwände voneinander abgetrennt sind. Vor diesen Kammern ist ein Raum angeordnet, der die zugehörigen Meß- und Regeleinrichtungen enthält. Dieser Raum ist durch eine 550 mm starke Betonwand abgeschirmt. Die Abschirmung der radioaktiven Strahlung nach oben wurde dadurch erreicht, daß das Lager mit einer 300 mm dicken Betonplatte abgedeckt wurde, auf welcher 1 m Kies aufgeschüttet ist.

Die eigentlichen Lagertanks bestehen aus Keramikprimärbehältern und zwei Sicherheitsbehältern aus Edelstahl. Diese sind ihrerseits in die jeweiligen Betonkammern eingelassen.

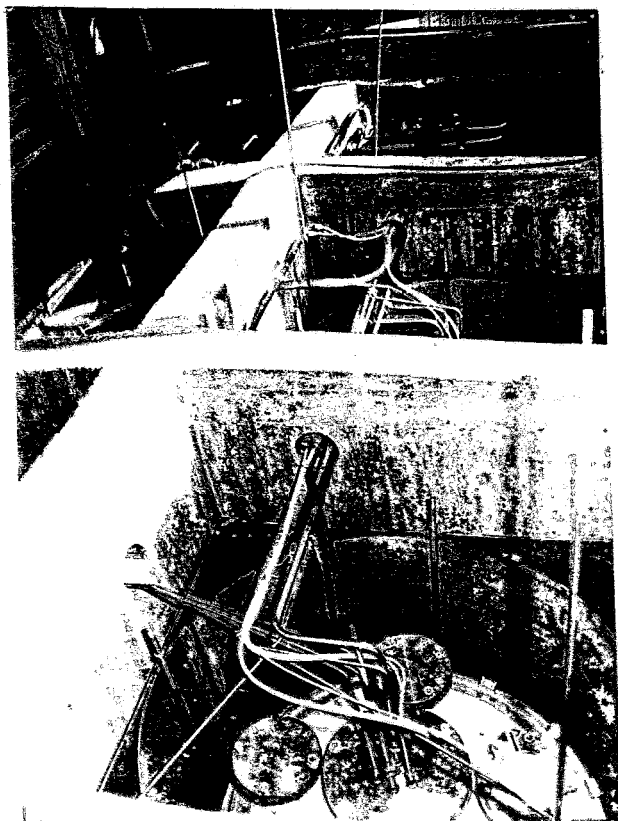


Abb. 12 Abklinglager, Ansicht

2.3. Gerätetechnische Ausrüstung und Materialauswahl

Die Beachtung der kerntechnischen Aspekte bei der Ausarbeitung der Verfahrenstechnologie zur Spaltmolybdänherstellung erforderte die Berücksichtigung folgender Kriterien:

- Korrosionsverhalten eingesetzter Werkstoffe,
- Strahlenstabilität der Materialien,
- Notwendigkeit der telemechanischen Fernbedienung,
- eingeschränkte Platzverhältnisse in abgeschirmten Zellen,
- Kritikalität.

Unter der Prämisse, daß der überwiegende Teil der Prozeßapparaturen mit salpetersauren Lösungen und Dämpfen beaufschlagt wurde, ist das Kriterium Korrosion von außerordentlicher Bedeutung. Im Hinblick darauf, daß ein Großteil des Rohrleitungssystems und der Einzelgeräte während der geplanten Betriebszeit nicht fernbedient ausgewechselt werden konnte, waren umfangreiche Prüfungen zur Werkstoffauswahl und zur Qualitätsbestimmung notwendig.

Die gesamte Anlage ist aus Edelstahl (X8CrNiTi18.10) gefertigt. Bei der Montage auf engstem Raum mußten auch Temperaturschwankungen und mechanische Belastungen der Anlagenteile im Betrieb berücksichtigt werden. Vor jedem Produktionsbetrieb erfolgte eine Gasdichtheitsprüfung von Anlagenbaugruppen (1.Containment) bei einem Prüfdruck von 0,05 MPa.

Die Auswahl von Abdichtmaterialien für notwendige Trennstellen im Apparate- und Leitungssystem ist von besonderer Bedeutung.

Für Trennstellen, die aus Montagegründen notwendig waren, wurde eine Stahl/Stahldichtung (bei ca. 250 Schweißkugelverbindungen) eingesetzt. Für Trennstellen, die regelmäßig bei Öffnen und Schließen ihre Funktion zuverlässig erfüllen mußten, wurde eine Stahl/Goldring/Stahldichtung benutzt (ca. 160 Trennstellen). Diese Trennstellen spielten gerade in der Konzeption der Demontagetchnologie eine wichtige Rolle.

Das Kriterium der Strahlenstabilität, gerade unter dem Einfluß korrosiver Medien, bedingte eine sorgfältige Auswahl insbesondere von organischen Materialien (Fette, Öle, Kunststoffe) und von elektrischen und elektronischen Bauteilen (Tabelle 2) bei deren unumgänglichen Einsatz.

Dies resultierte daraus, daß für den Produktionsbetrieb anhand der zu erwartenden Dosisleistung der aufzuarbeitenden Brennelemente die mittlere, jährlich akkumulierte Energiedosis für einen Referenzort (Zellenmitte, 1 m über den Boden) zu 10^4 - 10^5 Gy abgeschätzt wurde.

Mittels Bestrahlungen und chemischer Tests wurde sowohl die Strahlenstabilität, wie auch die chemische Resistenz bestimmt.

Für den Betrieb der AMOR-I wurden insbesondere die Strahlenbeständigkeit von eingesetzten Gummidichtungsringen, Elektrokabelisoleriematerial, Siliconöl, Polyphenylether und magnetoresistiver Sensoren untersucht. Dies geschah durch externe γ -Bestrahlung in

der Bestrahlungsanlage PANORAMA (^{60}Co ; 7,52 kGy/h) des ehemaligen ZfI Leipzig. Eingesetzte Dichtungsringe aus Neopren (NBR nach TGL 6365) erhalten ihre Elastizität bis zu einer Dosis von 10^5 Gy. Ab 10^6 Gy beginnen diese ihre Elastizität zu verlieren und ab 10^7 Gy haben sie keine elastischen Eigenschaften mehr. In gleicher Weise verhalten sich die Gummiisolierungen der Elektrokabel.

Die Forderung war, daß die in wechselbaren Geräten eingesetzten Kunststoffmaterialien bis zu einer Strahlenbelastung (γ -Dosis) von $5 \cdot 10^4$ Gy funktionstüchtig bleiben mußten. Ein Problem stellten die nicht fernbedient wechselbaren Elektroleitungen dar. Die Führung der gummiisolierten Kabel (bis Bestrahlungsdosis 10^7 Gy mechanisch beweglich; $> 10^7$ Gy Verkohlung der Isolierung) in mechanisch nicht belasteten, abgedeckten Trassen sollte die Voraussetzung sein für eine Betriebssicherheit innerhalb der geplanten Betriebszeit sein.

Siliconöl wurde als Übertragungsmedium in einem Druckmeßgerät eingesetzt. Ab einer Dosis von $2 \cdot 10^5$ Gy versagte das Meßgerät. Daraufhin wurde die chemische Beständigkeit und die Strahlenbeständigkeit von Polyphenylether untersucht, um diesen als Übertragungsmedium für Druckmeßgeräte und als Schmiermittel in pastöser Form einzusetzen. Polyphenylether ändert seine Eigenschaften nachweisbar ab 10^6 Gy. Von Bedeutung in geschlossenen Systemen ist die Bildung von Radiolysewasserstoff ($G_{\text{H}_2} = 0,025$). Als Schmiermittel behält dieser Ether seine Eigenschaften bis 10^8 Gy.

Magneto-resistive Sensoren wurden in der Anlage vor allem zur Detektion von Raum-Körper-Lagezuständen (Ventil auf/zu, Positionierung des Transportwagens) eingesetzt. Bis 10^6 Gy war die Funktionsfähigkeit des Bauteils erhalten.

Bei Abdichtungen notwendiger Trennstellen im Apparate- und Leitungssystem wurden ausschließlich korrosions- und strahlenbeständige Metalldichtungen verwendet. Durch die Vermeidung mechanisch bewegter Teile konnte eine erhöhte Betriebssicherheit erhalten werden.

Tab.2 *Eingesetzte Materialien*

Material	Strahlenbeständigkeit	Verwendung in Anlage
Edelstahl	$>10^9$ Gy	Leitungen, Geräte
Gummiisolierung (stationär)	10^8 Gy	Elektrokabel
Siliconöl	10^5 Gy	Druckmeßgerät
Polyphenylether (flüssig)	10^6 Gy	Druckmeßgerät
(pastös)	10^8 Gy	Schmiermittel
Gummiringe (Neopren)	10^5 Gy	Dichtung

Sensoren (magneto-resitiv)	10^6 Gy	Steuerung
Silikonkautschuk (Cenusil NG 3805)	10^4 Gy	Einmaldichtung
Polyamid	10^7 Gy	Steckerkörper
Glas	$>10^2$ Gy	Druckmeßgerät

Geräteteile aus strahleninstabile Materialien (Glas, Kautschuk, PVC-Schlauch) wurden nur zeitlich begrenzt benutzt (1-4 Runs).

Alle gerätetechnischen Komponenten wurden im Labor erprobt. Die Prozeßtechnologie der Heißen Zelle wurde vorher in einer Simulierzelle (Maßstab 1 : 1) installiert, die mit den originalen Manipulatoren und Optiken ausgerüstet war. In ihr konnten die einzelnen Baugruppen vormontiert, manipuliert und geprüft werden. Die Größe und Kompliziertheit der Anlage wird dadurch verdeutlicht, daß ca. 1100 m Rohrleitungen der verschiedenen Abmessungen im Kaltbiegeverfahren an Apparaturen und Behälter angepaßt werden mußten. Die Abbildung 13 macht die räumliche Konzentration der Apparaturen deutlich.

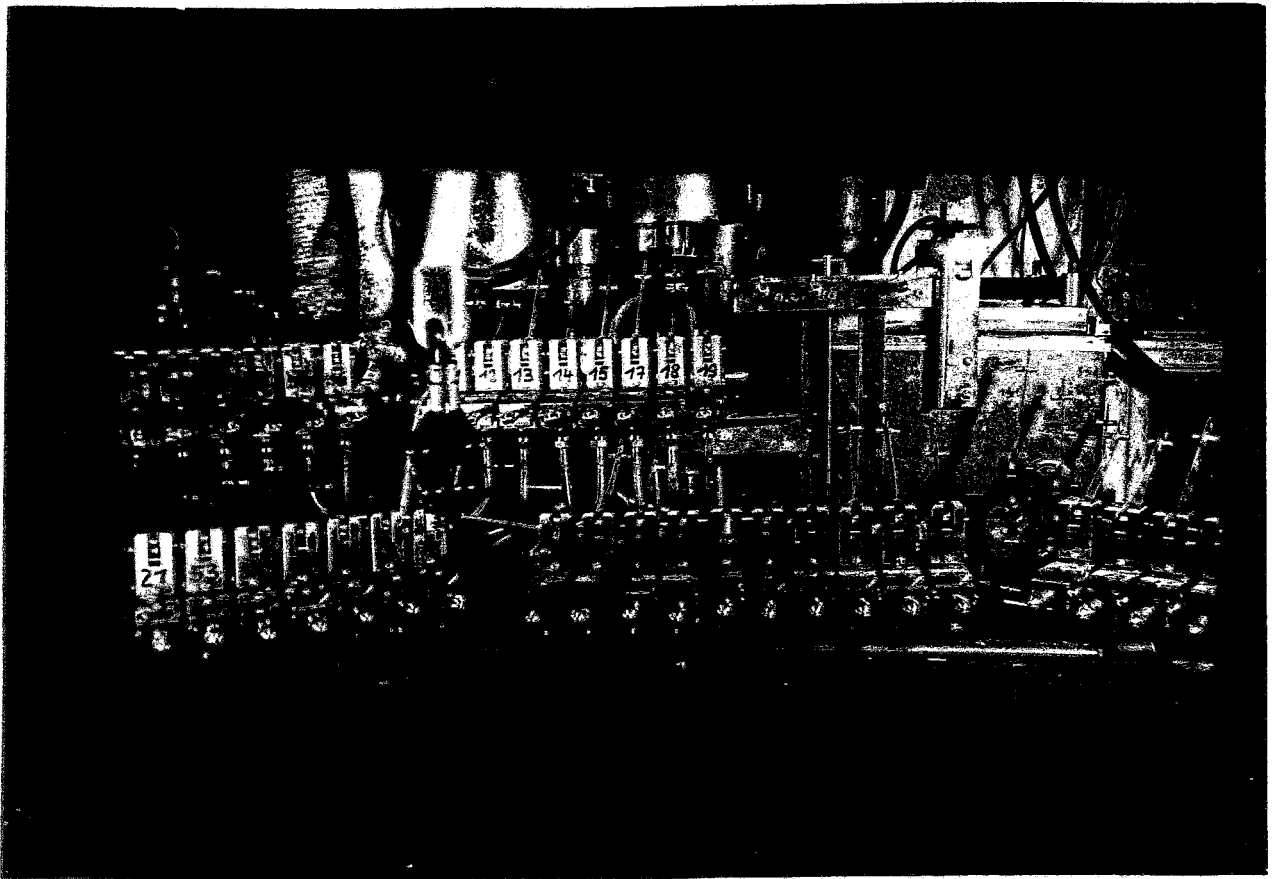


Abb. 13 Blick durch die Zellenoptik

Das technologische Herzstück der Anlage bilden die in der Heißen Zelle 2 installierten Apparate (Löser, Mischer, Zentrifuge, Filter, Konverter, Absorber, Lagertanks, Absperrorgane).

Beispielhaft soll die Funktionsweise von Löser, Mischer und Zentrifuge dargestellt werden.

Um die stark exotherme Reaktion der Auflösung der Brennelemente zu beherrschen, wurde eine spezielle Löseapparatur entwickelt. Die Abbildung 14 zeigt deren prinzipiellen Aufbau. Der Lösekorb 2 mit dem Brennelement wird in das Löserrohr 1 eingesetzt und mit dem Deckel gasdicht verschlossen. Bei geschlossenem Sicherheitsventil (Kugelventil) 4 wird die notwendige Säure über den Stutzen 7 in den Behälter 6 zugegeben. Erst nach dem Öffnen des Ventils strömt dann die Säure über die Rohrleitung 3 in das Löserrohr. Die Reaktionsgeschwindigkeit des Säureumlaufes während der Reaktion kann somit gesteuert werden. Über den Gasabgangsstutzen 5 werden die Reaktionsgase abgeführt. Der kondensierte Wasserdampf läuft über den Kondensatrücklauf 9 in den Behälter zurück. Die Prozeßlösung wird über den Ablassstutzen 8 zur Spaltnolybdänabtrennung geleitet.

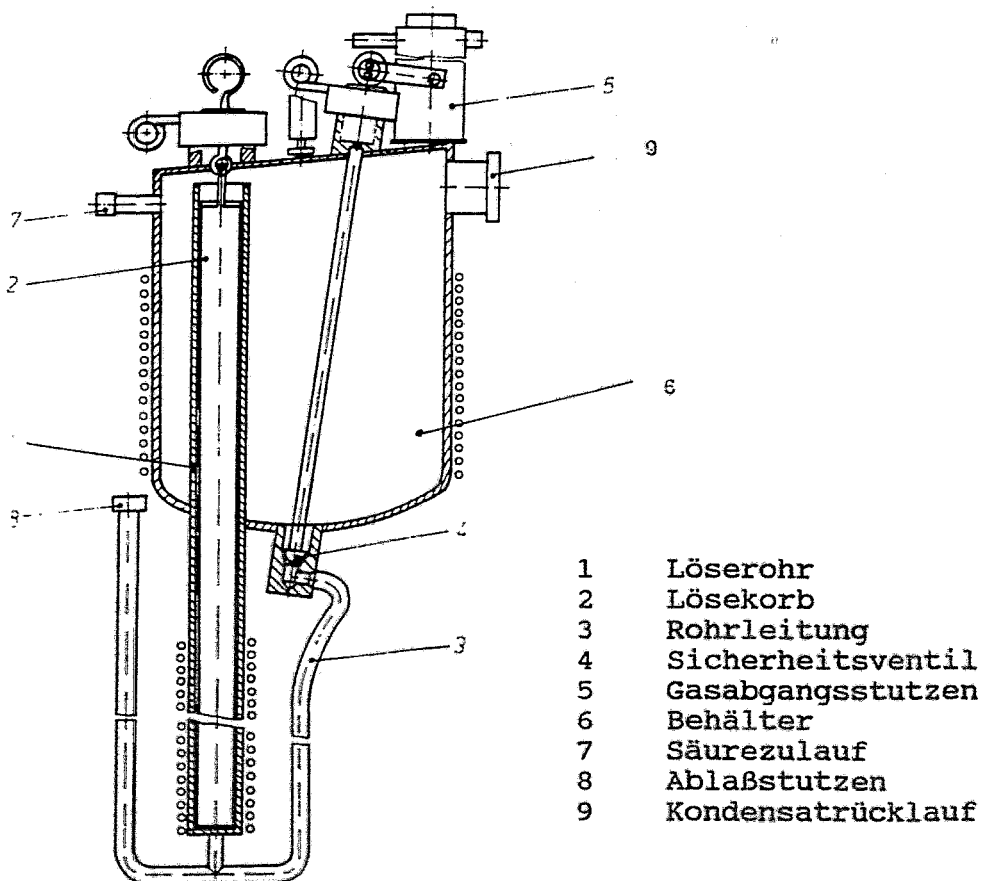
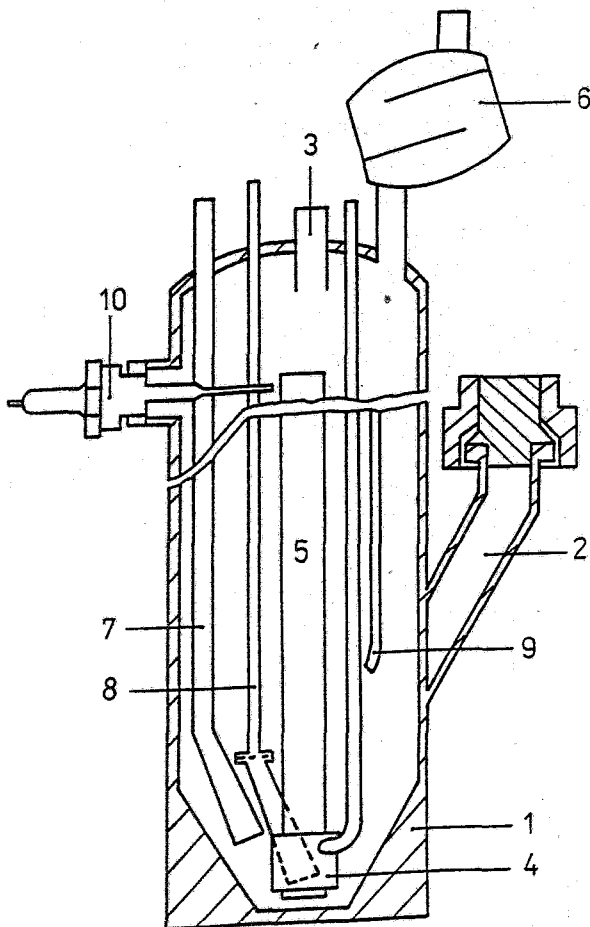


Abb. 14 Löseapparatur

Die Abtrennung des Spaltmolybdäns wird durch die Kombination eines Mischer-Zentrifugensystems gewährleistet.

