

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Januar 1969

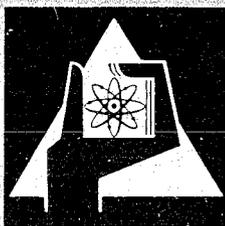
KFK 953

Institut Max von Laue - Paul Langevin, Grenoble

Projektgruppe

Der deutsch-französische Hochflußreaktor in Grenoble

J. Chatoux, W. Eisermann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Der deutsch-französische Hochflußreaktor in Grenoble

Von J. Chatoux und W. Eisermann, Paris

1. Zweck und Zielsetzung

Der für das deutsch-französische *Institut Max von Laue — Paul Langevin* geplante Hochflußreaktor dient der physikalischen Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Kernphysik, der Physik der Festkörper und Flüssigkeiten.

Der Auslegung des Reaktors liegt folgende Zielsetzung zugrunde:

— Es soll eine möglichst große Anzahl von Strahlrohren für Experimentierzwecke zur Verfügung gestellt werden. Der Qualität der Neutronenstrahlung (großer Quotient aus thermischem Neutronenfluß zu epithermischem, schnellem und γ -Fluß) und der Flexibilität der Experimentiereinrichtungen wird Vorrang über die Strahlenintensität gegeben. Der gestörte thermische Neutronenfluß an den Strahlrohrnasen soll 10^{15} n/cm²s betragen.

— Komplexe Experimentiereinrichtungen wie z. B. Kalte Quelle, Heiße Quelle, Strahlrohre mit Innentargets zur Spaltprodukterzeugung, Strahlrohre für Konversionselektronen usw. sind integrierte Bestandteile des Reaktors. Eine Flußfalle zur Bestrahlung größerer Mengen von Transuranen ist nicht vorgesehen.

— Der Reaktorblock und Teile der Abschirmung müssen austauschbar ausgelegt werden, damit Änderungen an den Experimentiereinrichtungen zur Anpassung der Anlage an neue Experimentierprogramme und -techniken möglich sind. Um Anhaltspunkte über die Häufigkeit der vorzunehmenden Änderungen zu haben, wurde festgelegt, daß etwa alle vier Jahre mit größeren Umbauten zu rechnen ist.

— Um den zeitlichen und finanziellen Aufwand in vertretbaren Grenzen zu halten, soll auf Neuentwicklungen so weit wie möglich verzichtet werden, d. h., es sollen bekannte Techniken und Verfahren angewandt werden. Darüber hinaus soll der Reaktor im Hinblick auf möglichst niedrige Brennstoffkosten, die einen wesentlichen Anteil an den Betriebskosten haben, optimiert werden.

2. Auslegung des Reaktors

Unter den bisher geplanten und gebauten Höchstflußneutronenquellen [1] ist der Hochflußreaktor Grenoble am ehesten mit dem seit 1966 in Betrieb befindlichen *HFBR* [2] vergleichbar.

In Europa geht die historische Entwicklung zurück auf Voruntersuchungen, die in Großbritannien begonnen und in den Jahren 1962 bis 1964 von der *OECD* durchgeführt

Für das deutsch-französische Institut Max von Laue — Paul Langevin wird in Grenoble ein Hochflußreaktor errichtet. Mit einem schwerwassergekühlten untermoderierten Core wird in einem großen Reflektor ein gestörter thermischer Neutronenfluß von 10^{15} n/cm²s erzeugt, der zur Durchführung von Experimenten auf den Gebieten der Kernphysik und der Physik der Festkörper dient. Komplexe Experimentiereinrichtungen wie z. B. Kalte Quelle, Heiße Quelle, Strahlrohre mit Innentargets zur Spaltprodukterzeugung, Strahlrohre für Konversionselektronen usw. sind Bestandteile des Reaktors.



Dieser Beitrag erscheint im Rahmen der redaktionellen Zusammenarbeit der Europressatom-Gruppe in französischer Sprache in der Zeitschrift „énergie nucléaire“.

wurden. Von französischer Seite wurden die Arbeiten weiter intensiviert und auf der Genfer Atomkonferenz 1964 darüber berichtet [3]. Im Anschluß daran kamen deutsch-französische Kontakte zustande. Bis zur Gründung des Instituts Max von Laue — Paul Langevin im Januar 1967 haben Studiengruppen in Deutschland und Frankreich in enger Zusammenarbeit die Untersuchungen durchgeführt, die zur Festlegung des Reaktorkonzepts erforderlich waren. Dabei stand im Vordergrund die Auswahl des geeigneten Kühlmittels (Schwerwasser oder Leichtwasser). Neben der physikalisch-thermodynamischen Core-Auslegung waren in diesem Zusammenhang auch Fragen bezüglich der Konstruktion des Reaktorblocks und der Anordnung der Kühlkreisläufe zu prüfen. Über die wichtigsten Ergebnisse dieser Studien wurde auf dem von *ENEA* und *AEC* veranstalteten „Seminar on Intense Neutron Sources“ im September 1966 in Santa Fé, USA, berichtet [4].

Im folgenden wird nur auf das gewählte Konzept Bezug genommen.

Der Hochflußreaktor Grenoble, dessen Hauptdaten in Tab. 1 zusammengestellt sind, besteht aus einem kompakten, untermoderierten, D₂O-gekühlten Core, das von einem großen Schwerwasserreflektor umgeben ist. Die Strahlrohre dringen in den Reflektorraum ein und enden im Bereich des sich dort einstellenden thermischen Flußmaximums. Die Orientierung ihrer Achsen gegenüber dem Core ist, den gewünschten Neutronenenergien und Untergrundverhältnissen entsprechend, radial bzw. tangential. Der Auslegung des Reaktors liegt ein gestörter thermischer Neutronenfluß von 10^{15} n/cm²s an den Strahlrohrnasen zugrunde.