Im Mischer (Abbildung 15) wird Al_2O_3 in der Prozeßlösung suspendiert und gemischt. Über den Einfüllstutzen 2 wird der Feststoff zugegeben, die Lösung wird über den Zulauf Prozeßlösung 3 zugeleitet. Kernstück des Mischers ist der Airlift mit dem Lufteintrittssystem 4 und dem Förderrohr 5. Die Mischluft verläßt über einen Prallabscheider 6 den Mischer. Über die Leitung 7 wird die Suspension in den Siebkorb 5 der Zentrifuge (Abbildung 16) eingespeist.

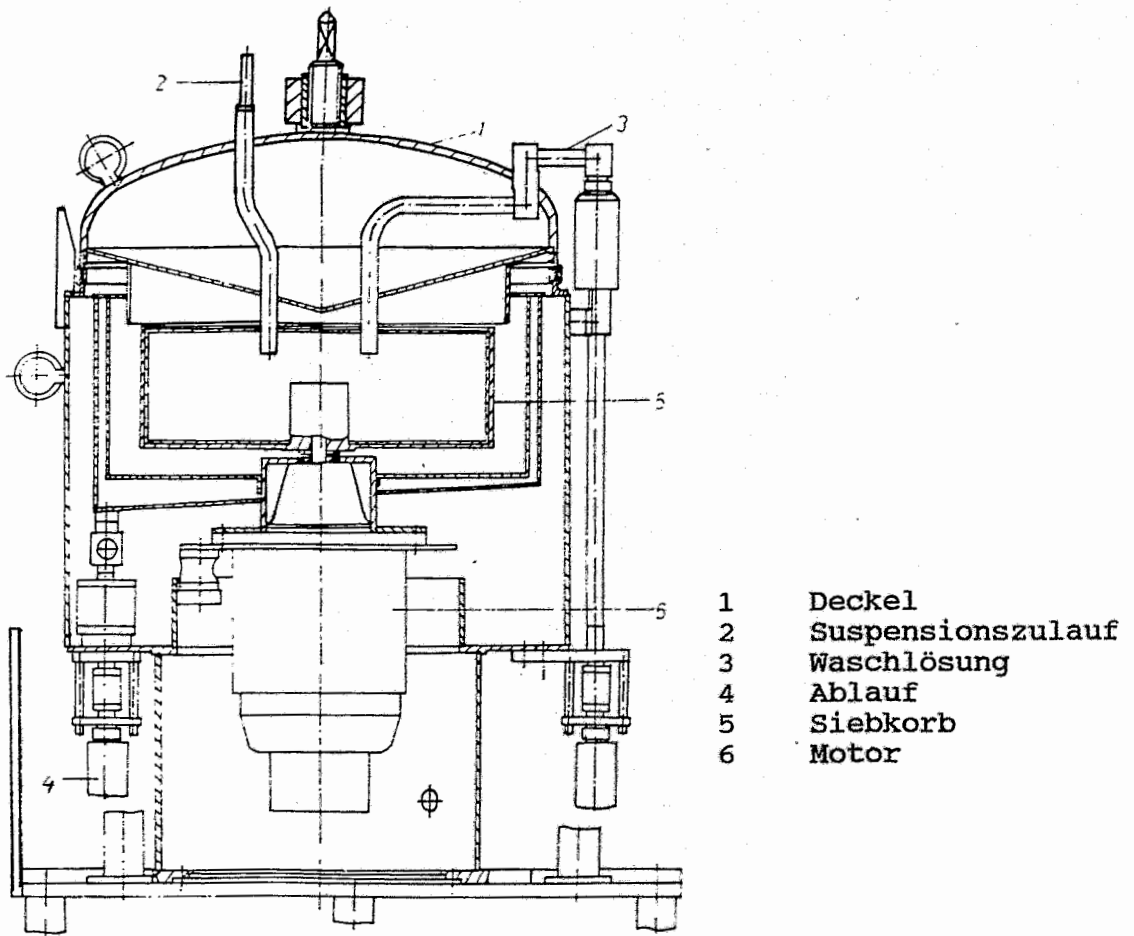


- | | |
|----|--|
| 1 | Edelstahlzylinder |
| 2 | Einfüllstutzen für Al_2O_3 |
| 3 | Zulauf Prozeßlösung |
| 4 | Lufteintrittssystem |
| 5 | Förderrohr |
| 6 | Prallabscheider |
| 7 | Entleerung Prozeßlösung |
| 8 | Zuleitung Luft |
| 9 | Zuleitung Wasser |
| 10 | Füllstandsanzeige |

Abb. 15 Mischer

In der Zentrifuge wird bei eingestellten Drehzahlen die Feststoff-Flüssigkeitstrennung realisiert ($\text{Al}_2\text{O}_3/^{99}\text{Mo}$ -Prozeßlösung). Danach wird der Feststoff gewaschen und anschließend das Spaltmolybdän eluiert. Nach der Produktion wird der Siebkorb mechanisch entnommen und dem radioaktiven Abfall zugeführt.

Löser und Mischer sind fest in der Zelle verrohrt, die Zentrifuge ist fernbedient wechselbar.



- 1 Deckel
- 2 Suspensionszulauf
- 3 Waschlösung
- 4 Ablauf
- 5 Siebkorb
- 6 Motor

Abb. 16 Zentrifuge

Der Kritikalitätssicherheit mußte insbesondere bei der Auslegung des Abklinglagers Beachtung geschenkt werden. Die Urankonzentration der Lösungen beträgt dort 1,5 - 2,5 g U/l (Anreicherung 36% an ²³⁵U). Als homogener Neutronenabsorber wird Kadmium als Kadmiumnitrat zugesetzt. Als heterogener Neutronenabsorber dienen im Behälter selbst eingebaut Borsilicatglasrohre (Abbildung 17). Die Gesamtmasse an Uran-235 im Einzelbehälter übersteigt mit 1,5 kg die kritische Masse.

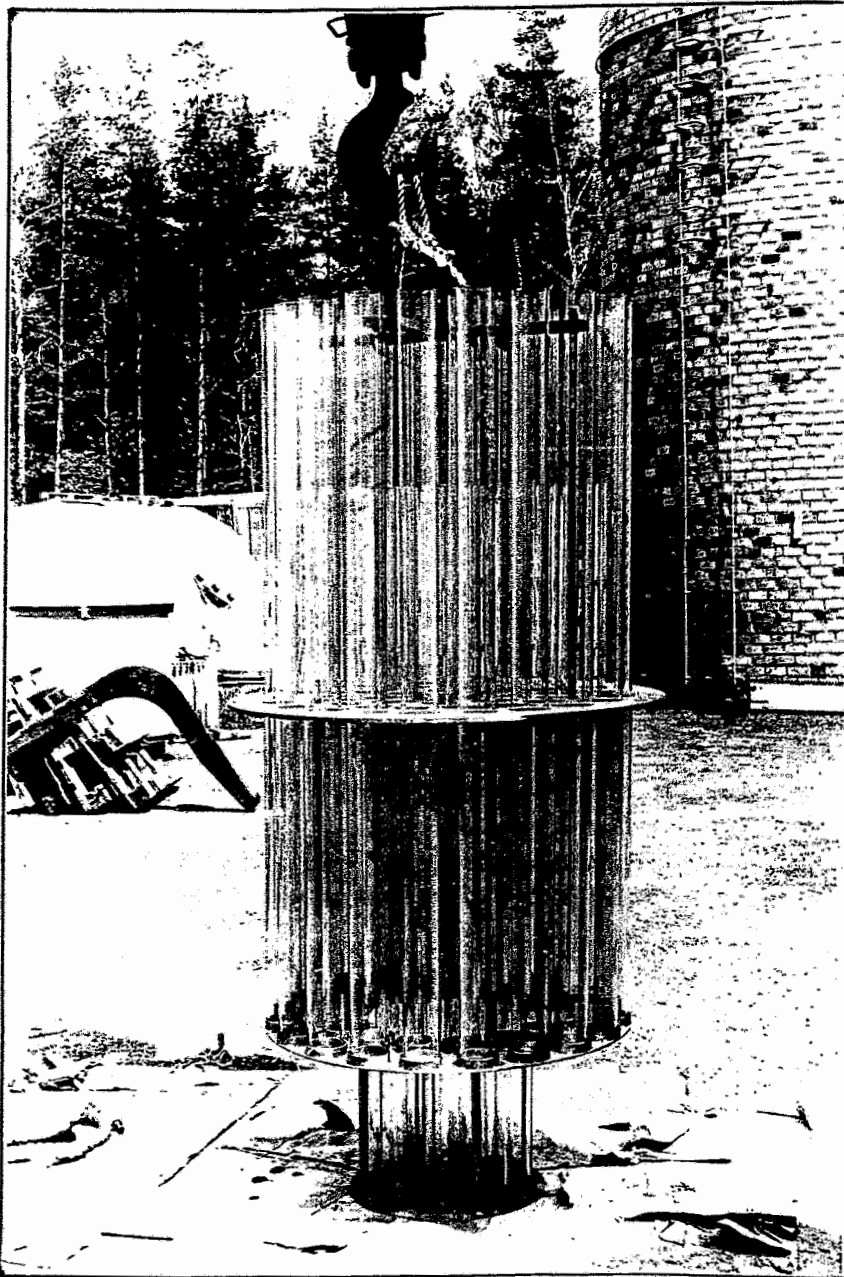


Abb. 17 Abklinglager - Borsilikatglasrohre

2.4 Genehmigungsrechtlicher Zustand

Die Anlage AMOR-I durchlief ein Genehmigungsverfahren gemäß der zutreffenden Gesetzlichkeit der ehemaligen DDR. Durch die Einstufung dieser Anlage als Kernanlage bedurfte auf

der Grundlage des Atomenergiewegesetzes /1/ entsprechend der Kernanlageneignungsanordnung /2/ sowohl die Standortwahl, die Errichtung, die Inbetriebnahme und der Dauerbetrieb der Zustimmung durch die oberste Behörde dem - Staatlichen Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz (SAAS) -.

In diesem gesetzlichen Rahmen galten die Genehmigungen bis 1990. Noch im Jahre 1990 wurde der Antrag auf Stilllegung dieser Kernanlage gestellt, der aufgrund der Übernahme der bundesdeutschen Gesetzlichkeit von der Behörde so nicht bearbeitet wurde.

Statt dessen wurde von der "Übergangsbehörde" - Gemeinsame Einrichtung der Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen für Reaktorsicherheit und Strahlenschutz (GEL) sowie dann folgend vom Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung (SMUL) in einer "Aufsichtlichen Anordnung" der jetzige Zustand der AMOR-I (keine ⁹⁹Mo - Produktion, Gewährleistung der Sicherheit und Sicherung der Kernanlage) festgelegt.

Um die Stilllegung der AMOR-I Anlage zu erreichen, ist die Einleitung eines neuen Genehmigungsverfahrens nach nun gültigem Recht notwendig.

Die zeitliche Abfolge der erteilten Genehmigungen ist aus der Tabelle 3 zu ersehen. Zu erwähnen ist, daß nach DDR-Recht Betriebsgenehmigungen nur befristet gegeben wurden.

Tab. 3 Termineckpunkte des AMOR I - Genehmigungsverfahren

Jahr	Genehmigungsschritt
1979	Einleitung des AMOR-I Genehmigungsverfahrens
1980	Erteilung der Genehmigung zum AMOR-I Probetrieb
1982	Erteilung der AMOR-I Dauerbetriebsgenehmigung
1987	Verlängerung der Dauerbetriebsgenehmigung
1988	Verlängerung der Dauerbetriebsgenehmigung bei Reduktion auf 50% des Nennbetriebes
1990	Beendigung der ⁹⁹ Mo - Produktion in der AMOR-I
1991	Aufsichtliche Anordnung der GEL zur Einschränkung des AMOR-I Betriebes
1992	Aufsichtliche Anordnung des SMUL zur Einschränkung des AMOR-I Betriebes

Bereits die "Zustimmung zum Dauerbetrieb der Anlage zur Gewinnung von Spaltmolybdän in Rossendorf (AMOR-I) vom 29.01.1982" wurde durch das Staatliche Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz (SAAS) bis zum 30.07.1987 befristet erteilt.

Neben den allgemeinen strahlenschutztechnischen Parametern sind darin folgende technologische Parameter festgelegt:

- wöchentlicher Durchsatz:
eine Charge: entspricht einer Spaltproduktaktivität bis $7,5 \cdot 10^{14}$ Bq, erzeugt aus Targetelementen durch eine Reaktorbestrahlung bis 190 h
- Targetelement:
ECH-1 (WWR-M) Brennelemente oder IRT-2M Brennelementrohre
- Chargengröße:
ein ECH-1 Element mit 110 g U (36%ig an ^{235}U angereichert)
oder zwei IRT-2M - Rohre mit 48 g (80%ig an ^{235}U angereichert)

Durch Ergänzungen und Änderungen der Dauerbetriebsgenehmigung wurde diese den jeweils aktuellen gesetzlichen und technischen Bedingungen angepaßt. Diese akzeptierten Änderungen reichten von personellen Neubesetzungen in der Betriebsmannschaft bis hin zu Änderungen der Grenzwerte und Bedingungen des nuklear sicheren Betriebes der Anlage (z.B. Erniedrigung von genehmigten Auswurferten, Erhöhung des Zellenunterdruckes) und technischen Detailveränderungen an Geräten.

1986 erlaubte es die Genehmigungsbehörde im ZfK hergestellte Brennelemente zu verarbeiten. Diese enthielten als Matrix Uran, das durch die Anlage AMOR-II zurückgewonnen wurde. Infolge des veränderten Betriebsregimes des Reaktors wurde es auf Antrag gestattet, auch Brennelemente mit einer Bestrahlungszeit von 120 h und einer auf 36 h verkürzten Abklingzeit aufzuarbeiten. Der wöchentliche Spaltproduktdurchsatz wurde mit $8,5 \cdot 10^{14}$ Bq festgelegt.

Nach der Bewertung aller sicherheits- und betriebstechnischen Parameter und vor dem Hintergrund eines störungsfreien Betriebes verlängerte die Genehmigungsbehörde den Dauerbetriebszeitraum bis 1988 durch die

- Änderung Nr.9 vom 05.03.1987 (Verlängerung der AMOR-I Dauerbetriebsgenehmigung bis 15.11.1987)
- und die
- Änderung Nr.10 vom 13.01.1988 (Verlängerung der AMOR-I Dauerbetriebsgenehmigung bis 15.05.1988).

Aufgrund des anzunehmenden Verschleißes der Anlage und der damit zusammenhängenden möglichen Beeinträchtigung der Betriebssicherheit wurde Ende 1988 der wöchentliche Durchsatz auf 50% reduziert.

Diese Genehmigung wurde bis zum 31.12.1989 befristet.

Die ausgewiesenen Produktionsparameter waren:

- Durchführung von ca. 50 Produktionszyklen pro Jahr
 - Einsatzmenge je Produktionszyklus:
1 ECH-1 Targetelementteil mit ca. 50 g U, 36%ig an ^{235}U angereichert mit einer Spaltproduktaktivität von ca. $4 \cdot 10^{14}$ Bq.
- Dieser Dauerbetrieb wurde nochmals mit den gleichen Parametern bis 31.12.1990 verlängert.

In der Aufsichtlichen Anordnung der GEL vom 03.01.1991 zur Einschränkung des Betriebes der AMOR-I, befristet bis zum 31.12.1991, wird ausgesagt:

- Die Anschlußgenehmigung für die Genehmigung zum Dauerbetrieb der Kernanlage AMOR-I vom 19.10.1988 ist auf der Grundlage des Atomgesetzes bis zum 31.03.1991 bei der zuständigen Behörde zu beantragen.
- Die Aufarbeitung von Brennelementen, entsprechend Pkt. 5.3. der Genehmigung vom 19.10.1988 sind mit sofortiger Wirkung einzustellen.
- Die Sicherheit und die Sicherung der Kernanlage AMOR-I sind entsprechend den betrieblichen Regelungen der Anlage und den betrieblichen Regelungen des Zentralinstitutes für Kernforschung zu gewährleisten.
- Das Kernmaterial und sonstige radioaktive Stoffe sind entsprechend der Sicherungskonzeption für das ZFK Rossendorf sicher zu lagern.