Zur Erzielung einer möglichst großen Flexibilität wurde der Reaktortank in einem H₂O-Becken angeordnet. Dadurch wird eine thermische Abschirmung überflüssig. Auch nach längerem Betrieb des Reaktors ist das Arbeiten im Becken, nach Demontage der Einbauten, wegen der geringen Aktivierung der Beckenwände möglich.

Es wurde angestrebt, den Druck im Reflektor möglichst niedrig zu halten, um die Experimentiereinrichtungen dünnwandig ausführen zu können. Kleine Wandstärken der Experimentierkanäle wirken sich einerseits günstig auf die Reaktivitätsbilanz und die Flußdepression im Reflektor aus, andererseits wird dabei eine gute Qualität des für Experimente zur Verfügung stehenden Neutronenflusses erreicht. Mit 3,2 bar Betriebsdruck im Reflektor können die Experimentiereinrichtungen noch relativ dünnwandig ausgeführt werden, und gleichzeitig kann mit diesem Druck am Kühlkanalende die Core-Kühlung sichergestellt werden. Der Kühlkreislauf konnte deshalb wie folgt ausgelegt werden: Kühlwasser wird durch ein vertikales Führungsrohr (Kamin) dem Brennelement zugeführt, durchströmt es von oben nach unten, tritt am Brennelementfuß in den Reflektorraum über und durch-

Anschrift der Verfasser:

J. Chatoux, Projektleiter, Delegierter des CEA-Departement des Constructions des Piles, Saclay, und W. Eisermann, stellv. Projektleiter, Delegierter der Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe, z. Z. beide Institut Max von Laue — Paul Langevin, Hochflußreaktorprojekt, 39. Avenue d'Iéna, Paris XVI, Frankreich.

Tabelle 1: Daten des Hochflußreaktors Grenoble

Nennleistung	57 MW	Uran		
Kühlmittel	D ₂ O	Anreicherung von U-235	93	%
Reflektor	D ₂ O	Gesamtmenge U-235 pro Element	8,57	kg
Neutronenfluß bei Nennleistung		Abbrandgift an den Plattenenden (B 10)	14,8	g
thermischer Fluß		Abbrand: mittlerer	30	%
maximal, ungestört im Reflektor	1,5·10 ¹⁵ n/cm ² s	maximal	60	%
minimal, gestört an der Nase eines tangentialen Kanals	10 ¹⁵ n/cm ² s	Kühlung:		
mittel im Brennelement	2,2·10 ¹⁴ n/cm ² s	Leistung		
mittel im Schwerwasser	1,8·10 ¹⁴ n/cm ² s	Brennelement	53	MW
schneller Fluß (> 0,8 MeV)		Regelstab und zentraler, D ₂ Ogefüllter Raum	1,2	MW
maximal an der Brennelementoberfläche	3,5·10 ¹⁴ n/cm ² s	Reflektor	2,8	MW
maximal an der Regelstaboberfläche	2,7·10 ¹⁴ n/cm ² s	Nennleistung	57	MW
an den Strahlrohrnasen	1,5·10 ¹² n/cm ² s	Grenzleistung für Schnellabschaltung	62,7	MW
Reaktivität		Grenzleistung, bei der die Kühlung versagt	85	MW
Uranabbrand	10 500 pcm*)	Leistungsdichte		
Xe- und Sm-Vergiftung	5 000 pcm	maximal	3,3	MW/l
Unverbranntes Bor	500 pcm	mittlere	1,145	MW/l
Strahlrohre und sonstige Einbauten im Reflektor	5 000 pcm	Wärmefluß		
Temperatureffekt	600 pcm	maximal	500	W/cm ²
Reserve am Zyklusende	1 500 pcm	mittlerer	174	W/cm ²
Sicherheitsstäbe in Betriebsstellung	200 pcm	Kühlmitteldurchsatz		
Abbrandgift	5 100 pcm	im Brennelement bei Normalbetrieb	2180	m ³ /h
Regelstab	15 500 pcm	im Brennelement bei abgeschaltetem Reaktor	150	m ³ /h
Brennelement:		im Regelstab bei Normalbetrieb	75	m ³ /h
Form: ringförmig, Platten evolventenförmig		im Regelstab bei abgeschaltetem Reaktor	50	m ³ /h
Aktive Zone		Kühlmittelgeschwindigkeit zwischen den Platten	15,5	m/s
mittlerer Innenradius	14,0 cm	Kühlmitteldruck		
mittlerer Außenradius	19,5 cm	Brennelementeintritt-Auslegung	14	bar
Höhe	80,0 cm	Brennelementaustritt	3,2	bar
Wärmeübertragende Fläche	30,17 m ²	Reflektor-Auslegung	4	bar
Volumen	46,3 dm ³	Druckabfall im Brennelement	9,5	bar
Platten		Temperatur		
Gesamtstärke	1,27 mm	Brennelementeintritt	30	°C
Stärke der Hülle	0,38 mm	Brennelementaustritt (mittel)	49	°C
Meatstärke	0,51 mm	Brennelementaustritt (maximal)	91,5	°C
Abstand (Kühlkanalstärke)	1,8 mm	Austritt Reflektor	50,5	°C
Anzahl	280	Plattenoberfläche maximal	147	°C
		Sekundärkühlmittel-Eintritt	15	°C
		Zyklusdauer	36	d

*) 1 pcm = 10⁻⁵ % k.

strömt dann in umgekehrter Richtung den Reflektor, wobei es das Core und alle im Reflektor vorhandenen Strukturmaterialien und Experimentierkanäle kühlt. Neben der Einfachheit dieser Anordnung besteht ein weiterer Vorteil, den wir im Kapitel über Werkstoff-Fragen näher erläutern werden, darin, daß die Außenhülle des Brennelements als Druckbehälter dienen kann. Demgegenüber ist der Nachteil einer relativ hohen Moderator-temperatur (ca. 50° C) tragbar.

Die Regelung des Reaktors erfolgt durch einen zentralen Stab aus Nickel, dessen Antrieb unterhalb des Beckens angeordnet ist. Der Schnellabschaltung des Reaktors dienen fünf Abschaltstäbe, die von oben in den Reflektor eingeschossen werden und deren Achsen aus geometrischen Gründen schräg gestellt sind.

Der Raum im Becken oberhalb des Reaktors wird genutzt zum Einbau vertikaler Experimentiereinrichtungen und zur Be- und Entladung der Brennelemente. Zum Brennelementwechsel ist eine Unterwassermaschine vorgesehen, die mit D₂O gefüllt ist und dicht an den Kamin des Reaktors angekuppelt wird. Die Wechselmaschine ist in ihrem Aufbau relativ einfach, da die Abschirmung durch das umgebende Beckenwasser gewährleistet wird und die

Nachwärme des Brennelements über einen mit Naturkonvektion arbeitenden Wärmetauscher an das Beckenwasser abgeführt werden kann.

3. Gesamtanordnung

Das Gelände des Instituts Max von Laue — Paul Langevin in Grenoble liegt am Zusammenfluß von Isère und Drac. Es schließt sich an das Gelände des *Centre d'Etudes Nucléaires* an (siehe Abb. 1).

Die Kühlkreisläufe und Reaktorhilfseinrichtungen sind weitgehend im Reaktorgebäude untergebracht, mit Ausnahme der elektrotechnischen Anlagen. Die Schaltwarte mit Geräteraum, Meßwertverarbeitung, Batterien usw. befindet sich im mehrstöckigen Betriebsgebäude, das sich unmittelbar an das Reaktorgebäude anschließt. Transformatoren und Dieselnotsstromaggregate sind im Verbindungsbau zwischen Betriebsgebäude und Halle für Versuchsvorbereitung untergebracht. Wegen der Explosionsgefahr, die mit dem Betrieb von Anlagen mit Deuteriumgas verbunden ist, ist für die D₂O-Aufkonzentrierung und -Detritiation ein separates Gebäude vorgesehen. Das sekundäre Kühlwasser wird direkt dem Drac entnommen.

Es steht in ausreichenden Mengen mit einer maximalen Temperatur von 15° C zur Verfügung.

Ein Modell der Instituts-, Reaktor- und Betriebsgebäude zeigt Abb. 2.

4. Beschreibung

4.1. Reaktorblock und Abschirmung

Einen Vertikalschnitt durch den Reaktor mit Abschirmung zeigt Abb. 3.

Der Reflektortank mit einem Durchmesser von 2500 mm hat ein Volumen von 15 m³. Der untere Teil des Tanks ist unter Berücksichtigung der besonderen hydraulischen Verhältnisse konstruiert: der Kühlmittelstrom, der mit einer Geschwindigkeit von 15,5 m/s aus dem Brennelement austritt, muß um 180° umgelenkt und möglichst wirbelfrei durch den Reflektorraum geführt werden, damit keine Schwingungen der Strahlrohre auftreten. Ein Diffusor und zwei hintereinandergeschaltete Beruhigungsgitter sind vorgesehen.

Der Deckel des Reflektortanks ist ca. 3000 mm hoch. Damit wird eine große Steifigkeit erreicht und die Materialanhäufung am Reflektorrand genügend niedrig gehalten, so daß keine Kühlungsprobleme an dieser Stelle auftreten. Gleichzeitig wird erreicht, daß die Oberkante des Deckels, bei abgeschaltetem Reaktor und abgesenktem Wasserspiegel im Becken, begehrbar ist. Von einer Plattform aus sind demnach alle Abdichtungen vertikaler Einbauten gut zugänglich. Die Abdichtungen auf diesem Niveau können zudem aus organischem Material hergestellt werden, weil die Strahlenbelastung bei in Betrieb befindlichem Reaktor entsprechend niedrig liegt.

Zentral im Deckel des Reflektortanks ist ein Kamin angeordnet, der bis zum Brennelementkopf in den Reflektorraum ragt. Durch diesen Kamin werden die Brennelemente ein- und ausgebaut und er dient beim Betrieb des Reaktors als Kühlmittelzulauf. Verbindungskanäle zwischen Kamin und Reflektorraum ermöglichen die Kühlung des Cores durch Naturkonvektion. Diese Kanäle sind normalerweise durch Ventile, die mit dem Druck der Kühlpumpen beaufschlagt werden, verschlossen. Bei Stillstand aller Kühlpumpen öffnen die Ventile selbsttätig.

Zur *Schnellabschaltung* des Reaktors sind 5 Sicherheitsstäbe vorgesehen, die im Deckel des Reflektortanks montiert werden und in eingefahrenem Zustand die Core-Oberfläche abschirmen. Sie werden mit einem pneumatischen Antrieb ausgerüstet.

Die *Regelung des Reaktors* erfolgt durch einen einzigen Stab aus Nickel im Zentrum des Brennelements. Sein Antrieb, der sich im Raum unterhalb des Beckens befindet, und die Verbindung zwischen Absorber und Antrieb sind so sicher ausgelegt, daß der Stab auch unter den ungünstigsten Bedingungen nur langsam ausfahren kann. Die Abdichtung der Antriebsstange (Schwerwasser gegen Gebäudeatmosphäre) erfolgt durch eine Mehrfachstopfbüchse. Zur Durchführung von Wartungsarbeiten an dieser Stopfbüchse kann das D₂O im Spalt mittels flüssigen Stickstoffs eingefroren werden.