Vom Betreiber der Anlage wurde daraufhin ein dementsprechender Antrag gestellt, der aufgrund der Auflösung der GEL nicht weiter bearbeitet wurde. Statt dessen wurde von der danach zuständigen sächsischen Landesbehörde in einer Aufsichtlichen Anordnung (vom 30.12.1991) festgestellt:

- Die Aufsichtliche Anordnung über Einschränkungen des Betriebes der Anlage AMOR I findet für den Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf bis zum Vorliegen einer "Anschlußgenehmigung", d.h. einer Genehmigung nach den Paragraphen 9 und 9a des AtG, welche die Stilllegung der AMOR-I regelt, weiterhin entsprechende Anwendung. Die in der Anordnung ausgesprochene Befristung bis 31.12.1991 wird insoweit aufgehoben.
- Die Anlage AMOR I ist im sicheren Zustand zu halten. Dazu ist weiterhin sicherzustellen, daß
 - * aller Kernbrennstoff und sonstigen radioaktiven Stoffe in den dafür vorgesehenen Behältern und Tressoren kritikalitäts- und zugriffssicher gelagert sind,
 - * die Kontaminationen durch radioaktive Stoffe außerhalb der Boxen und Zellen die Grenzwerte der Anlage 9 der Strahlenschutzverordnung nicht überschreiten,
 - * alle für die Funktion und die Sicherheit der Anlage AMOR-I vorhandenen technischen Einrichtungen sind den eingeschränkten Betriebsbedingungen entsprechend zu betreiben und die dafür festgelegten bzw. erforderlichen Wartungen und Prüfungen sind durchzuführen. Die durchgeführten Maßnahmen und ihre Ergebnisse sind zu protokollieren, die Protokolle sind sicher aufzubewahren und der Behörde auf Verlangen nachzuweisen,
 - * die Bestimmungen der Aufsichtlichen Anordnung, der Rahmengen- genehmigung K 720 vom 27.08.1984 sowie die für die Anlage AMOR-I erlassenen betrieblichen Regelungen des ZFK Ros-

sendorf weiterhin entsprechende Anwendung finden.

Dies alles bedeutet die Einleitung eines neuen Genehmigungsverfahrens, um die Aufsichtlichen Anordnungen zu erfüllen.

3. Untersuchungen zur Stilllegung

Entsprechend des Atomgesetzes hat der Betreiber der Kernanlage dafür zu sorgen, daß auch im Prozeß der Stilllegung radioaktive Reststoffe schadlos verwertet oder als radioaktiver Abfall geordnet beseitigt werden.

Grundsätzlich geht die Stilllegung einer Kernanlage über die Stufen:

- Sicherer Einschluß
(Entleerung und Spülung der Anlage, sicherer Einschluß der Aktivität, Kontroll- und Überwachungseinrichtungen bleiben in Funktion)
- Teilbeseitigung mit sicherem Einschluß
(Abbau und Beseitigung der nicht radioaktiven Anlagenteile, Konzentrierung der kontaminierten Anlagenteile durch Demontage und Umgruppierung, Zwischenlagerung, periodische Überwachung)
- Vollständige Beseitigung
(Demontage und Beseitigung aller Anlagenteile, uneingeschränkte Nutzung des Standortes)

In Vorbereitung dieser Maßnahmen sind wissenschaftlich-technische Erkenntnisse aus Bau und Betrieb der Anlage zu erfassen. Dies ist ein wichtiger Zielpunkt dieses Berichtes.

3.1. Betriebsergebnisse der Anlage

Die Anlage AMOR-I war 10 Jahre in Betrieb. Da die Produktion nicht durchgängig kontinuierlich erfolgte (Aufarbeitung eines Brennelementes pro Woche) läßt sich für das Prozeßsystem eine direkte Betriebszeit von ca. 36 000 Stunden ermitteln. Die Betriebszeit der Lagersysteme entspricht der Gesamtbetriebszeit. Die ursprünglich für eine 5jährige Betriebszeit konzipierte Anlage erreichte die 100%ige Auslegeleistung. Dabei wurden die geltenden sicherheits- und betriebstechnischen Parameter eingehalten. Die Wartungs- und Reparaturtechnologie hat sich bewährt.

Die folgende Tabelle 4 weist die wesentlichen Produktionsdaten aus.

Tab.4 *Produktionsergebnisse der AMOR-I*

Zeitraum	1981-1990
geplante Betriebszeit	5 Jahre
Produktionszyklen	415
Versuchszyklen	70
Anlagenverfügbarkeit	> 95%

verarbeitetes Uran/ ²³⁵ U	39 kg/15 kg
Spaltproduktaktivität, gesamt	4,2*10 ¹⁷ Bq
davon Spaltmolybdän	8,5*10 ¹⁵ Bq
davon Spaltiod	5,7*10 ¹⁶ Bq
⁹⁹ Mo pro Zyklus zum Meßdatum	4,1*10 ¹² Bq

Ein Urandurchsatz von 39 kg entspricht der Verarbeitung von über 400 Brennelementen.

Weiterhin wurden die Anlagenkomponenten durch 70 Versuchszyklen belastet. Hierbei wurden Brennelementattrappen (nur Al-Rohre) bzw. einige frische Brennelemente aufgearbeitet. Traceraktivität wurde zur Beurteilung des Prozesses zugesetzt.

In den Betriebspausen des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR) wurden Brennelemente der kompatiblen Reaktoren in Rez, bei Prag (CSFR) und Swierk, bei Warschau (Polen) aufgearbeitet (Tabelle 5).

Tab.5 Bestrahlung von Brennelementen für die ⁹⁹Mo - Produktion

Bestrahlungs- ort der BE	Anzahl der bestr. BE	Reaktor- leistung	Neutronen- flußdichte	Bestrah- lungszeit	Abkling- zeit
			MW		
ZFK Rossendorf (DDR)	257 WWR-M (UAl ₃) 33 WWR-M (UO ₂) 1 WWR-M-ZFK (UO ₂)	10	5*10 ¹³	90/190	45
UJV Rez (CSFR)	21 WWR-M (UAl ₃) 44 IRT-2M	5	3*10 ¹³	174	78
IAE Swierk (Polen)	28 WWR-M (UAl ₃) 53 WWR-M (UO ₂)	10	5*10 ¹³	200	82

Als Besonderheit ist die Aufarbeitung von IRT-2 M Brennelementrohren hervorzuheben. Dabei wurde Uran aufgearbeitet, das 80%ig an ^{235}U angereichert war. In Lösungen der Lagerbehälter des Abklinglagers können deshalb auch Anreicherungen von $> 36\%$ entsprechend der Anzahl gelöster IRT-2M Elemente gemessen werden.

In der Tabelle 6 ist die jährlich produzierte ^{99}Mo -Aktivität in Abhängigkeit zur Anzahl der gelösten Brennelemente und der verarbeiteten Uranmenge dargestellt.

Der seit 1987 erkennbare Rückgang des Produktionsausstoßes ist auf die Reduzierung des eingesetzten ^{235}U zurückzuführen. Diese Senkung wurde durch die Genehmigungsbehörde verfügt.

Tab.6 Anzahl der in der AMOR I von 1981-1990 verarbeiteten Brennelemente und daraus produziertes ^{99}Mo

Jahr	Zahl der gelösten BE	verarbeitetes U	verarbeitetes U-235	^{99}Mo
				6 Tage nach Produktionsende
		Kg	Kg	10^{14} Bq
1981	31 WWR-M	2,6	1,1	0,9
	2 IRT-2M			
1982	42 WWR-M	4,6	1,9	2,2
	16 IRT-2M			
1983	49 WWR-M	5,2	2,0	2,7
	2 IRT-2M			
1984	50 WWR-M	5,6	2,1	2,8
	4 IRT-2M			
	1 WWR-M-ZfK			
1985	49 WWR-M	5,3	2,0	2,7
	2 IRT-2M			
1986	46 WWR-M	5,2	2,0	2,3
	6 IRT-2M			
1987	20 WWR-M	3,0	1,2	0,8
	10 0,5 WWR-M			
	12 IRT-2M			
1988	10 0,5 WWR-M	1,0	0,3	0,5
	8 0,5 WWR-M			
1989	36 0,5 WWR-M	2,2	0,8	1,0
1990	33 WWR-M	4,6	1,7	1,3
	9 0,5 WWR-M			

Das produzierte Spaltmolybdän wurde teils für die hauseigene $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Generatorproduktion verwendet (ca. 50%) bzw. an renommierte Generatorhersteller in Europa geliefert.

Die Art und Menge der dazu verwendeten Chemikalien ist in der Tabelle 7 zusammengestellt.

Tab. 7 *Eingesetzte Chemikalien*

Chemikalie	Menge
Salpetersäure (6 M)	8500 l
Ammoniak (2 M)	6700 l
Natronlauge (10 M)	200 l
destilliertes Wasser	35000 l
Flüssigstickstoff	50000 l
Aluminiumoxid	700 Kg
Quecksilber	3 Kg
Aktivkohle	1800 Kg
Molekularsieb	1940 Kg
Kieselgel (silbernitratimprägniert)	1200 Kg

Gleiche Materialien der Geräte wurden technologisch bedingt im Wechsel mit alkalischen und sauren Medien beaufschlagt und hohen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Das Rohrleitungs- und Apparatesystem wurde nicht nur von den eingesetzten Chemikalien belastet, sondern auch von deren Reaktionsprodukten wie Stickoxiden und Wasserstoff.

Neben den Chemikalien wurden wöchentlich jeweils eine Chromatographieglassäule und drei Sublimationskolben zur Mo-Feinreinigung sowie, ein Siebkorbabklingbehälter zur Aufnahme des spaltproduktbelasteten Aluminiumoxid aus dem Trennprozeß benötigt. Zur Überwachung der Zellenabluft wurden 2500 RICO-Iodfaserfilter eingesetzt /7/.

Im engen Zusammenhang mit den erzielten Betriebsergebnissen steht die Bewertung der Strahlenbelastung der Mitarbeiter. Die jährliche Strahlenbelastung des AMOR-I Produktionskollektives von 1983 bis 1990 ist aus der Tabelle 8 zu ersehen.

Tab.8 *Strahlenbelastung des AMOR-I - Personals*

Jahr	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Kollektivdosis in mSv	175	133	89	90	76	90	41	68
Durchschnitt je Mitarbeiter in mSv	29	22	15	15	7	9	4	7

Die zunehmenden Erfahrungen des Anlagenpersonals führten zu verkürzten Gerätewechselzeiten, zur Verlängerung der Gerätelaufzeiten und zur Reduzierung der Aufenthaltszeiten im Servicekorridor. Somit konnte die Kollektivdosis bzw. die durchschnittliche Belastung der Mitarbeiter seit 1983 beträchtlich verringert werden. Ein anderer Teil ist auf die Senkung der Produktion zurückzuführen.

Die Tabelle 9 zeigt die Strahlenbelastung bei Gerätewechseln. Diese waren belastungsintensiv, da gerade nach dem fernbedienten Entnehmen des Gerätes ein Manneingriff beim Umladen notwendig wurde.

Tab.9 *Strahlenbelastungen bei Gerätewechsel*

Gerät	Kollektivdosis mSv	durchschnittliche Einzeldosis mSv	maximale Einzeldosis mSv
Unilift aus HZ	6,6	1,5	3,0
Prozeßfilter	1,5	0,37	0,8
Zentrifuge	16,6	2,2	5,3
Optikwechsel von HZ	0,9	0,34	0,4
Revision der Anlage	6,2	1,2	2,0

An der Oberfläche ausgebauter Zentrifugen wurden in 1 cm Abstand eine Äquivalentdosisleistung bis zu 5 Sv/h gemessen. Diese Gerätewechsel wurden ebenfalls von der Bediennemannschaft vorgenommen. Vor allem beim Umladen der Geräte kam es zu Strahlenbelastungen. Für diese Eingriffe hätte die Personalzahl erhöht werden müssen, um die Individualbelastungen zu senken. Nach dem

fernbedienten Abbau der defekten Geräte in der HZ wurden diese über den Servicekorridor ausgeschleust, in bereitstehende Transportbehälter verpackt und anschließend der Abt. Radioaktiver Abfall übergeben. Da der Schwerpunkt der Strahlenbelastung eindeutig bei den Kontroll- und Reparaturarbeiten im Serviceraum lag, wurden u.a. folgende Maßnahmen zur Senkung der Strahlenbelastung durchgeführt:

- Aufbau von Zusatzabschirmungen,
- Installation von abgeschirmten Sicherheitsgefäßen in die Abluftleitungen,
- Verlagerung der zentralen AMOR-I-Druckluft- und Vakuumanlage
- Verzicht auf störanfällige Magnetventile,
- kontinuierliche Überwachung der Füllstände im Zwischen- und Abklinglager durch eine Fernsehkamera,
- Einsatz von wartungsfreien Manometern u. Rotametern in die ^{133}Xe - Rückhaltestrecke,
- Einbau eines Liftes für die Gerätewechsel in den Serviceraum hinter der HZ 2.

Die Strahlenbelastungen des AMOR-I - Kollektives sowie alle durchgeführten Maßnahmen zur Strahlenbelastungssenkung wurden regelmäßig in den AMOR-I-Quartals- sowie Jahresberichten dem SAAS als dem zuständigen staatlichen Kontrollorgan mitgeteilt.

3.2. Bewertung der Standzeiten

Der Zustand der Kernanlage AMOR I hat im Zeitraum von 1981 - 1990 Änderungen erfahren. Ursache der Veränderungen bzw. der Verschleißerscheinungen sind die akkumulierten Strahlendosen bis zu 10^6 Gy, die Einwirkung großer Mengen aggressiver Chemikalien (HNO_3 , NaOH , NO , NO_2 , N_2O , NH_3) und das große Temperaturgefälle in den AMOR I - Anlagenteilen von -100°C bis zu $+1000^\circ\text{C}$. Dazu kommt auch die mechanische Belastung während des Betriebes. Die festgestellten Verschleißerscheinungen an der AMOR-I konzentrierten sich auf:

- Gasundichtheiten,
- Ausfall elektrischer Zuleitungen durch defekte Stecker und Meßfühlerausfall durch defekte Lötverbindungen,
- Leck in einem Primärkeramikbehälter des Abklinglagers,

In der HZ und in den WZ wurden alle Leckprüfungen unter Fernbedienung vom Operatorraum aus durchgeführt. Als Prüfmedien wurden Druckluft, Vakuum, H_2O sowie Schäumungsmittel verwendet. Durch die Inanspruchnahme eingebauter Redundanzen konnte die Betriebssicherheit der Anlage erhalten werden. In Einzelfällen konnte fernbedient eine Reparatur vorgenommen werden. Erschwerend kam hinzu, daß ein großer Teil des Anlagensystems nicht im Sichtbereich des Operateurs liegt. In der Tabelle 10 sind die Prozeßausrüstungen, die geschätzte Zugänglichkeit der Anlagenteile in der HZ und in den WZ unter Fernbedienungsbedingungen sowie das Gerätevolumen angegeben. Außerdem sind die im Serviceraum für die ^{133}Xe - Rückhaltung eingebauten Anlagenteile beschrieben.

Tabb. 10 Zugänglichkeit von Anlagensystemen

Prozeß- ausrüstg.	Zugäng- lichkeit in %	Sicht- bereich in %	Medium	Volumen in l
* HZ 2				
Rohrlei- tung	20	20	g, l, s ¹⁾	0,5-3
Ventile	100	100	g, l, s	0,1
Lösegefäß	10	10	g, l	32
Prozeßfilter	100	80	g	6
Konverter	100	80	g	2
Wärme- tauscher	20	20	g, l	5
Prozeßbe- hälter	0	0	g, l	27
Mischer	50	80	g, l, s	15
Manometer	100	100	g	1

Gasometer	10	10	g, l	500
NO ₂ -Absorber	0	0	g, l	2,5
Füllstands- messer	60	60	g, l	1
Kugelventil	10	10	g, l	0
Kühler	0	0	g, l	6
Zentrifuge	100	80	l	3
* WZ 4				
Rohrleitung	70	70	g	0,5-2
Ventile	100	100	g	0,1
Kühler	30	50	g	1
Xe-Adsorb- tionsanlage	100	80	g	1,5
Manometer	50	100	g	0,1
Xe-Umgehungs- strecke	100	100	g	0,5
Rotameter	100	100	g	0,2
* WZ 15				
Rohrleitung	70	70	g, l	0,5-2
Ventile	80	100	g, l	0,1
Verdampfer	20	40	g, l	30
Prozeßbehälter	0	0	l	180
Filter	0	20	g	6
Konzentrat- behälter	100	100	l	2,3
Kondensator	0	100	l	1
* Serviceraum				
Gefrier- truhe	100	100	g	400
Gefrierschrank	100	100	g	70
Molsieb- hälter	100	100	g	25
Bypassvakuum- pumpe	100	100	g	0,1
Ventile	100	100	g	0,1
Rohrleitung	70	70	g	0,5-5

1) g = Gas; l = Flüssigkeit; s = Suspension

3.2.1 Gerätetechnik

Die für eine Standzeit von 5 Jahren konzipierte Kernanlage AMOR-I war technisch so ausgelegt, daß über diesen Zeitraum wesentliche Anlagenteile mit hoher Wahrscheinlichkeit ohne Reparatur bzw. Austausch betrieben werden können.

In die Wanddickenauslegung der Geräte und Rohrleitungen wurde ein Korrosionszuschlag eingerechnet.

Die als Verschleißteile eingestuften Anlagenteile (Ventile, Iodfilter, Konverter, Zentrifuge, Eindampfdrehrohrofen, Sublimationsöfen, Zellenkran) mußten deshalb fernbedient wechselbar sein, weil sie

- mechanisch bewegte Teile (Ventile),
- elektromotorische Antriebe (Zentrifuge, Eindampfdrehrohrofen),
- auszuwechselnde Filter - bzw. Kontaktmassen (Iodfilter, Konverter),
- verschleißende Dichtungen (Zentrifuge) und
- elektrische Heizungen (Filter, Konverter, Öfen)

aufweisen, die eine Lebensdauer < 5 Jahre erwarten lassen.

Die Zuverlässigkeit der ausgearbeiteten Wechseltechnologie und die richtige Einschätzung des Geräteverschleißes bestimmte maßgeblich den 10jährigen Dauerbetrieb der AMOR-I.

Folgende Ursachen für Gas- oder Flüssigkeitslecks wurden bisher festgestellt:

- undichte Grenzfläche zwischen Kunstharz und Edelstahl (Leitfähigkeitssensoren),
- lockere Verschraubung bzw. Flansch (Prozeßfilter, Konverter, Ventile),
- defekte Geräte (Manometer, Rotameter),
- defekte Dichtung (Silikonkautschukdichtung),
- zerstörtes Kunststoffmaterial (PVC - Leitungen, Kunststoffteile in Rotametern, Magnetventilen und Vakuumpumpen),
- Einsatz von nicht rostfreien Geräten (Manometer).

Verschleißerscheinungen bzw. Defekte an elektrischen Leitungen und Meßfühlern wurden mit zunehmender Betriebsdauer an folgenden Anlagenteilen festgestellt:

- Lösegefäßheizung,
- Ventilanzeigen,
- Thermoelementen,
- Leitfähigkeitssensoren,
- Elektroenergieversorgungsleitungen,
- Kupplungsstecker,
- Verdampferheizung,
- Eindampfdrehrohrofen.

In der Phase der Produktionsvor- bzw. -nachbereitung konnten die Teile gewechselt oder Redundanzen in Betrieb genommen werden.

Im folgenden sollen einige der wichtigsten Anlagenteile nach Beendigung der ⁹⁹Mo - Produktion eingehender bewertet werden:

* Ventile:

In den AMOR-I-Zellen sind insgesamt 67 fernbedient wechselbare Ventile eingebaut (HZ 2: 47 Stück, WZ 3: 6 Stück, WZ 4: 3 Stück, WZ 15: 11 Stück).

Der eigentliche wechselbare Ventilkörper wird zwischen zwei Anschlußstücke geklemmt. Der Ventilstößel ist über den Exzenter zwangsgeführt (Abbildung 18).

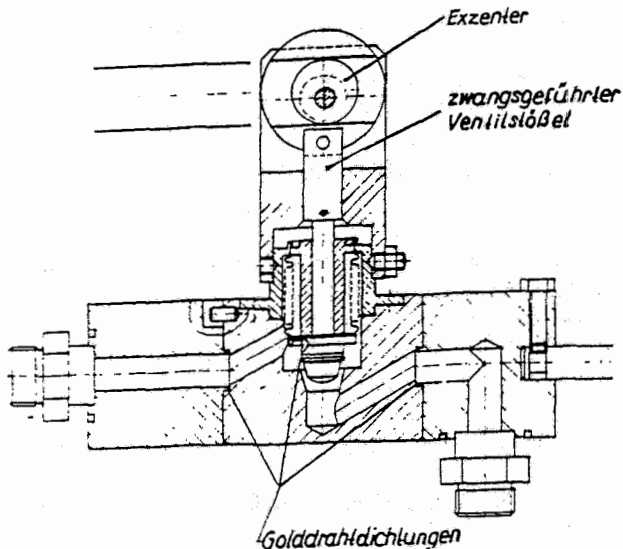


Abb. 18 Ventil

In den Zellen werden diese telemechanisch vom Operatorraum aus mit Master-Slave- bzw. mit Stabmanipulatoren bedient und gestatten ein schnelles Öffnen und Schließen der Ventile wie auch den Wechsel des Ventilkörpers. Die drei im Serviceraum installierten Ventile werden vom Operatorraum aus pneumatisch geschaltet.

Im 10jährigen Dauerbetrieb haben sich die in den unterschiedlichsten Prozeßschritten eingesetzten Ventile hervorragend bewährt. Die Ursachen der drei zu registrierenden Defekte waren ein abgebrochener Exzenterhebel, eine gelockerte Exzenterbefestigung und die Undichtheit eines Ventilstößels. Eine gebrochene Halterung an einem der festinstallierten Ventilanschlußstücke konnte durch fernbedientes Schweißen in der HZ 2 beseitigt werden.

* Sicherheitsventil (Kugelventil):

Mittels des Sicherheitsventils des Löser (siehe Abbildung 14) konnten zuverlässig die heftigen exothermen Lösereaktionen der bestrahlten Brennelemente gesteuert werden. Ursache der fünf

Kugelventilwechsel waren neben vorbeugenden Auswechseln in der Revisionsphase eine vermutete Undichtigkeit im Kugelventil, die aber durch die anschließenden Überprüfung nicht bestätigt werden konnte, sowie ein Federbruch und ein Exzenterhebeldefekt.

* Elektrohebezeug HZ 2:

Der Gerätewechsel in der HZ 2 kann infolge der hohen Strahlendosis nur fernbedient und unter Nutzung technischer Hilfsmittel erfolgen. Der Transport der wechselbaren Geräte in der HZ 2 erfolgte mittels eines Elektrohebezeuges, das an einem mit dem Manipulator verschiebbaren Fahrwerk befestigt ist (Abbildung 19).

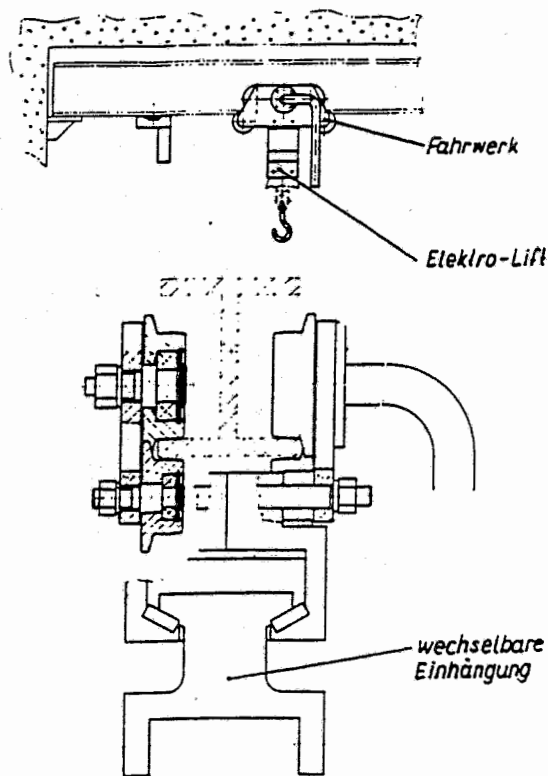


Abb. 19 Elektrohebezeug

Wegen elektrischer Defekte im Hebezeugmotor wurde während der Betriebszeit zweimal das Hebezeug mittels eines pneumatisch betätigten Montagegestelles, welches auf dem Wagen der Gerätewechseltransporteinrichtung befestigt wird, fernbedient bei geöffneter Zellentür über den Serviceraum gewechselt. Alle Gerätewechsel in der HZ sowie das wöchentliche Einsetzen des Lösekorbes mit dem kurzzeitbestrahlten Brennelement in das Lösegefäß konnten mit dem Hebezeug sicher durchgeführt werden.

Entsprechend der Wechseltechnologie wurden im 10jährigen ⁹⁹Mo-Produktionszeitraum eine Vielzahl fernbedienter Gerätewechsel in der HZ durchgeführt.

In der Tabelle 11 sind neben dem Gerätetyp die Anzahl der fernbedient gewechselten Geräte, die monatliche Laufzeit bzw. die Zahl der erreichten Produktionszyklen sowie die Ursachen der Gerätewechsel angegeben.

Tab. 11 Fernbedient gewechselte Geräte (Heiße Zelle 2)

Gerätebezeichnung	Geräte- wechsel	monatl. Laufzeit	Prod.- zyklen	Ursache des Ge- rätewechsels
Iodprozeßfilter	16	8	29	planmäßiger Wechsel undichtes Manometer verminderter Gas- durchgang
Gasometerfilter	2	82	150	verminderter Gas- durchgang Undichtheit
Konverter	12	10	38	planmäßiger Wechsel elektrischer Defekt verminderter Gas- durchgang
Zentrifuge	13	9	34	elektrischer Defekt mechanischer Defekt Undichtheit
Sicherheitsventil	5	24	96	Undichtheit mechanischer Defekt
Ventil	3	40	135	mechanischer Defekt Undichtheit
Zellenkran	2	60	210	elektrischer Defekt
Zellenoptik	2	60	210	Strahlenschutz- fenster zersprungen
Thermoelement	5	24	96	elektrischer Defekt

Prozeßbedingte Verschleißteile wie Lösekorb, Lösegefäßverschluß, Einfüllstutzen, Mischerverschlußstopfen und Siebkorbgreifer wurden nach Bedarf über das innerhalb des Zellenkomplexes installierte Transportsystem ausgeschleust und durch neue Anlagenteile ersetzt.

In der Tabelle 12 sind die während der Betriebszeit ausgefallenen elektrischen Anlagenteile zusammengestellt. Durch vorsorgliche Redundanzen und möglichen fernbedienten Ersatz dieser Anlagenteile konnte ein weiterer ungestörter Betrieb gesichert werden.

Tab. 12 Ausgefallene elektrische Anlagenteile

Ort	Gerätebezeichnung	Defektart	Lösung
HZ 2	Lösegefäßheizung	50% Heizleistung ausgefallen	Redundanz
HZ 2	Thermoelement Löser	keine Anzeige	Austausch
HZ 2	Ventil Stellungsanzeige	90% ausgefallen	keine Reparatur Sichtkontrolle durch Stellung des Exzenterhe- bel
HZ 2	Elektrozuleitung	Steckerdefekt	Ersatz der Zu- leitung
WZ 3	Verdampferheizung	80% ausgefallen	Installation eines Ersatzver- dampfers (WZ15)
WZ 3	Eindampfdrehrohrofen	Heizungsausfall	Installation eines Ersatz- ofens (WZ15)
Ab- kling- lager	Füllstandsanzeige	Korrosion	Redundanz der Methode

3.2.2. Materialien

Aufgrund der sorgfältigen Materialauswahl, der Gerätefertigung entsprechend des Qualitätssicherungsprogrammes (siehe Pkt. 2.3.) und der Testung der Materialien durch externe Bestrahlungen und inaktiven chemische Belastungen, die den Betriebsbedingungen entsprachen, konnten Fehler beim Materialeinsatz vermieden werden.

Es traten keine korrosiven Lecks auf. Durch die relativ starre Verrohrung kam es an einzelne Verbindungsstücken zu hohen mechanischen Belastungen, die sich an einem Haarriß an der Schweißnaht eines Löserabgangsstützens bemerkbar machte. Die entstandene Undichtigkeit konnte fernbedient repariert werden.

Die Strahlenbeständigkeit der Materialien bestätigte sich unter den originalen Betriebsbedingungen. Ein erhöhter Verschleiß vor allem der Kunststoffmaterialien unter der gleichzeitigen Wirkung von Strahlung und chemischem Agens war nicht meßbar, da fast alle Kunststoffmaterialien nicht direkt den Prozeßlösungen und -gasen ausgesetzt waren. Ausgenommen waren die Verbindungsleitungen von

Mischer und Zentrifuge, die aus Polyethen gefertigt waren. Die gleichzeitige Wirkung von chemischem Agens und extremer Bestrahlung (Durchlauf der hochaktiven Prozeßlösung) verringerte die aus den Bestrahlungsuntersuchungen extrapolierte Standzeit um ca. 50%. Weitergehende vergleichenden Werkstoffuntersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.

Die Siebkorbabklingbehälter zur Aufnahme des verbrauchten Aluminiumoxides wurden anfangs mit Epoxidharz fest verschlossen. Infolge einer Druckerhöhung durch die Akkumulation der Radiolysegase verformte sich der Aluminiumbehälter und brach auf. Deshalb wurde eine Öffnung zur Druckentlastung in den Deckel gebracht, die wiederum mit einem Iodfilter verschlossen wurde.

Bewährt haben sich Epoxidharzschutzschichten auf den Zellenwänden. Diese sind über die Betriebszeit intakt geblieben. Damit sind Restkontaminationen mechanisch gut entfernbar. Polyphenylether sowohl als Schmiermittel für Gewinde u.a., als auch als Druckübertragungsmedium hat sich von seiner chemischen Beständigkeit als auch von seiner Strahlenbeständigkeit bewährt. Die Strahlenbeständigkeit entsprach der extern ermittelten Werten.

3.2.3. Technologiebewertung im Hinblick auf eine Neuanlage

Für eine Neuanlage zur Herstellung von Spaltmolybdän sollte auf die bewährten chemischen und verfahrenstechnischen Grundprinzipien des AMOR-I-Prozesses unter Berücksichtigung eines mehrmaligen wöchentlichen Produktionsrhythmus zurückgegriffen werden.

Eine effektivere Raumgestaltung der Heißen Zelle sollte zu einer Entflechtung der Technologie führen, was wiederum zur Erhöhung der Betriebssicherheit führt.

Das Prinzip der "Fernbedienten Modultechnik (FEMO-Technik)" sollte durchgängig angewandt werden. Die durchgängige fernhandelte Wechselbarkeit von Geräten wird dadurch gewährleistet. Dies ergibt nicht nur Vorteile bei notwendigen Rekonstruktionen von Apparatesystemen im Zellenkontainment, sondern sichert auch eine unkomplizierte Stilllegung der Anlage durch fernbedienten Ausbau aller Anlagensysteme einschließlich der Rohrleitungen und Kabel.

Die Abbildung 20 zeigt ein dafür entwickeltes Standardmodul, das hier mit einem Lagerbehälter bestückt ist /8/
Alle Geräte können in ihrer Dimensionierung diesen Modulen angepaßt werden (z.B. Löser, Mischer, Verdampfer).

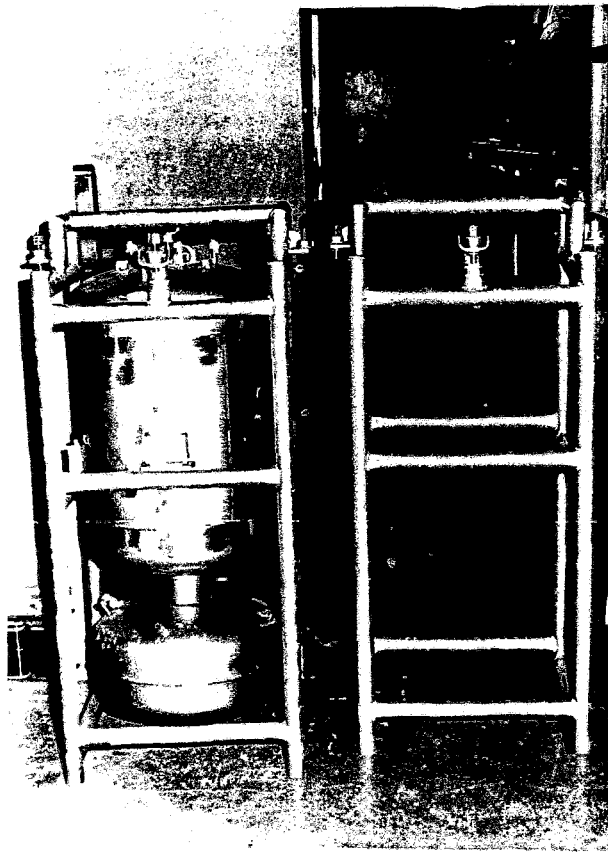


Abb. 20 Modul mit Lagerbehälter

Die Module werden der besseren Zugänglichkeit wegen längs der hinteren Zellenwand angeordnet und dort an die Rohrleitungsstrassen über Verbindungsstücke angeschlossen.

Das aus der Wiederaufarbeitungstechnologie stammende FEMO-Konzept wurde beim Bau der Anlage SMA (Spaltmolybdänanlage Rosendorf) erstmals für Isotopenproduktionszwecke adaptiert /9/.

Grundsätzlich sind in einer Neuanlage erweiterte Geräteredundanzen vorgesehen.

Es sind die Platzverhältnisse im Zellenkontainment so gestaltet, daß neben einer Zwischenlagerung von verschlissenenem Gerät auch deren Dekontamination möglich ist.

Die Zwischenlagerung der Prozeßlösungen ist innerhalb des Zellenkontainments gewährleistet.

Vor den eigentlichen Iodfiltern sind in die Abluftstränge der Prozeßzelle Iodadsorber eingebaut.
Die notwendige Verzögerungsstrecke für ^{133}Xe ist redundant ausgelegt.

Die Zellen sind mit poliertem Edelstahl ausgekleidet und mit einem Bodenliner versehen.

Die Lagerbehälter für die Prozeßlösungen nach der Spaltmolybdänabtrennung sind doppelwandig und das Füllstandsmeßsystem wechselbar ausgelegt.

Die gesamte Anlage befindet sich in einem universell nutzbaren Funktionsgebäude, wobei die FEMO-Technik die Möglichkeit eröffnet, weitere Isotopenproduktionstechnologien oder radiochemische Versuchsanlagen zu installieren.

3.3. Erstellung des Kontaminationskatasters

Betrachtet man die Abklingkurve der Radioaktivität eines Brennelements (Abbildung 21), so bestimmen anfangs die kurzlebigen Nuklide wie z.B. des Mo, Te und I den starken zeitlichen Abfall der Radioaktivität, während danach die mittellebigen Nuklide des Zr, Sb, Ru z.B. dominieren. Nach einer Abklingzeit von > zwei Jahren leisten das radioaktive Cäsium und Strontium den wesentlichen Aktivitätsbeitrag.

Bei späteren Freimessverfahren von Anlagenteilen sind natürlich auch solche sehr langlebigen Nuklide (Halbwertszeit $>10^3$ a) wie z.B. das Technetium-99 zu betrachten. Gleiches trifft auf die potentiellen Nuklide des Urans und der Transurane zu.