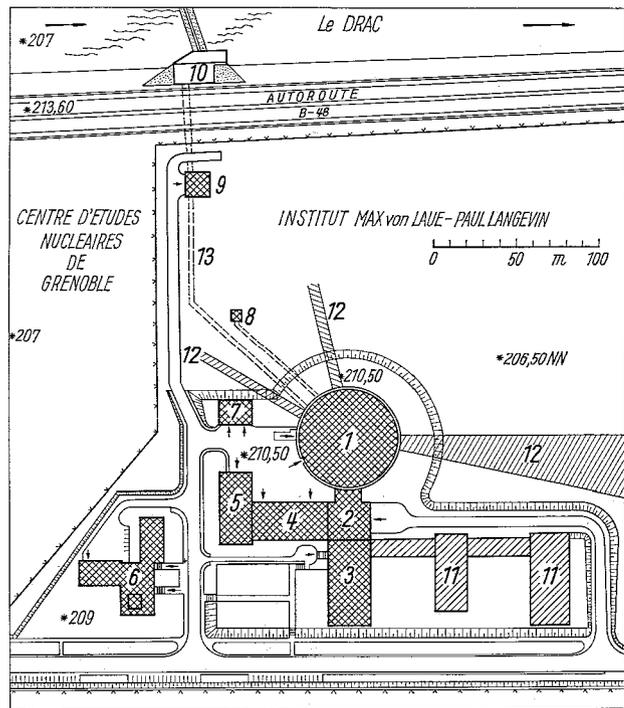


Abb. 1: Lageplan des Instituts Max von Laue—Paul Langevin mit Hochflußreaktor.

- 1 Reaktorgebäude
- 2 Betriebsgebäude
- 3 Büro- und Laborgebäude
- 2. Baustufe
- 4 Trafo-, Diesel- und Werkstattgebäude
- 5 Halle für Versuchsvorbereitung
- 6 Büro- und Laborgebäude
- 1. Baustufe
- 7 D₂O-Aufkonzentrierungs- und Detritationsanlage
- 8 Abluftkamin
- 9 Pumpenhaus für Sekundärkühlkreislauf
- 10 Stauwerk mit Ein- und Auslauf für Sekundärkühlkreislauf
- 11 Erweiterungsmöglichkeiten für Institutsgebäude
- 12 Externe Experimentierzonen
- 13 Sekundär-Kühlwasserleitung

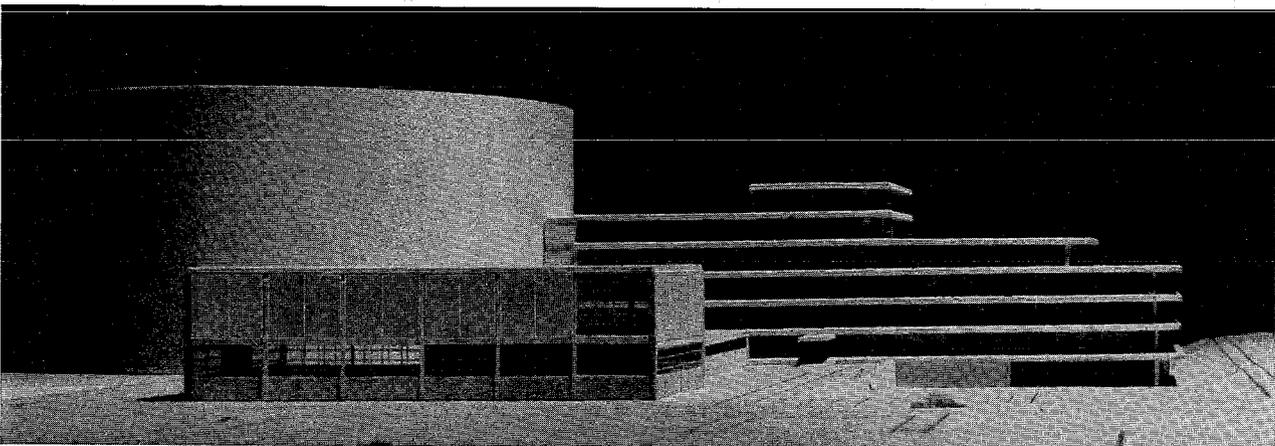


Abb. 2: Modell der Instituts-, Reaktor- und Betriebsgebäude.

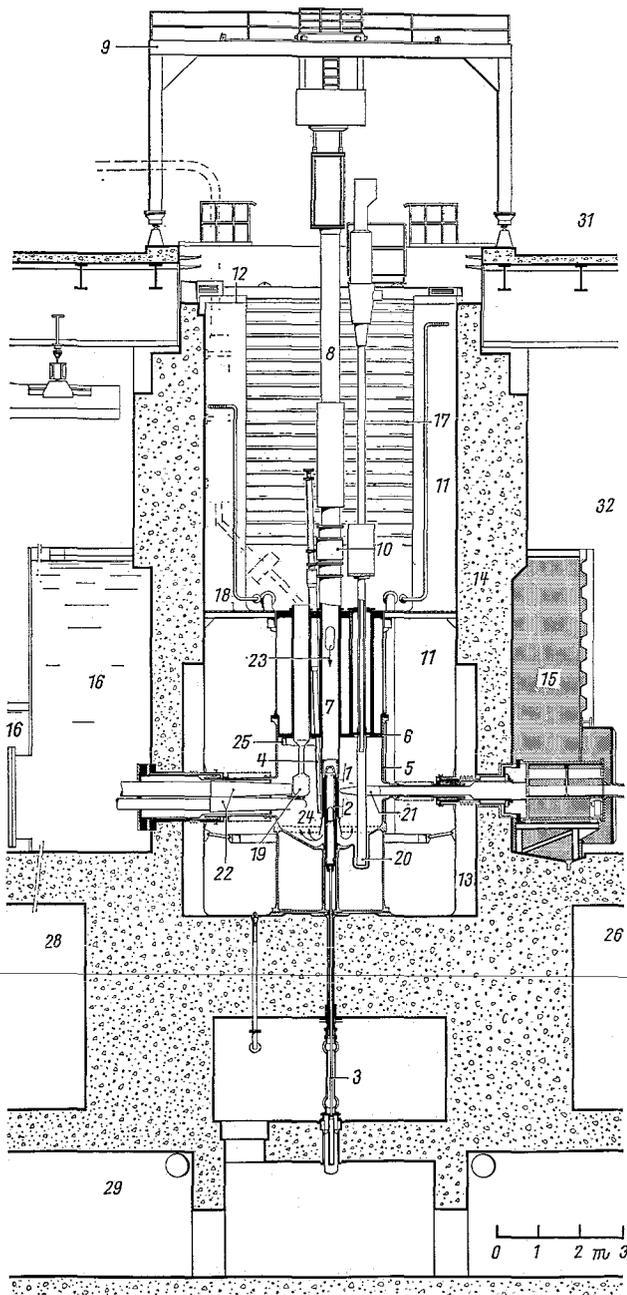


Abb. 3: Vertikalschnitt durch Reaktorblock mit Abschirmung.

- | | |
|--|--|
| 1 Brennelement | 17 Schleusentor zwischen Becken und Transportkanal |
| 2 Regelstab | 18 Arbeitsbühne |
| 3 Regelstabantrieb | 19 Experimentiereinrichtung: Kalte Quelle |
| 4 Sicherheitsstab | 20 Experimentiereinrichtung: β -Kanal |
| 5 Reflektortank | 21 Experimentiereinrichtung: Strahlrohre |
| 6 Reflektortank-Deckel | 22 Experimentiereinrichtung: Neutronenleiter |
| 7 Kamin | 23 Kühlmittel-Zulauf |
| 8 Brennelement-Wechselmaschine | 24 Kühlmittel-Umlenkung |
| 9 Versetzwagen für 8 | 25 Kühlmittel-Ablauf |
| 10 Kupplung zwischen Brennelement-Wechselmaschine und Reaktorkamin | 28 Kellergeschoß: Kreisläufe |
| 11 Becken | 29 Krypta: Schwerwasser-Auffang- und Lagerbehälter |
| 12 Wasserstand im Becken | 31 Beckenhalle: Betriebsanlagen und Experimente |
| 13 Luftspalt | 32 Experimentierhalle: Experimentiereinrichtungen |
| 14 Beton | |
| 15 Sand-Wasser-Abschirmung | |
| 16 Wasserabschirmung im Bereich der Neutronenleiter | |

Abb. 4 zeigt die Anordnung der Experimentiereinrichtungen. Die Achsen der horizontalen Experimentierkanäle liegen im Bereich ± 250 mm um die Mittelebene des Cores. In vertikaler Richtung werden eingebaut: eine mit flüssigem Deuterium gefüllte Moderatorzelle, deren Rauminhalt ca. 40 l beträgt, als Quelle für kalte Neutronen; ein aus Graphit bestehender Block von ca. 20 cm Durchmesser und 30 cm Höhe, der durch nukleare Aufheizung eine Temperatur von ca. 2000 °K annimmt, als Quelle für heiße Neutronen sowie ein Kanal zur Erzeugung von Konversionselektronen, der im Zusammenhang mit einem β -Spektrometer betrieben wird. Darüber hinaus sind vier geneigte Strahlrohre vorgesehen, deren Achsen unter einem Winkel von 35° gegen die Horizontale verlaufen. Die Strahlrohre haben in der Regel einen Querschnitt von 50 · 200 mm oder werden konisch ausgeführt, beginnend an der Strahlrohrnase mit einem Durchmesser von 100 mm, der sich im Reflektorraum auf 150 mm vergrößert. Die Strahlrohre sind an der Betonabschirmung angeflanscht. Dadurch werden sie zwar verhältnismäßig lang, es ergeben sich jedoch folgende Vorteile: relativ einfache Montage, Zugänglichkeit der Dichtstelle und die Möglichkeit, eine Weichdichtung zu verwenden. Das gleiche Prinzip wird für die Mantelrohre zwischen Reflektortank und Beckenwand angewandt.

Die Detektoren für die Neutronenflußmessung werden seitlich am Reflektorrand plaziert. Es handelt sich dabei um fest installierte Ionisationskammern für das Sicherheitssystem und für die Regelung des Reaktors im Nennleistungsbereich sowie um beweg-

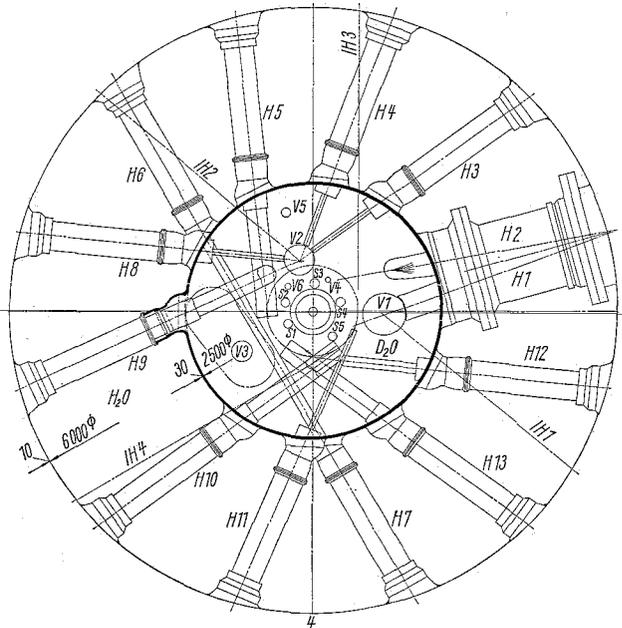


Abb. 4: Anordnung der Experimentiereinrichtungen.

liche Spaltkammern für das Anfahrssystem. Die beim Reaktorstart zu Beginn eines jeden Betriebszyklus erforderliche Neutronenquelle wird an der den Meßkammern gegenüberliegenden Seite des Reflektortanks eingesetzt.