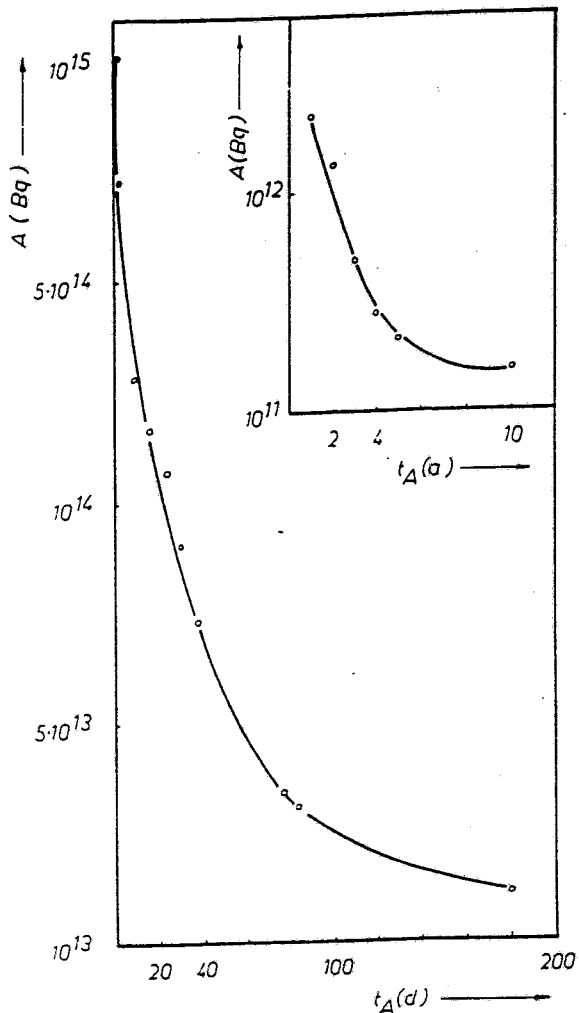


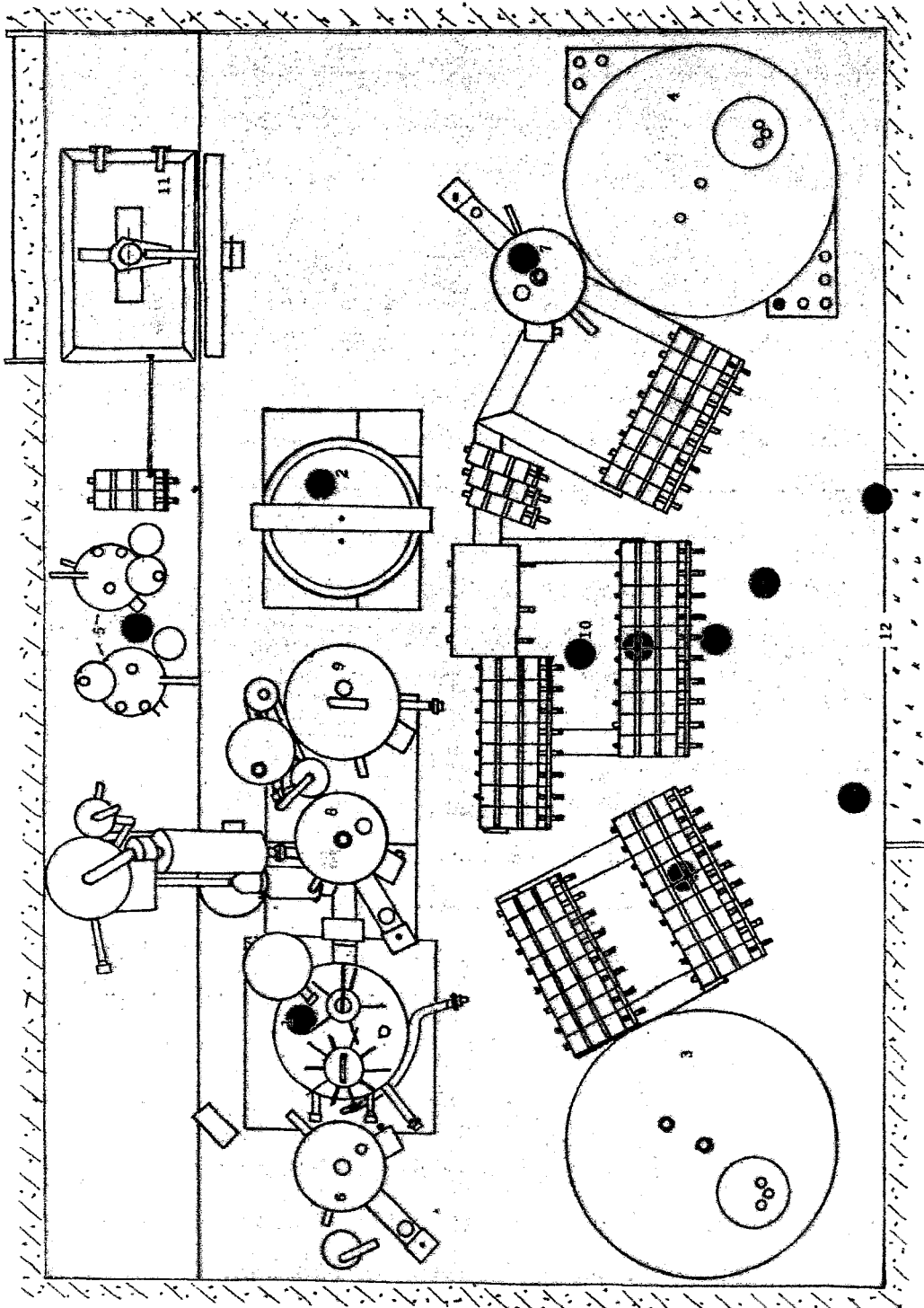
Abb. 21 Abklingkurve eines Brennelementes

Im Gegensatz zu den Reaktoren wird die Radioaktivität in der Zellen der AMOR-I-Anlage nicht von aktivierten Bauteilen bestimmt, sondern von kontaminierten Geräten, Anlagen und Materialien.

* Kontaminationskataster der Heißen Zelle

In der Abbildung 22 ist das Kontaminationskataster für die Heiße Zelle 2 (Draufsicht) dargestellt. Der Meßzeitpunkt ist 8 Tage nach Beendigung des Produktionsbetriebes.

- 1 Löser
- 2 Zentrifuge
- 3/4 Gasometer
- 5 Mischer
- 6 Gasometerfilter
- 7 Verdrängerfilter
- 8 Prozeßfilter
- 9 Konverter
- 10 Ventilblöcke
- 11 Kanaltür
- 12 Zellenoptik



ausgewählte Meßpunkte:
Äquivalentdosisleistung in Sv/h



< 1 5 10 15 20

Abb. 22 Kontaminationskataster HZ 2,
8 Tage nach Produktionsende

Neben den hohen Energiedosisleistungen an den chemisch wie radioaktiv belastetsten Geräten, die allerdings noch nicht dekontaminiert sind, sind "Hot spots" auf den Ablageblechen für den Lösekorb und das Brennelement erkennbar. Nach ersten örtlich begrenzten Dekontaminationen der "Hot spots" sind die höchsten Kontaminationen im Bereich des Lösers, der Mischer und der Zentrifuge feststellbar. Löser und die Mischer sind von Beginn des Produktionsbetriebes in der Zelle, die Zentrifuge nur ein Jahr.

Beispielhaft ist die Zeitabhängigkeit der Energiedosisleistung für den Löser und die Zentrifuge aufgenommen (Abbildung 23). Der Kurvenverlauf weist auf den anfänglich hohen Aktivitätsbeitrag (siehe auch Abbildung 22) der frischen Kontaminationen hin. Der Anstieg der Dosisleistung (141 d) weist auf Meßfehler hin, deren Ursache die Positionierung der Meßeinrichtung war.

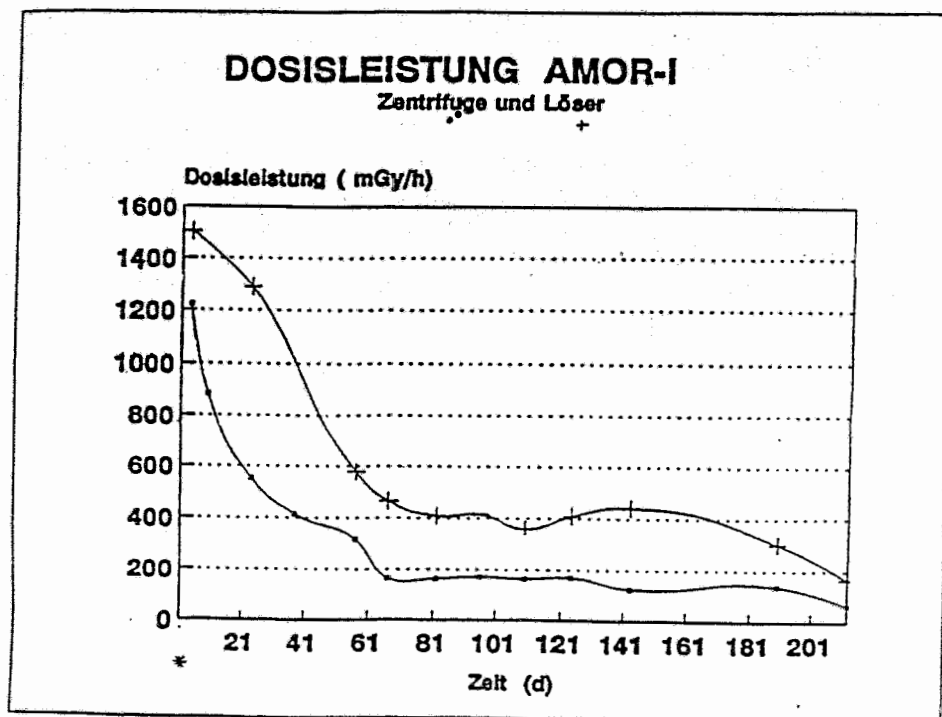


Abb. 23 Zeitabhängigkeit der Dosisleistung von Zentrifuge und Löser
Meßbeginn: 60 Tage nach Produktionsende *

Diese Aussage wird unterstützt durch die γ -spektrometrische Auswertung entsprechender Wischteste (50 Tage nach Produktionsende), die in Tabelle 13 aufgezeigt sind.

Tab.13 Nuklidzusammensetzung der abnehmbaren Oberflächenkontamination
(50 Tage nach Produktionsende)

Nuklid	Anteil / %
^{95}Zr	18,8
^{95}Nb	29,9
$^{103}/^{106}\text{Ru}$	5,0
^{137}Cs	2,4
^{141}Ce	3,7
^{144}Ce	40,2

Ab diesem Zeitpunkt wird die Dosisleistung noch von den vorhandenen mittellebigen Spaltprodukten bestimmt. Das Kontaminationskataster 260 Tage nach Produktionsende zeigt die Abbildung 24. Die Dosisleistung ist um zwei Größenordnungen gefallen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (zwei Jahre nach Produktionsende) sind es die Nuklide ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{147}Pm , ^{106}Ru und ^{144}Ce , welche die Dosisleistung bestimmen.

Meßtechnisch problematisch gestaltet sich noch die Erstellung des β -(^{90}Sr) bzw. α -(Pu) Kontaminationskatasters und der Nachweis der "Langzeitradioaktivität" z.B. durch gebildetes ^{99}Tc (HWZ $2,1 \cdot 10^5$ a).

Dieses Kontaminationskataster muß bis zum tatsächlichen Betriebsende weiter verfolgt werden.

* Kontaminationskataster der Warmen Zellen

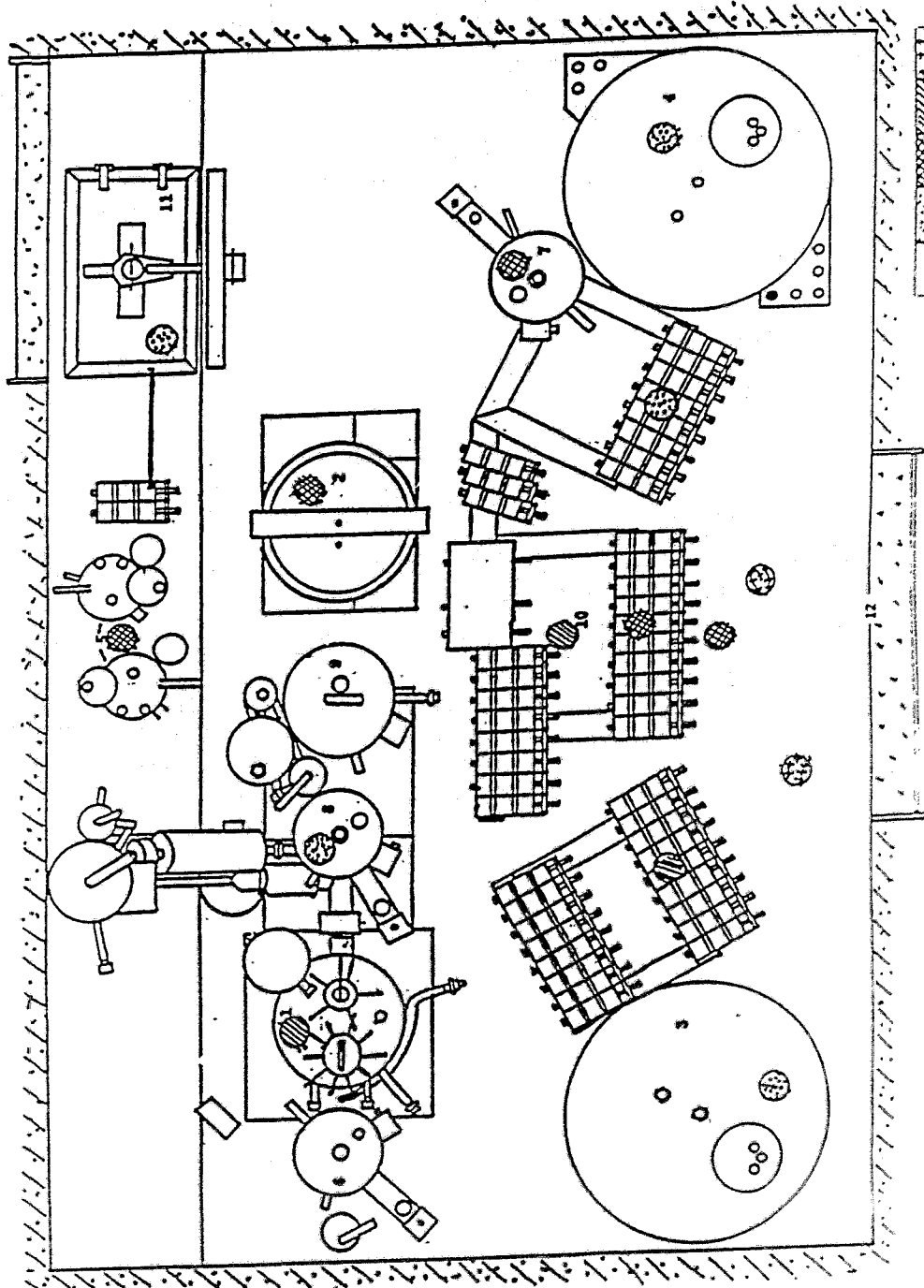
Das Kontaminationskataster wurde auch von anderen Zellen aufgenommen. Als Beispiel sei hier die WZ 15, die Feinreinigungszelle, welche seit 1985 im Betrieb war, aufgeführt.

Durchschnittlich wurden in der WZ 15, 8 Tage nach Produktionsende, Äquivalentdosiswerte zwischen 0,03 Sv (neben dem Verdampfer) und 0,08 Sv (vor dem rechten Sublimationsofen) gemessen.

γ -spektrometrische Messungen an Orten der prozeßbedingt stärksten Kontamination in dieser Zelle, wie dem Feinreinigungssäulenplatz (hohe Konzentration der Verunreinigungen) bringen das in Tabelle 14 unter (S) dargestellte Nuklidspektrum.

Messungen an Stellen, die nur durch radioaktive Partikel/Aerosole kontaminiert sein können, wie das Abzugsrohr am Sublimationsofen, ergeben die Nuklidzusammensetzung unter (A).

- 1 Löser
- 2 Zentrifuge
- 3/4 Gasometer
- 5 Mischer
- 6 Gasometerfilter
- 7 Verdrängerfilter
- 8 Prozeffilter
- 9 Konverter
- 10 Ventilblöcke
- 11 Kanaltür
- 12 Zelloptik



µGy/h

< 10 50 100 150 200

Abb. 24 Kontaminationskataster HZ 2
260 Tage nach Produktionsende

Tab. 14. Nuklidzusammensetzung der abnehmbaren Kontaminationen (Wischteste) in der WZ15
 Meßzeitpunkt: 8 Tage nach Produktionsende

Nuklid	Anteil/%	
	Säule (S)	Abzugsrohr (A)
^{95}Zr	19,9	22,4
^{95}Nb	33,5	31,2
$^{103}/^{106}\text{Ru}$	44,8	25,7
^{131}I	0,2	2,3
^{134}Cs	<NG	2,2
^{141}Ce	0,5	<NG
^{144}Ce	1,1	16,2

Nach einer Abklingzeit von 8 Monaten wurde die Kontamination durch ^{106}Ru und in geringem Umfang durch ^{95}Zr und ^{95}Nb bestimmt. Das Vorhandensein dieser Nuklide entspricht dem natürlichen Abklingen mit der Halbwertszeit.

Eine Dekontamination der Gesamtanlage erfolgte bisher aus den erwähnten betriebstechnischen Gründen nicht.

Ende 1992 sollen erstmals nach Außerbetriebsetzung der Anlage wieder Kernmaterialkontrollproben aus den Lagertanks entnommen werden. Dies bedingt durch die dazu notwendige Rückführung von Prozeßlösungen in das Rohrleitungssystem der HZ 2 eine Dosisleistungserhöhung.