Die Abschirmung des Reaktors in radialer Richtung besteht im Anschluß an den Reflektortank aus 1,75 m Leichtwasser (Becken), 80 cm Beton und daran anschließend aus einer 2 m starken Wasser-Sand-Schicht. Die Sandabschirmung gewährleistet im Bereich der Experimentier-Nischen eine gute Flexibilität in bezug auf die Einbauten¹⁾.

Eine wesentliche Forderung an die Konstruktion des Reaktors besteht darin, daß bei einem Reaktorunfall das Leerlaufen des Reaktortanks verhindert werden soll, um ein Abschmelzen des Brennelements an Luft zu vermeiden, das die Freisetzung großer

¹⁾ Nach Fertigstellung des Manuskripts wurde das Konzept der Abschirmung dahingehend geändert, daß die Wasser-Sand-Abschirmung entfällt, dafür die Beckenwand 1,2 m stark und aus Schwerbeton ($\gamma = 5,5 \text{ t/m}^3$) hergestellt wird und, soweit es zweckmäßig ist, die Experimentiereinrichtungen mit einer Wasserabschirmung umgeben werden.

Aktivitätsmengen bei gleichzeitigem Druckaufbau im Gebäude zur Folge hätte. Die bei einem nuklearen Unfall entsprechend *Spart I* freigesetzte mechanische Energie (Dampfexplosion), die beim Verdampfen des Deuteriums in der Kalten Quelle freigesetzte Energie und die bei der Abkühlung des Graphitblocks der Heißen Quelle freigesetzte Energie (Dampfexplosion) würde ca. 20 Mega-Joule betragen. Die Stahlauskleidung des Beckens ist theoretisch in der Lage, diese Energie durch Formänderung und ohne Bruch zu absorbieren. Ein Luftspalt von 50 cm zwischen Auskleidung und Betonabschirmung sorgt dafür, daß die Energie nicht auf den Betonteil übertragen wird.

Der Reflektortank wird aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung hergestellt. Die Wandstärke des Mantels beträgt 30 mm. Würde man in der Nähe der Brennelementoberfläche Strukturmaterial anbringen, z. B. einen Drucktank, der den Differenzdruck zwischen Core und Reflektor aufnimmt, so würde der an dieser Stelle vorhandene schnelle Neutronenfluß ($3,5 \cdot 10^{14}$ n/cm²s > 0,8 MeV) in einer Betriebszeit zwischen 1 bis 10 Jahren zu einer Strahlenbelastung von 10^{22} bis 10^{23} nvt führen. Dabei kann z. B. bei Verwendung einer Zirkoniumlegierung eine unzulässige Versprödung nicht ausgeschlossen werden, oder es kann bei Verwendung einer Aluminium-Legierung die Heliumbildung zu Korngrenzenzerfall führen. Um diese Probleme zu umgehen bzw. langwierige und aufwendige Untersuchungen zu vermeiden, sieht die Konstruktion vor, daß die Außenhülle des Brennelements als Drucktank für das Kühlmittel verwendet wird. Bei einer Standzeit des Brennelements von ca. 36 Tagen liegt die Dosis schneller Neutronen bei ca. 10^{21} nvt, also in einem Bereich, über den bereits bei anderen Forschungsreaktoren Erfahrungen vorliegen und der keine schwerwiegenden Probleme aufwerfen dürfte. — Die Frage nach der Auswirkung des hohen thermischen Neutronenflusses auf die Eigenschaften der Strukturmaterialien ist für den Bereich der Strahlrohrnasen von Wichtigkeit. Am wenigsten problematisch ist in diesem Zusammenhang die Verwendung von Zirkoniumlegierungen, solange die erforderliche Kühlung (nukleäre Aufheizung) und Abschirmung (beim Wechsel der Strahlrohre) sichergestellt werden können. Bei der Verwendung von Aluminium oder Aluminium-Legierungen werden bei einem thermischen Fluß von 10^{15} n/cm²s infolge Kernumwandlung pro Jahr ca. 0,5 Gew.-% Silizium gebildet, d. h., nach sehr kurzer Zeit liegt eine Übersättigung des Mischkristalls vor. Es ist, auf Grund bestehender Erfahrungen, nicht damit zu rechnen, daß das gebildete Silizium zu einer starken Versprödung von Aluminium führt. Bei der Verwendung von Aluminium-Magnesium-Legierungen besteht jedoch noch Unklarheit über die Auswirkung von Mg₂Si-Ausscheidungen auf die mechanische Festigkeit. Es wird deshalb zur Zeit nur Reinaluminium neben Zircaloy als Werkstoff für Strahlrohre in Betracht gezogen. Ein angemessenes Inspektionsprogramm im Laufe des späteren Reaktorbetriebs wird dazu beitragen, noch verbleibende Unsicherheiten zu beseitigen.