Entsprechend dem Abklingverhalten (Abbildung 21 für das Brennelement bzw. die -lösung) ist ein "gezieltes Abklingen der Radioaktivität" als technologische Maßnahme zur Stilllegung bis zu einem Zeitraum von 5 Jahren sinnvoll.

Infolge des Produktionsregimes der Anlage AMOR-II wird dies zwangsläufig gewährleistet und eine umfassende Dekontamination bzw. Abbau der Zelleinrichtungen wird erst zu diesem Zeitpunkt erfolgen. Damit müssen die Kontaminationskataster zu diesem Zeitpunkt aktualisiert erstellt werden.

3.4. Dekontaminationsuntersuchungen

In der entsprechenden Fachliteratur sind eine Vielzahl von Dekontaminationsmitteln beschrieben /10/. Daraus sind zwei grundsätzliche Ansätze abzuleiten. Zum einen

erfolgt die Dekontamination um das Geräteteil reparieren und wieder einsetzen zu können und zum anderen um es freizumessen und konventionell zu entsorgen oder es als niedrig aktiven Abfall zu behandeln und endzulagern.

Um eine Wiederverwendung in der Anlage zu erreichen ist eine schonende Dekontamination durchzuführen, damit die Rauigkeit der Geräteoberflächen nicht erhöht wird.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Stilllegung wurden Dekontaminationsmittel betrachtet, die leicht zu handhabenden sind und zum Abtrag hoher Aktivitätsmengen auf kleinen Flächen ("Hot spots") beitragen.

3.4.1. Dekontamination der Spaltprodukte von Stahloberflächen im Labormaßstab

Für die Wahl des Dekontaminationsmittels sind die

- Art der Ausgangsaktivität (Element, chemischer Zustand),
 - Art der Haftung (Adsorption, Chemisorption) und die
 - Art und Menge des Sekundärabfalls
- von Bedeutung.

Gleichen Stellenwert hat der zu dekontaminierende Werkstoff. Die Wahl des Dekontaminationsmittels ist u.a. abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes und der Beschaffenheit der Oberfläche.

Aufgrund der Belastung der Anlage mit salpetersauren, nitrathaltigen Medien und Stickoxiddämpfen ist die Gesamtanlage (Rohrleitungen, Apparate, Lagerbehälter, Bodenliner) aus Edelstahl X8CrNiTi18.10 und X8CrNiTi18.11 gefertigt.

Dekontaminationsuntersuchungen an Edelstahlproben X8CrNiTi18.10, die mit Brennelementlösung kontaminiert wurden (Tabelle 15) zeigen, daß die Behandlung mit Beizliniment (Flouridbasis) bei $DF = 320$ einen Aktivitätsabtrag bei einmaliger Verwendung von 99% ergibt (Dekontaminationsfaktor (DF) = Aktivität der Probe vor/Aktivität der Probe nach der Dekontamination in Bq).

Reduzierende Zusätze zum Beizliniment heben die Dekontaminationswirkung auf.

Tab.15 Dekontaminationsuntersuchungen an Edelstahlproben
X8CrNiTi18.10

Dekontaminationsmittel	DF
Beizliniment (1 h) ¹⁾	200
Beizliniment (24 h)	320
Beizliniment (3 h, 0,01 M Na ₂ SO ₃)	2
Beizliniment (3 h, 0,05 M Na ₂ S ₂ O ₄)	4
Salpetersäure (20%, 2,5 h)	7

1) Edelstahl-Beizliniment CSG Chemie und Service GmbH

Weitere Edelstahl-Probebleche wurden 4 Monate der Gas - Aerosolphase der Zellenluft der HZ 2 ausgesetzt. Anschließend wurde stufenweise dekontaminiert /11/:

1. Stufe: Abwischen mit Zellstoff,
2. Stufe: Abspülen mit Wasser,
3. Stufe: Behandeln mit Dekontaminationslösung²⁾,
4. Stufe: Behandeln mit 2 M Salpetersäure

2) 10 Vol.% Fekamul-SR (Hersteller: VEB Fettchemie Karl-Marx-Stadt) mit 0,05 M Na₂S₂O₃ oder 0,05 M Na₂SO₃

Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengestellt.

Tab.16 Dekontaminationsuntersuchungen an Gas - Aerosolkontaminierten Edelstahlproben

Spaltprodukte	Dekontaminationsfaktoren DF				Gesamt
	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	
¹⁴⁴ Ce	15	1,5	2,8*10 ⁴	4,2	2,6*10 ⁶
¹⁴¹ Ce	20	3,5	3,1*10 ⁴	-	2,2*10 ⁶
¹³¹ I	6*10 ³	-	-	-	6,0*10 ³
¹⁰³ Ru	19	1,8	2,6*10 ⁴	-	8,9*10 ⁵
⁹⁵ Zr	22	2,6	9,3*10 ⁴	-	5,3*10 ⁶
⁹⁵ Nb	23	1,4	14	9,2*10 ³	4,1*10 ⁶

Auf den Blechen konnten Nuklide des Cers, Rutheniums, Iods und Zirkonium (Gleichgewicht mit Niobium) festgestellt werden.

Die hohen Dekontaminationsfaktoren zeigen, daß es sich bei diesen Kontaminationen nur um oberflächlich adsorbierte Aktivität handelt. Es sind im wesentlichen adsorbierte Aerosolpartikel. Der chemisorbierte Anteil ist äußerst gering. Daraus ist abzuleiten, daß gasgetragene Aktivitätsablagerungen leicht durch Spülen mit milden Dekontaminationsmitteln entfernt werden können.

3.4.2. Dekontamination von originalen Anlagenteilen

* Dekontaminationsuntersuchungen an Ventilblöcken und PVC-Teilen

Um diese Laborergebnisse zu überprüfen, wurden Versuche an Originalbauteilen der Anlage (Ventilblöcke) durchgeführt. Diese Anlagenteile waren 8 Jahre im Zellenkontainment HZ 2 eingebaut und inzwischen drei Jahre abgeklungen.

Die Ventilblöcke waren in lösungsführenden Leitungen eingebaut und sind aus Edelstahl X8CrNiTi18.10 gefertigt.

In der Abbildung 25 wird der nuklidspezifische Aktivitätsabtrag über drei Dekontaminationsstufen dargestellt.

Dazu wurden die Geräteteile mit

1. Stufe : Tauchen in Wasser
 2. Stufe : Tauchen in 0,5 M HNO_3
 3. Stufe : Tauchen in 5 M NaOH
- behandelt.

Zur Überprüfung des Endwertes wurde anschließend Stufe 3 wiederholt. Zwischen jeder Operation wurden die Teile gespült und getrocknet.

Die Ergebnisse zeigen keinen nuklidspezifischen Abtrag. Es erfolgt entsprechend der Dekontaminationsfaktoren (vergl. Tabelle 17) eine gleichmäßige Reduzierung aller Nuklide.

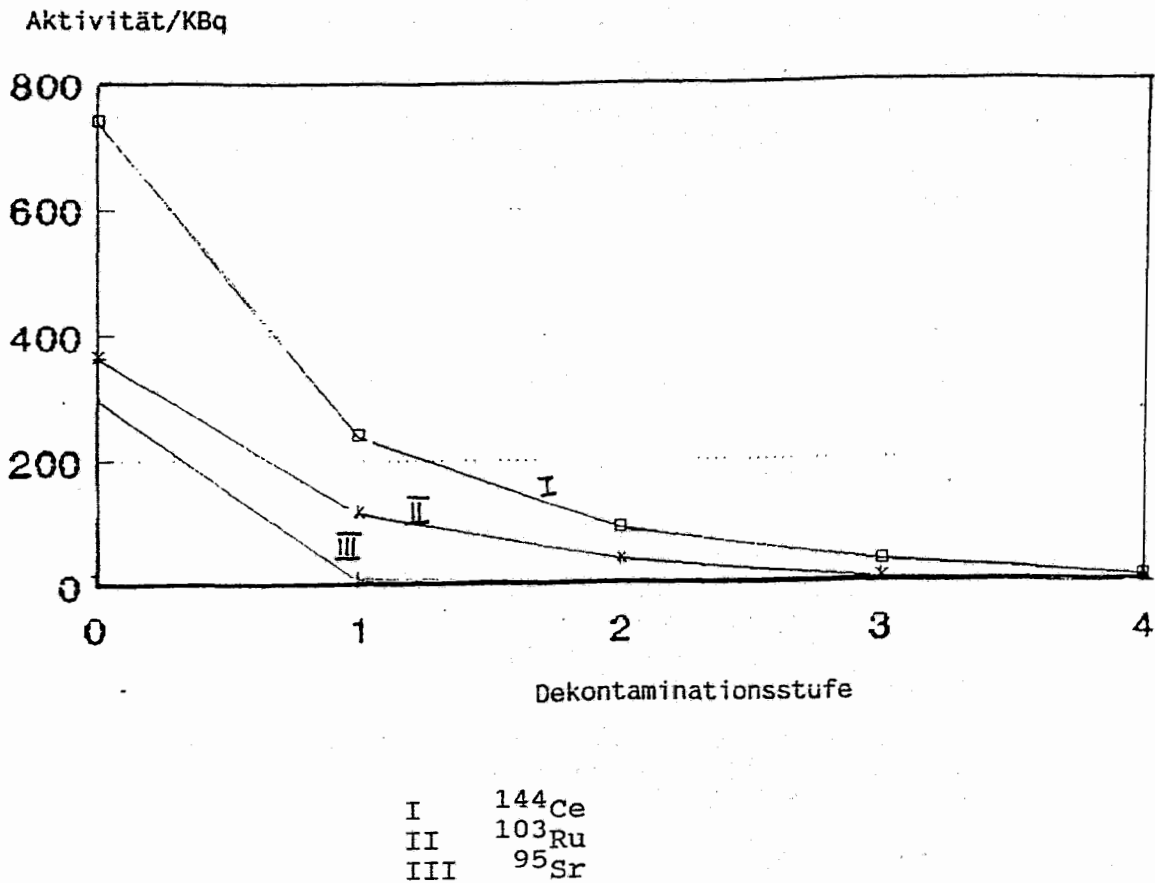


Abb. 25 Nuklidspezifischer Aktivitätsabtrag über 4 Dekontaminationsstufen

Autoradiographische Aufnahmen (Abbildung 26) von diesen behandelten Bauteilen vor und nach der Dekontamination (Stufe 2) machen die flächenmäßige unterschiedliche Aktivitätsverteilung deutlich.

Um Vorstellungen von der Kontaminationssituation zum Zeitpunkt eines möglichen Abbaus der Anlage zu erhalten, erfolgten Dekontaminationsuntersuchungen zum Gesamtaktivitätsabtrag mit verschiedenen Dekontaminationsmitteln.

Dazu wurden Ventilblöcke (Edelstahl X8CrNiTi18.10) mit verschiedenen Dekontaminationsmitteln behandelt. In der Tabelle 17 sind die Verfahrensweise und erreichten DF zusammengestellt.



1



2

Abb. 26 Autoradiographische Aufnahmen der Aktivitätsverteilung vor (1) und nach (2) der Dekontamination

Tab.17: Dekontaminationsuntersuchungen an Edelstahlbauteilen der AMOR-I-Anlage (Ventilblock: 520 g, Gesamtfläche 96,6 cm²)

Dekontaminationsmittel	DF	Aktivität Bq/cm ²	
		vor	nach
Beizliniment (1 h aufgetragen)	137	69	0,5
Salpetersäure (2 M, 2 h getaucht)	22	11602	527
Natronlauge (5 M, 1 h getaucht)	3	672	224
Königswasser (0,3 h, getaucht)	529	14801	28

Vor der Behandlung wurden die Bauteile mit Wasser behandelt und ein DF von 2 gefunden.

Mit DF=137 für Beizliniment und DF=529 für Königswasser (auch bei hohen Ausgangsaktivitäten) wird ein hoher Aktivitätsabtrag erreicht.

Bei dieser Behandlung wird jedoch die Oberfläche abgetragen. Bei gezieltem chemischen Abtrag wurde gefunden, daß Aktivität nur in Schichten < 10 µm eingedrungen ist. Beim Einsatz von Beizliniment oder Königswasser wird die Oberfläche stark angegriffen und ein Wiedereinsatz von Bauteilen in der Anlage schließt sich aus.

Für die Beseitigung von "Hot spots" ist das Beizliniment jedoch bestens geeignet.

Untersuchungen zur Dekontamination von PVC- und Polyamidteilen (Schläuche, Kupplungen) bringen gleiche wie in Abbildung 25 dargestellte Aktivitätsreduzierungen.

* Dekontaminationsuntersuchungen an Zentrifugen

Vor dem Hintergrund notwendiger Stilllegungsmaßnahmen und um die Möglichkeit zu prüfen verschlissene Zentrifugen nach einer Reparatur im AMOR-Prozeß wieder einzusetzen, wurden 1987 zwei Zentrifugen dekontaminiert. Die Zentrifugen waren je ein Jahr im Einsatz und drei Jahre abgeklungen.

Die Dekontamination von Zentrifuge 1 erfolgte mit Dekontaminationslösung Fekamul²) (901) durch zweitägiges Tauchen in dieser Lösung. Daran anschließend wurde die Zentrifuge in 2 M Salpetersäure getaucht (1 d).

Zur Dekontamination der 2.Zentrifuge wurde aus Gründen der Abfallminimierung die vorherige benutzte Dekontaminationslösung mit

Fekamul SR und 0,05 M Na₂SO₃ aufkonzentriert. Die Dekontamination erfolgte analog der ersten Zentrifuge.

Die in der Tabelle 18 ausgewiesenen Dekontaminationsfaktoren wurden durch Messung der Dosisleistung ermittelt.

Tab.18: Dekontamination von Zentrifugen der AMOR-Anlage

Dekontaminationsmittel	Zentrifuge 1	Zentrifuge 2
Deko-Lösung	20...200	< 10
2 M HNO ₃	2...5	2

Die Werte weisen aus, daß ein mehrmaliger Einsatz der verwendeten Dekontaminationslösungen (Fekamul) nicht sinnvoll ist. Da mit frischer Lösung höhere DF erreicht wurden, behandelte man Zentrifuge 2 nochmals mit neuer Fekamullösung.

Danach betrug die an den Zentrifugen gemessenen maximalen Dosisleistungen jeweils 20 uSv/h, was die Reparatur in einer speziellen Werkstatt ermöglichte. Es waren keine abwischbare Kontaminationen mehr vorhanden.

Auch die Güte der Stahloberflächen beider Zentrifugen erlaubte einen erneuten Einsatz in der Anlage.

Zu empfehlen ist, daß vor einem Manneingriff die Anlage nach den gebräuchlichsten Verfahren dekontaminiert wird, wie Heißwasserbehandlung und Dampfstrahlen zum Entfernen gebildeter Salzkrusten, Beseitigung von Aerosolpartikel mit Alkohol, Dekontamination mit Salpetersäure u.a..

Örtlich begrenzte Stellen mit hohen Aktivitäten sollten mit einem "aggressiven Mittel" behandelt werden, um den Anfall von hochradioaktiven festen Abfall zu minimieren. Dazu ist der Einsatz von Beizliniment als chemische Agens möglich.

Trotz der Möglichkeit hohe Dekontaminationswerte zu erreichen, kann aus den Untersuchungen abgeschätzt werden, daß nach erfolgter Dekontamination mit milden rezyklierfähigen Dekontaminationsmitteln und einer speziellen Behandlung der "Hot spots" nur wenige Anlagenteile eine bedingungslose Freigabe (0,1 Bq/g oder 0,5 Bq/cm²) oder eine eingeschränkte Wiederverwendung zugeführt werden können (> 0,1 bis 1 Bq/g und 0,5 Bq/cm²).

3.5. Das Abklinglager als technologische Einheit

Der entscheidende Punkt, den Abbau der Anlage beginnen zu können, ist die vollständige Entleerung des Abklinglagers.

Bedingung hierfür ist der Weiterbetrieb der Anlage AMOR-II.

Seit der Außerbetriebnahme der Anlage AMOR-I wurden in der Anlage AMOR-II 2307,3 l Prozeßlösung aufgearbeitet.