4.2. Brennelement und Brennelementhandhabung

Das Reaktor-Core besteht aus einem einzigen Brennelement, das in Aluminium-Technik hergestellt wird: Zwischen zwei konzentrischen Mantelrohren befinden sich evolventenförmig gekrümmte Platten, wie beim HFIR-Brennelement [5]. Der innere und äußere Mantel des Elements dient der Halterung der Platten und als Druckbehälter zwischen Brennelementkühlkanal und Reflektorraum bzw. zentralem Kühlkanal (Regelstab). Der Sitz des Elements befindet sich am Fuß des Innenmantels. Am Kopf wird es im Kamin des Reflektortanks geführt. Eine Verriegelung verhindert bei einer eventuellen Strömungsumkehr ein Anheben des Brennelements.

Die max. Spaltungsdichte ist mit $1,4 \cdot 10^{21}$ Spaltungen/cm³ (ca. 60% Abbrand) relativ hoch, dagegen liegt die Betriebstemperatur mit 150° C verhältnismäßig niedrig. Für diese Betriebsbedingungen würde das Verhalten von U₃O₈ in Aluminium-Matrix zufriedenstellend sein. Nachdem heute auch UAl₃-Al praktisch zu den gleichen Bedingungen wie U₃O₈-Al zur Verfügung steht, ist dem UAl₃-Al der Vorzug zu geben, weil es einen größeren Sicherheitsabstand gewährleistet.

Die Hüllen der Brennelement-Platten werden aus einer Speziallegierung, die auf der Basis Aluminium-Eisen-Nickel entwickelt wurde, hergestellt. Sie besitzt neben hoher Festigkeit eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit.

Der Brennstoff ist über das Corevolumen und damit auch über die Plattenbreite gleichmäßig verteilt. Abbrandgift wird in Form von Bor-10 außerhalb der Brennstoffzone am oberen und unteren Plattenende eingebracht. Diese Lösung berücksichtigt sowohl neutronenphysikalische Gesichtspunkte als auch die Fragen der Fertigungskontrolle und der Wiederaufbereitung in ausreichendem Maße.

Die Assemblierung des Brennelements stellt eine schwierige Aufgabe dar, weil zur Gewährleistung der Kühlbedingungen sehr enge Toleranzen gefordert werden und hohe mechanische Beanspruchungen infolge von Kühlmittel- und Temperaturgradienten auftreten. Es ist geplant, die Brennelementplatten durch Schweißung mit dem Außen- bzw. Innenmantel zu verbinden, und es wird in Erwägung gezogen, diese Schweißungen mittels Elektronenstrahl durchzuführen, weil mit diesem Verfahren sehr maßgenaue und gut reproduzierbare Schweißungen durchgeführt werden können.

Zum Brennelementwechsel ist eine Unterwassermaschine mit folgendem Aufbau vorgesehen: der Körper besteht aus einem Rohr, an dessen oberem Ende ein gekapseltes Hubwerk montiert ist und das nach unten mit einem Schieber verschlossen werden kann; seitlich am Körper befindet sich ein Wärmetauscher, über den aus der D₂O-gefüllten Maschine die Restwärme des Brennelements von ca. 150 kW — ca. 24 Stunden nach Abschalten des Reaktors — durch Naturkonvektion an das Beckenwasser abgeführt wird. Die Abschirmung gewährleistet das Beckenwasser. Der Kamin des Reflektortanks wird bei Normalbetrieb durch einen Schieber und einen Stopfen abgeschlossen. Zum Brennelementwechsel wird der Verschlussstopfen am Kamin entfernt und die Wechselmaschine an den Kamin dicht angekuppelt, der Raum zwischen den beiden Schiebern (Maschine und Reflektortank), in dem sich zunächst Beckenwasser befindet, wird entwässert und getrocknet und nach Öffnen der beiden Schieber kann das Brennelement in die Wechselmaschine gezogen werden. Nach dem Schließen der beiden Schieber wird das D₂O im Zwischenraum entfernt und dann die Wechselmaschine auf eine Abklingposition im Kanal, der sich an das Becken anschließt, gebracht. Auf dieser Position bleibt das Brennelement für die Dauer eines Betriebszyklus, bis dann, wegen der inzwischen abgeklungenen Restleistung des Brennelements, das D₂O aus der Maschine ohne Risiko abgelassen werden kann und nach Spülung der Maschine mit Leichtwasser das Element außerhalb der Maschine auf eine Lagerposition im Kanal gebracht werden kann. Aus betrieblichen Gründen sind zwei derartige Maschinen nötig. Eine weitere Maschine, jedoch ohne Wärmetauscher, wird zum Einsetzen neuer Elemente und zum Aus- und Einbau des Regelstabs verwendet. Im Bereich des Beckens und des Transportkanals ist ein Versetzwagen vorgesehen, mit dem die einzelnen Maschinen bewegt und positioniert werden können. Nach einer Abklingzeit von ca. 12 Monaten werden die abgebrannten Brennelemente im Kanal in einen Bleisarg geladen und dann zur Wiederaufarbeitung gebracht.

Die zur Brennelementhandhabung erforderlichen Operationen sind a priori sehr sicher, weil sie unter Wasser ausgeführt werden und deshalb ein Schmelzen des Brennelements an Luft nicht denkbar ist. Die Dichtungselemente zwischen Leicht- und Schwerwasser müssen sehr sorgfältig ausgelegt und geprüft werden, damit Leckagen verhindert werden.

4.3. Kühlkreisläufe

Abb. 5 zeigt ein vereinfachtes Schema der Kühlkreisläufe. Im Normalbetrieb wälzen zwei D₂O-Hauptpumpen über zwei Wärmetauscher insgesamt 2180 m³/h um. Reserveaggregate sind in diesem Hauptkreislauf nicht vorgesehen. Bei Ausfall einer Pumpe oder eines Wärmetauschers kann der Reaktor mit einer Leistung von 70% der Nennleistung weiter betrieben werden. Diese Betriebsweise ist zeitlich begrenzt sinnvoll und möglich, weil für Experimentierzwecke immerhin noch ein Neutronenfluß von $7 \cdot 10^{14}$ n/cm²s zur Verfügung steht und die Regelreserve ausreicht, um die bei der Leistungsänderung auftretende Xenon-Vergiftung zu kompensieren. Die Hauptaggregate sind in getrennten Kasematten aufgestellt, so daß das gestörte Anlagenteil während des Reaktorbetriebs repariert werden kann.