Zum Stand von 01.09.1992 ergibt sich folgender Befüllungsstand der Abklinglagerbehälter:

* Behälter 1: (09.10.1990 geschlossen)

V = 2337,7 l

M_{U-235} = 1275 g

U_{konz.} = 1,5 g/l

* Behälter 2: (08.12.1989 geschlossen)

V = 2229,4 l

M_{U-235} = 35 g

U_{konz.} = 0,04 g/l

* Behälter 3: (19.12.1990 geschlossen)

V = 1265,5 l

M_{U-235} = 380 g

U_{konz.} = 0,8 g/l

* Behälter 4: (leer, Reservebehälter)

* Behälter 5: (leer, defekt, gesperrt)

* Behälter 6: (08.12.1989 geschlossen)

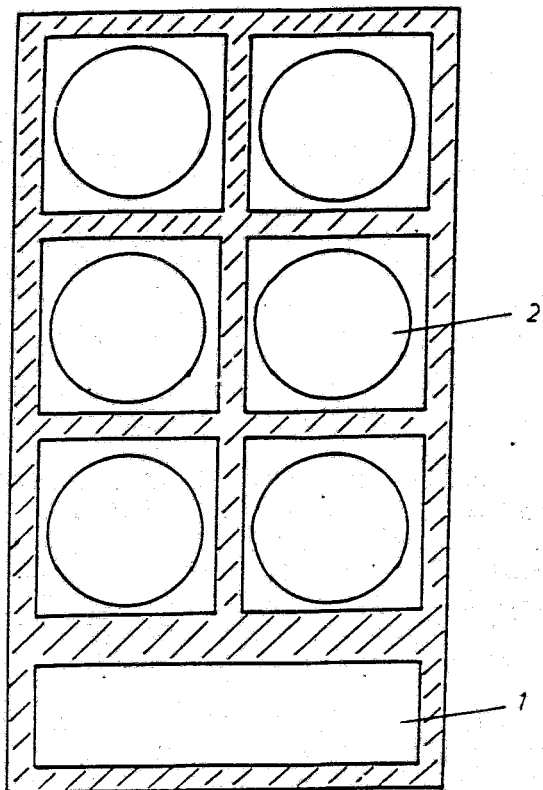
V = 2335,7 l

M_{U-235} = 1089 g

U_{konz.} = 1,4 g/l

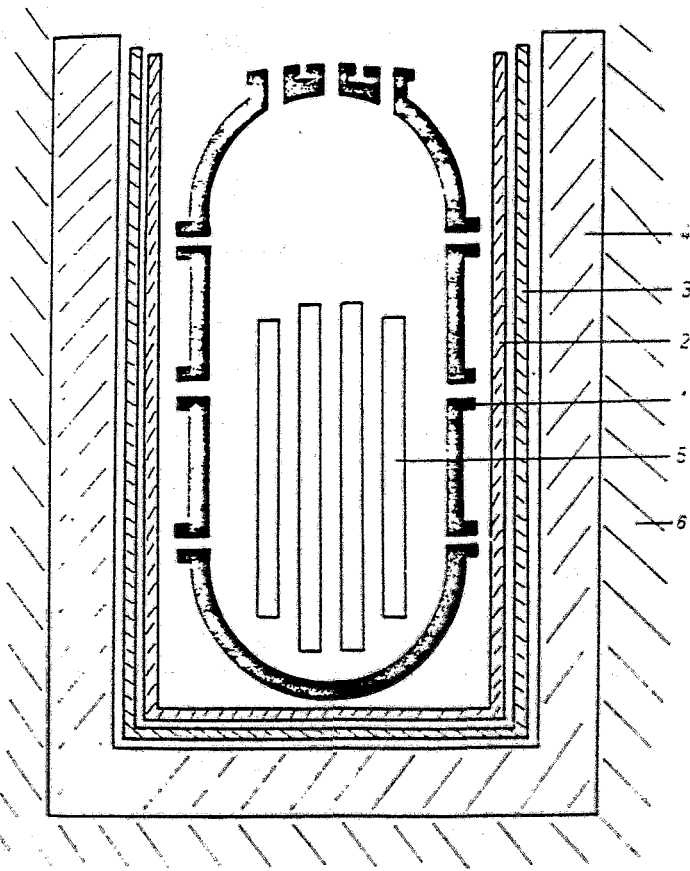
In der Abbildung 27 ist das Kammersystem des Abklinglagers mit Serviceraum und den 6 Betonkammern dargestellt.

Den Aufbau des Einzelbehälters zeigt Abbildung 28. Die Keramikbehälter wurden aus Gründen der Erhöhung der Korrosionssicherheit installiert.



- 1 Serviceraum
- 2 Behälter

Abb. 27 Abklinglager mit Service-
raum



- 1 Hartporzellanbehälter
- 2 Edelstahlbehälter
- 3 Edelstahlbehälter
- 4 Betoneinfassung
- 5 Neutronenabsorber
- 6 Erdreich

Abb. 28 Aufbau eines
Abklingbehälters

Ursprünglich war es geplant, das Spaltiod während des Löseprozesses vollständig zu entfernen. Um das Radioiod vollständig in die Gasphase zu überführen, ist aber ein Zusatz von Iodid notwendig. Die Wirkung von Halogeniden, auf Edelmetallmaterialien Lochfraßkorrosion zu initiieren, ist bekannt und wäre gerade bei einer Langzeitlagerung zu einem Risiko geworden.

Die zwei Edelstahlbehälter dienen als 1. und 2. Containment des Primärbehälters.

Auch in der Phase des eingeschränkten Betriebes muß gerade der Lagerung der Prozeßlösungen erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Zur Überwachung der Luft im Abklinglager wird über Aerosolpartikelfilter die Kontamination bestimmt. In der Regel liegen die Werte (Bq/m^3) unterhalb der Nachweisgrenze. Der höchsten ermittelten Werte betragen jedoch für ^{106}Ru 5 Bq/m^3 , für ^{137}Cs 8 Bq/m^3 , für ^{144}Ce 3 Bq/m^3 und für ^{125}Sb 2 Bq/m^3 . Andere Nuklide wurden nicht nachgewiesen. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Auswertung der Meßproben im Sumpfraum.

In der Tabelle 19 ist die Zusammensetzung der in den Abklinglagerbehältern gelagerten Prozeßlösungen umfassend charakterisiert. Die unterschiedliche Konzentrationen in den Lösungen sind durch unterschiedliche Spülregimes während der Produktionsruns bedingt.

Tab.19 *Zusammensetzung der Spaltstoff - Spaltproduktlösungen im AMOR I - Abklinglager (Meßdatum : 09.03.1992)*

Lösung aus ALB	U (mg/ml)	U-235 (mg/ml)	Aktivität (MBq/ml)	Pu-239 (mg/ml)	Cd (mg/ml)	B (mg/ml)
1	1,5	0,5	74	$1,5 \cdot 10^{-4}$	3,7	0
2	0,04	0,016	0,07	$< 10^{-5}$	0	0
3	0,8	0,3	18	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0	0
6	1,4	0,5	3,7	$1,5 \cdot 10^{-4}$	4,0	0

Lösung aus ALB	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ (mg/ml)	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ (mg/ml)	HNO_3 (mg/ml)	SiO_2 (mg/ml)
1	160	0,15	10	0,5
2	10	0,01	1	0,05
3	100	0,15	5	0,2
6	160	0,15	10	0,5

In der Tabelle 20 ist der Status der Radionuklidzusammensetzung der gelagerten Prozeßlösungen zusammengetragen.

Tab.20 γ -Spaltprodukt nuklidaktivität der gelagerten Prozeßlösung
 Meßgerät: Ortec - Spektrometer, Meßdatum : 18.10.1991
 Meßvolumen : 1 ml

Nuklid	Aktivität (Bq/l)			
	ALB 1	ALB 2	ALB 3	ALB 6
^{141}Ce	$7,4 \cdot 10^6$	-	$3,7 \cdot 10^7$	-
^{144}Ce	$5,2 \cdot 10^9$	$7,5 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^9$
^{137}Cs	$5,3 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^8$
^{95}Nb	$6,5 \cdot 10^7$	$4,2 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^7$
^{103}Ru	$1,4 \cdot 10^7$	-	$6,2 \cdot 10^8$	-
^{106}Ru	$3,9 \cdot 10^8$	$7,7 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^8$
^{95}Zr	$3,1 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^7$

In der Tabelle 21 ist die Gesamtaktivität aufgezeigt, die sich im Lager befindet.

Tab.21 γ -Spaltproduktgesamtaktivität der gelagerten Prozeßlösung
 Meßdatum : 18.10.1991

Lagerbehälter	Volumen/l	Aktivität/Bq
ALB 1	2337,7	$1,5 \cdot 10^{13}$
ALB 2	2229,4	$2,4 \cdot 10^{11}$
ALB 3	1265,5	$6,7 \cdot 10^{12}$
ALB 6	2210,0	$7,5 \cdot 10^{12}$
Summe	8042,6	$2,97 \cdot 10^{13}$

Ursprünglich war es geplant, das Spaltiod während des Löseprozesses vollständig zu entfernen. Um das Radioiod vollständig in die Gasphase zu überführen, ist aber ein Zusatz von Iodid notwendig. Die Wirkung von Halogeniden, auf Edelmetallmaterialien Lochfraßkorrosion zu initiieren, ist bekannt und wäre gerade bei einer Langzeitlagerung zu einem Risiko geworden.

Die zwei Edelstahlbehälter dienen als 1. und 2. Containment des Primärbehälters.

Auch in der Phase des eingeschränkten Betriebes muß gerade der Lagerung der Prozeßlösungen erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Zur Überwachung der Luft im Abklinglager wird über Aerosolpartikelfilter die Kontamination bestimmt. In der Regel liegen die Werte (Bq/m^3) unterhalb der Nachweisgrenze. Der höchsten ermittelten Werte betragen jedoch für ^{106}Ru 5 Bq/m^3 , für ^{137}Cs 8 Bq/m^3 , für ^{144}Ce 3 Bq/m^3 und für ^{125}Sb 2 Bq/m^3 . Andere Nuklide wurden nicht nachgewiesen. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Auswertung der Meßproben im Sumpfraum.

In der Tabelle 19 ist die Zusammensetzung der in den Abklinglagerbehältern gelagerten Prozeßlösungen umfassend charakterisiert. Die unterschiedliche Konzentrationen in den Lösungen sind durch unterschiedliche Spülregimes während der Produktionsruns bedingt.

Tab.19 *Zusammensetzung der Spaltstoff - Spaltproduktlösungen im AMOR I - Abklinglager*
(Meßdatum : 09.03.1992)

Lösung aus ALB	U (mg/ml)	U-235 (mg/ml)	Aktivität (MBq/ml)	Pu-239 (mg/ml)	Cd (mg/ml)	B (mg/ml)
1	1,5	0,5	74	$1,5 \cdot 10^{-4}$	3,7	0
2	0,04	0,016	0,07	$< 10^{-5}$	0	0
3	0,8	0,3	18	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0	0
6	1,4	0,5	3,7	$1,5 \cdot 10^{-4}$	4,0	0

Lösung aus ALB	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ (mg/ml)	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ (mg/ml)	HNO_3 (mg/ml)	SiO_2 (mg/ml)
1	160	0,15	10	0,5
2	10	0,01	1	0,05
3	100	0,15	5	0,2
6	160	0,15	10	0,5

In der Tabelle 20 ist der Status der Radionuklidzusammensetzung der gelagerten Prozeßlösungen zusammengetragen.

Tab.20 *γ*-Spaltprodukt nuklidaktivität der gelagerten Prozeßlösung
 Meßgerät: Ortec - Spektrometer, Meßdatum : 18.10.1991
 Meßvolumen : 1 ml

Nuklid	Aktivität (Bq/l)			
	ALB 1	ALB 2	ALB 3	ALB 6
¹⁴¹ Ce	7,4*10 ⁶	-	3,7*10 ⁷	-
¹⁴⁴ Ce	5,2*10 ⁹	7,5*10 ⁷	3,8*10 ⁹	2,6*10 ⁹
¹³⁷ Cs	5,3*10 ⁸	2,1*10 ⁷	2,6*10 ⁸	5,5*10 ⁸
⁹⁵ Nb	6,5*10 ⁷	4,2*10 ⁵	5,0*10 ⁸	2,4*10 ⁷
¹⁰³ Ru	1,4*10 ⁷	-	6,2*10 ⁸	-
¹⁰⁶ Ru	3,9*10 ⁸	7,7*10 ⁶	2,5*10 ⁸	2,3*10 ⁸
⁹⁵ Zr	3,1*10 ⁸	4,0*10 ⁵	4,0*10 ⁸	1,8*10 ⁷

In der Tabelle 21 ist die Gesamtaktivität aufgezeigt, die sich im Lager befindet.

Tab.21 *γ*-Spaltproduktgesamtaktivität der gelagerten Prozeßlösung
 Meßdatum : 18.10.1991

Lagerbehälter	Volumen/l	Aktivität/Bq
ALB 1	2337,7	1,5*10 ¹³
ALB 2	2229,4	2,4*10 ¹¹
ALB 3	1265,5	6,7*10 ¹²
ALB 6	2210,0	7,5*10 ¹²
Summe	8042,6	2,97*10 ¹³

3.6. Entwicklung und Testung von Demontagetechnologien

Wie schon an anderer Stelle ausgeführt, war die Heiße Zelle 2 ursprünglich nicht darauf optimiert, die Technologie der AMOR-I-Anlage aufzunehmen. Daraus folgte, daß die Anlagenkomponenten in äußerst gedrängter Form eingebaut werden mußten.

Unter diesen Bedingungen war es nicht möglich, schon bei der Montage der Anlagen, Gesichtspunkte einer späteren Demontage wesentlich zu berücksichtigen.

In der Tabelle 22 sind die in der HZ 2 zu demontierenden Anlagenkomponenten mit ihren Massen ausgewiesen.

Tab.22 Anlagenkomponenten und Massen der in der HZ 2 eingebauten Anlagenkomponenten

Gerät bzw Anlagenteil	Anzahl/Stück	m _{ges.} /kg
Löser, kompl.	1	105
Zentrifuge	1	50
Mischer	2	90
Gasometerfilter	1	12
Verdrängerfilter	1	12
Prozeßfilter	1	12
Gasometer	2	220
NO ₂ -Absorber	1	30
NO ₂ -Konverter	1	15
Eluatbehälter	3	100
Ventile, elektromagn.	48	150
Manometer	1	3
Ablagen	3	10
Unilift mit Schiene	1	60
Steckerplatten	3	16
Manipulatorwechsellvorrichtung	1	5
Objektabschirmung mit Gegengewicht	1	500
Rückschlagventil	6	2
Adapter für Iodfilter	1	2
Ratsche, Schlüssel	1	2
Rohrleitungen ca. 500 m		210
	Gesamt	1606

Die Anlage selbst ist überwiegend konventionell errichtet und nur ausgewählte Komponenten sind mit Solltrennstellen ausgerüstet. Für diese Solltrennstellen wurden zwei Metaldichtsysteme entwickelt, die mittels spezieller Hilfswerkzeuge fernbedient betätigt werden konnten.

Abbildung 29 zeigt die beiden Hilfswerkzeuge. Es ist ein Maulschlüssel (M) (Schlüsselweite 77 mm) und eine Ratsche (R) für einen Vierkant von 13 mm.

Mit Hilfe dieser Werkzeuge können z.B. alle in Abbildung 29 dargestellten Ventileinsätze (1), der Konverter (1) und die Iodfilter (2) in Abbildung 30 aus dem Anlagenverbund fernbedient demontiert werden.

Diese Montagetechnologie wurde in einer Simulierzelle erprobt und unter inaktiven Prozeßbedingungen in der Anlage getestet.

Die HZ 2 der AMOR-I besitzt keine separate Zelle zum Ausschleusen von Teilen. Die Zellentür befindet sich im Serviceraum in der hinteren Wand der Zelle.

Abbildung 31 zeigt die Zellentür (1) und ein Teil des Teleskopwagens (2). Dieser Wagen kann durch manuelle Handhabung in einem sicheren Abstand in die Zelle gefahren werden. Mit speziellen aufgesetzten Behältnissen können die fernbedient demontierbaren Anlagenteile aus der Zelle gebracht werden.

Bei der Demontage der Anlagen der HZ ist vorgesehen, am Türraum der HZ (Abbildung 31) ein Plastezelt (mit separater Abluftfiltrierung) als Schleuse einzubauen.

Es können nur wenige ausgesuchte Anlagenkomponenten fernbedient aus dem Anlagenverband demontiert werden. Das Ziel einer weiteren Demontage besteht darin, die Anlagentechnik so zu zertrennen, daß die Einzelteile in einem Standard-200-1 Abfallfaß abgegeben werden können.

Dazu werden entsprechende Werkzeuge untersucht. Es wurde folgendes festgelegt:

Zuerst werden nur span- und abfallfreie Techniken eingesetzt. Nur da, wo dies nicht möglich ist, sollen Trennscheiben, Stichsäge und Plasmabrenner eingesetzt werden.

Mit folgenden "Vorzugswerkzeugen" wurden Testungen ausgeführt:

- * Elektronibber Typ N350-0 (TRUMPF Grünsch AG) und
- * Hydraulische S 90 (Fa. Kugelfischer G. Schäfer KGaA)

* Elektronibber

In der Heißen Zelle wurde Edelstahltafelwerk für Abdeckungen und Konsolen bis max. 2 mm eingesetzt. An Modellen im Maßstab 1 : 1 konnten diese Stahlstrukturen mit dem Elektronibber zerkleinert werden. Der Nibber ist ein Handgerät, das durch einfache Griffhaltung mit dem Manipulator geführt werden kann.

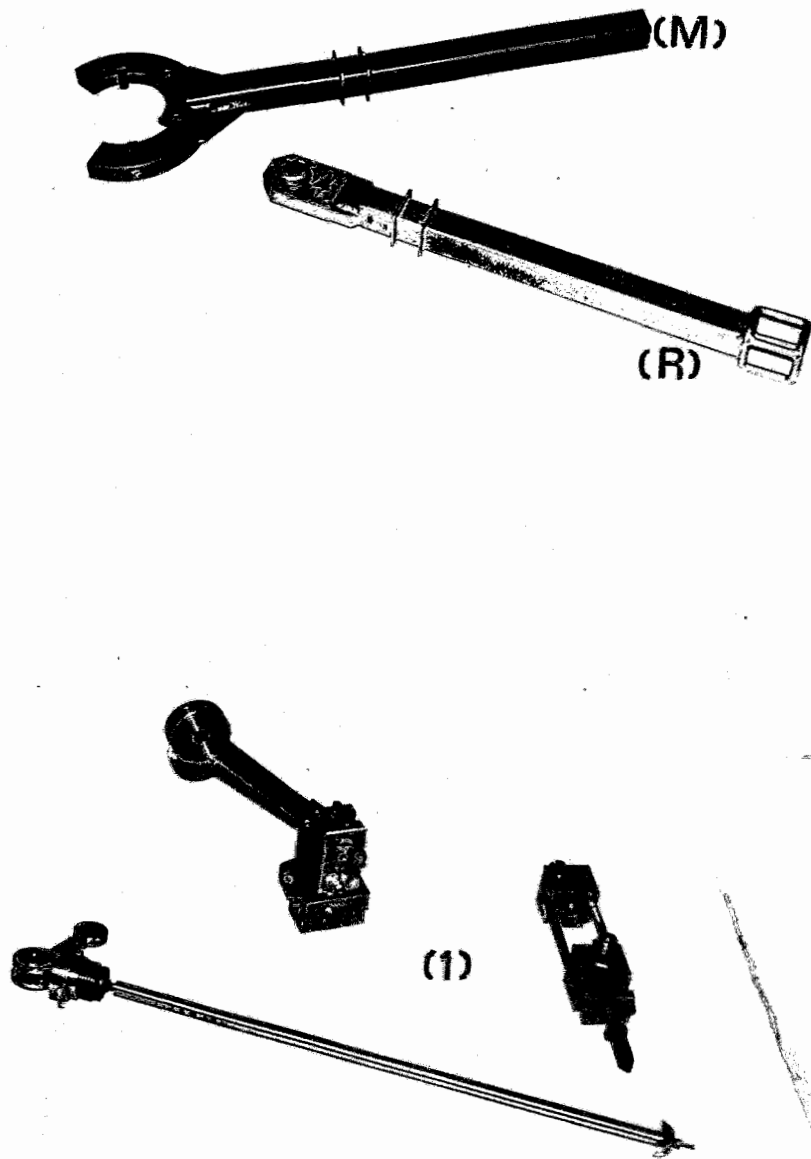


Abb. 29 Hilfswerkzeuge, Maulschlüssel (M) und Ratsche (R)
Ventile (1)

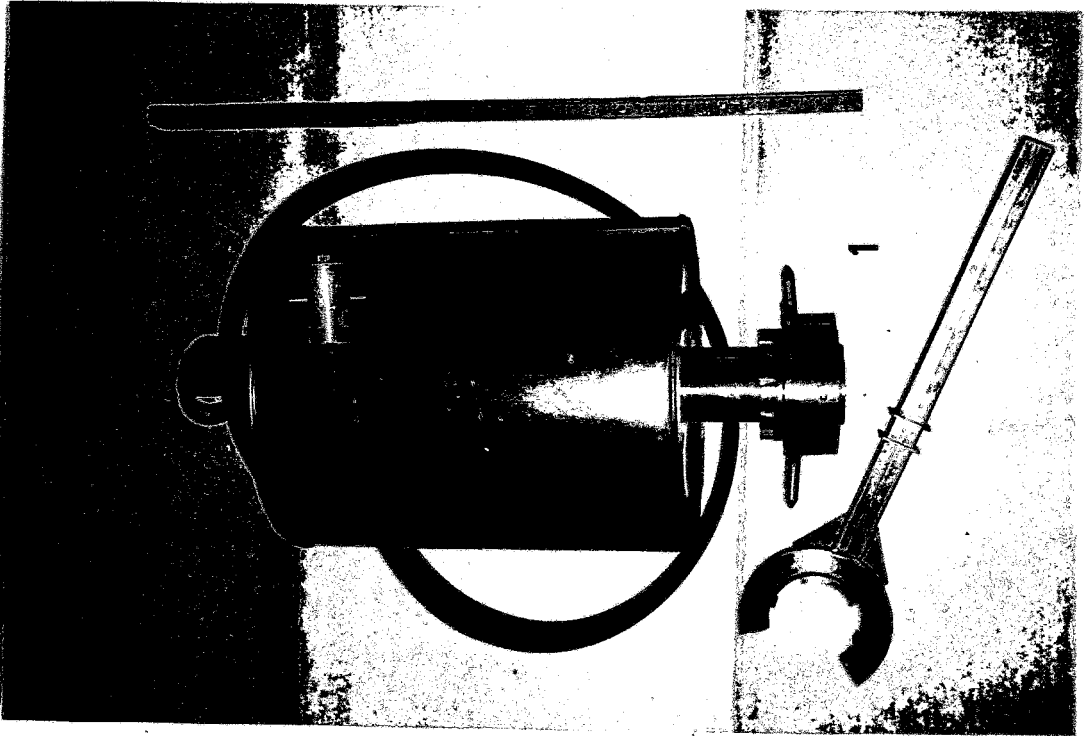
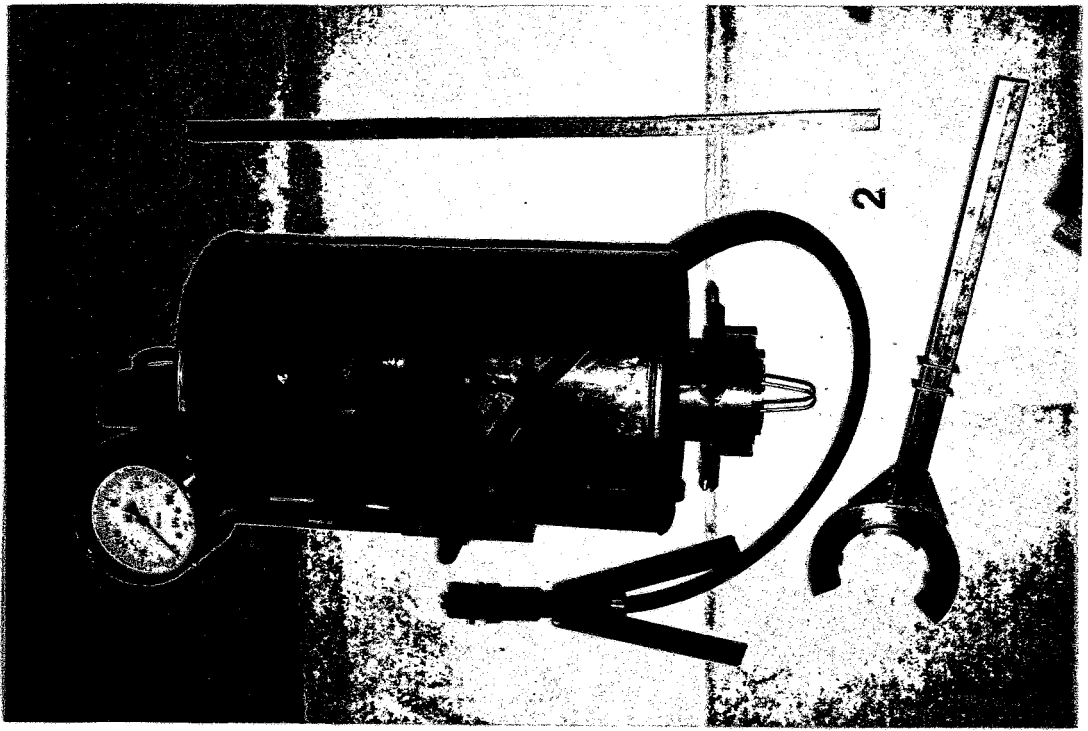


Abb. 30 Konverter (1) und Iodfilter (2), Ansicht



Abb. 31 Serviceraum HZ, Ansicht

* Hydraulikschiere

Die Verrohrung in der Heißen Zelle erfolgte überwiegend mit Edelstahlrohren 10 mm x 1 mm und 12 mm x 2 mm. Nur wenige Rohrstücke sind 36 mm x 2 mm. Nach Trennen dieser Rohrleitungen kann der überwiegende Teil der Apparaturen demontiert werden.

Die Erprobung der Hydraulikschiere erfolgte an Edelstahlrohren bis max. 40 mm x 2,5 mm Durchmesser bei einer Schnittkraft von 125 kN (Hydrauliknenndruck 520 bar). Diese Rohre konnten sicher geschnitten werden.

Eine Anpassung an den Manipulatorgriff erfolgte noch nicht. Aus Erfahrungen ist jedoch abzuleiten, daß eine Anpassung problemlos möglich sein wird.

Durch das Vorhandensein von Solltrennstellen und erprobten Hilfswerkzeugen können fernbedient ca. 20% der Gerätetechnik demontiert und in Standard-200-1 Abfallfässer abgegeben werden.

Die weitere Demontage geschieht durch zerstörendes Trennen mit den Vorzugswerkzeugen Elektronibber und Hydraulikschiere. Es wird abgeschätzt, daß ca. 70% der Anlagentechnik in die o.g. Abfallfässer verbracht werden können.

Problematisch wird der Abbau der drei "Großgeräte"

- 2 Stück Gasometer (2 Kammern je 250 l Volumen) und

- 1 Löser

Ob hierbei der Einsatz von Trennscheibe, Stichsäge oder Plasma-brenner sinnvoll ist, bedarf noch der Überprüfung.

4. Stilllegungsstrategie

Nach 10jährigem Betrieb ist geplant, die kerntechnische Anlage AMOR-I geordnet zu entleeren und stillzulegen.

Die bei den Stilllegungsmaßnahmen anfallenden radioaktiven Reststoffe und die zu demontierenden Anlagenteile sind schadlos zu verwerten oder als radioaktiver Abfall endzulagern.

Die Stilllegung und Beseitigung der Anlage soll in vier aufeinanderfolgenden Projektphasen durchgeführt werden.

Diese Phasen sind:

- Konzeption und Vorplanung,
- Erstellung der Genehmigungsunterlagen,
- Ausführungsplanung,
- Ausführung.

Die Konzeptions- sowie die Genehmigungsphase der Stilllegung sind als außerordentlich kompliziert zu betrachten.

Von entscheidender Bedeutung dabei ist, daß das Abklinglager noch bis 1996/1997 im bestimmungsgemäßen Betrieb gehalten werden muß, so daß dafür eine spezielle Nachbetriebsphase notwendig ist.

Auf der Grundlage des Sicherheitsberichtes /12/ erfolgte eine beschränkte Ausschreibung zu den geplanten Stilllegungsmaßnahmen.

Die Stilllegung soll nach dem Atomgesetz Paragraph 9 in Verbindung mit Paragraph 9a erfolgen. Nach der Beseitigung der Anlage verbleibt der Standort unter der Gesetzlichkeit der Strahlenschutzverordnung.

Die Massen der aus den Zellen zu demontierenden Stahleinbauten beträgt ca. 3,5 t, aus dem Zwischenlager 1,5 t und aus dem Abklinglager 30 t. Weiterhin ist mit ca. 400 t kontaminiertem Beton und 5,2 t Baustahl zu rechnen. Hinzu kommen die im Kontrollbereich installierten peripheren Geräte der Leit- und Versorgungstechnik und die speziellen Anlagen der Luft- und Filtertechnik.

Es ist unbedingt erforderlich, einschlägige Firmen mit nachweislichen Erfahrungen auf den Gebieten:

- des Betriebes, der Stilllegung und Beseitigung von kerntechnischen Anlagen,
- technischer Dekontaminationsprozeduren,
- der Behandlung radioaktiver Reststoffe und des Betriebes zugehöriger Entsorgungseinrichtungen einzubeziehen.

Der Zeitplan der Stilllegung gliedert sich in die in Tabelle 23 dargestellten Etappen.

Tab. 23 *Zeitplan der Stilllegung der Anlage AMOR-I*

Jahr	Maßnahme
1992	Antrag auf Stilllegung
1993	Genehmigungsphase und technisches Konzept
1994	Abklinglager vollständig entleert
1995	Genehmigung zur Stilllegung
1996	Beginn des Abbaus der AMOR-I-Anlage
1997	Weiterführung der Stilllegungsmaßnahmen
1998	Abbau des Abklinglagers
1999	Übergabe des Standortes zur Nachnutzung

Dieser Zeitplan kann sich durch ökonomische und genehmigungstechnische Unwägbarkeiten noch verändern.

Ein entscheidender Haltepunkt ist die plangerechte vollständige Entleerung des Abklinglagers. Dies bedingt, daß der Betrieb der Anlage AMOR-II technisch und genehmigungsrechtlich wie vorgesehen erfolgt.

5. Zusammenfassung

In der Anlage AMOR-I wurden 200 h im Reaktorcore eingesetzte originale Brennelemente von Forschungsreaktoren zum Zwecke der Spaltnolybdängewinnung chemisch aufgearbeitet.

Nach zehnjähriger Betriebszeit wurde die Aufarbeitung Ende 1990 eigestellt.

Errichtet und betrieben wurde die Anlage entsprechend der atomrechtlichen Gesetzgebung der ehemaligen DDR.

Diese Genehmigungen wurden befristet erteilt.

Das gegenwärtig anstehende Genehmigungsverfahren zur Stilllegung verkompliziert sich dadurch, daß die erste Antragstellung in die Phase der Übernahme der atomrechtlichen Gesetzlichkeit der BRD fiel.

Die in einer 10jährigen Betriebszeit durchgeführten über 400 Produktionsruns bezeugen die hohe Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit der Anlage.

Die Betriebsergebnisse sind in diesem Report dokumentiert.

Es wurden in über 400 Produktionsruns eine Spaltproduktaktivität von $4,2 \cdot 10^{17}$ Bq durchgesetzt und $8,5 \cdot 10^{15}$ Bq ^{99}Mo erzeugt.

Dazu sind 39 kg angereichertes Uran verarbeitet worden.

Zur Zeit befinden sich noch 8042 l Prozeßlösung mit einer Spaltproduktaktivität von $2,97 \cdot 10^{13}$ Bq in vier Lagertanks des Abklinglagers. Aus diesen Lösungen muß in der Anlage AMOR-II noch das Uran zurückgewonnen werden, bevor die Restspaltproduktlösung als konditionierter radioaktiver Abfall einem entsprechenden Zwischenlager zugeführt werden kann.

Erst danach ist es technologisch möglich, mit dem Abbau der Lagersysteme und der Gerätesysteme in der Heißen Zelle 2 zu beginnen.

Die Prozeßapparaturen der AMOR-Anlage wurden in zwei Heißen Zellen, drei Warmen Zellen, einem Zwischenlager und einem Abklinglager installiert.

Die Massen der aus den Zellen zu demontierenden Stahleinbauten betragen ca. 3,5 t, aus dem Zwischenlager 1,5 t und aus dem Abklinglager 30 t. Weiterhin ist mit 400 t kontaminiertem Beton und 5,2 t Baustahl zu rechnen.

Das Kontaminationskataster der Heißen Zelle weist aus, daß die Dosisleistung 260 Tage nach Produktionsende um zwei Größenordnungen gefallen ist, nach zweijähriger Abklingzeit um drei Größenordnungen und liegt derzeit in der Zellenmitte bei 10 mGy/h.

Vor dem eigentlichen Abbau muß dieses Kataster aktualisiert werden.

Die in externen Bestrahlungsversuchen ermittelten Strahlenbeständigkeiten der unterschiedlichsten eingesetzten Materialien wurden im praktischen Einsatz bestätigt.

Die Materialbeständigkeit insbesondere von Kunststoffen aber erniedrigte sich durch die gleichzeitige Wirkung von radioaktiver Strahlung und chemischem Agens. Für die eingesetzten Stähle konnte kein Einfluß ermittelt werden.

Als Dekontaminationsmittel für "Hot spots" bewährten sich fluoridhaltige Beizmittel.

Es wurden an Originalteilen korrosiv bedingte Eindringtiefen von Spaltprodukten bis 10 µm in den verwendeten Stahlmaterialien festgestellt.

Der Einbau der Anlage erfolgte in vorhandene Zellen-systeme, so daß sich die räumliche Konzentriertheit der Rohrleitungen und Anlagensysteme nachteilig auf die fernbediente Demontage auswirkt. Von der Prozeßtechnik in der Heißen Zelle können ca. 20% über vorhandene Solltrennstellen fernbedient demontiert werden. Der Abbau des überwiegenden Teiles der Anlage erfordert aber ein vorheriges mechanisches Durchtrennen von Rohrleitungen.

Für isoto-penproduktionstechnische Neuanlagen sollte das dargestellte FEMO-Konzept (Konzept der fernbedienbaren Modultechnik) verwirklicht werden. Die Durchsetzung dieses Konzeptes ermöglicht in der Stilllegungsphase dann auch eine Dekontamination aller Anlagenteile im Zellekontainment und die vollständige fernbediente Demontage aller Anlagensysteme und aller notwendigen Medienleitungen.

Die Stilllegung und Beseitigung der Anlage soll in vier aufeinanderfolgenden Projektphasen durchgeführt werden:

- der Konzeption und Vorplanung,
- der Erstellung der Genehmigungsunterlagen,
- der Ausführungsplanung und
- des eigentlichen Abbaus.

Der jetzige Zeitplan sieht eine Beendigung der Stilllegungsmaßnahmen 1999 mit der Übergabe des Standortes zur Nachnutzung vor.

6. Literatur

- /1/ Gesetz über die Anwendung der Atomenergie und den Schutz vor ihren Gefahren - Atomenergieweggesetz - Gesetzblatt der DDR, Teil I, Nr. 34 (1983)
- /2/ Anordnung über die Erteilung der Strahlenschutzgenehmigung für Kernanlagen - Kernanlagen-Genehmigungsordnung - Gesetzblatt der DDR, Teil I, Nr. 21130719979
- /3/ Atomgesetz mit Verordnungen
Nomos Verlagsgesellschaft Baden-Baden
13. Auflage
- /4/ Bernhard, G., Boeßert, W., Grahnert, T., Hladik, O., Krompass, R.
A Fuel Cycle of the Fission Molybdenum Production
Isotopenpraxis 26 (1990) 3, 93-97
- /5/ Bernhard, G., Hladik, O.
Large Scale Production of Fission ⁹⁹Mo by using Fuel Elements of a Research Reactor as Starting Material
Int.J.Appl.Radiat.Isot. 35 (1984) 749
- /6/ Bernhard, G., Boeßert, W., Hladik, O.
Zur Auflösung aluminiumgemantelter Brennelemente
Kernenergie 27 (1984)
- /7/ Schwarzbach, R., Hladik, O.
Ein Filter zur Luftüberwachung auf Radioiod
Kernenergie 27 (1983) II.1
- /8/ Boeßert, W., Bernhard, G., Hladik, O.
An Advanced Modular Hot Cell Technique
Isotopenpraxis 26 (1990) 3
- /9/ Boeßert, W., Bernhard, G.
Technologische Möglichkeiten zur Untersuchung radioaktiver Materialien und Kernbrennstoffe am Standort Rossendorf
FZR 92 - 08 (1992)
- /10/ Güthert, A.
Decontamination Studies, Part I
Report ZFK-669 (1988) 19
- /11/ Güthert, A.
Decontamination Studies, Part 2
Report ZFK-739 (1990) 27
- 12/ Sicherheitsbericht zur gezielten Stilllegung und geordneten Entleerung der AMOR-I-Anlage
ZFK (1991)

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (Förderkennzeichen 02 S 7370 8, Projektträger für Entsorgung des BMFT) gefördert.