Parallel zum Hauptkühlkreislauf erfolgt die Kühlung des Regelstabs über zwei von drei Pumpen und einen Wärmetauscher. Die dritte Pumpe steht in Reserve. Bei Ausfall des Wärmetau-

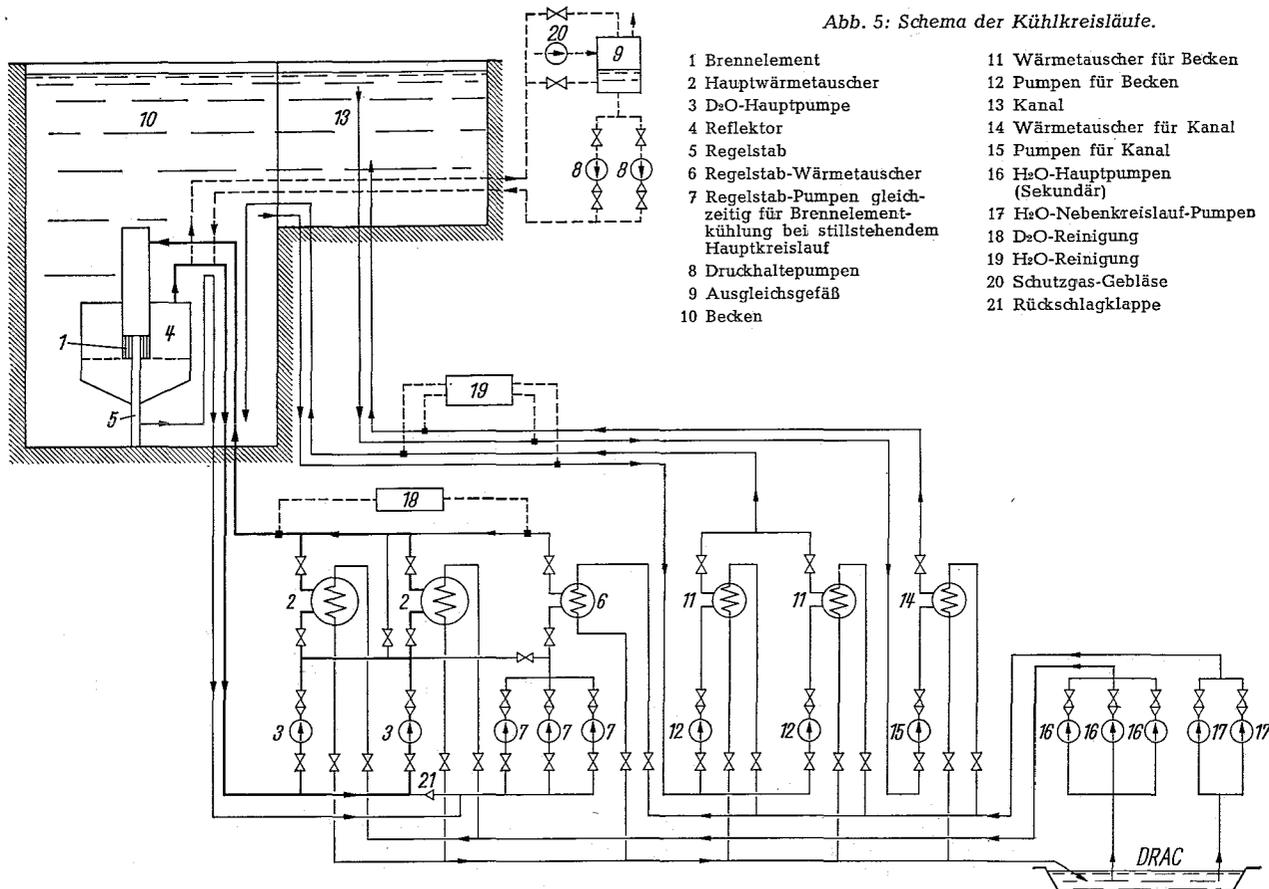


Abb. 5: Schema der Kühlkreisläufe.

- | | |
|---|--|
| 1 Brennelement | 11 Wärmetauscher für Becken |
| 2 Hauptwärmetauscher | 12 Pumpen für Becken |
| 3 D ₂ O-Hauptpumpe | 13 Kanal |
| 4 Reflektor | 14 Wärmetauscher für Kanal |
| 5 Regelstab | 15 Pumpen für Kanal |
| 6 Regelstab-Wärmetauscher | 16 H ₂ O-Hauptpumpen (Sekundär) |
| 7 Regelstab-Pumpen gleichzeitig für Brennelementkühlung bei stillstehendem Hauptkreislauf | 17 H ₂ O-Nebenkreislauf-Pumpen |
| 8 Druckhaltepumpen | 18 D ₂ O-Reinigung |
| 9 Ausgleichsgefäß | 19 H ₂ O-Reinigung |
| 10 Becken | 20 Schutzgas-Gebläse |
| | 21 Rückschlagklappe |

schers wird der Kühlmittelstrom von 75 m³/h zusätzlich über die Hauptwärmetauscher geleitet. Nachdem der Druckabfall im Regelstab sehr gering ist, bleibt bei eingeschalteter Hauptkühlung die Rückschlagklappe 21 auf Abb. 5 geschlossen.

Diese Rückschlagklappe öffnet sich, wenn die Hauptkühlung ausgeschaltet wird oder versagt, und es kommt dann, parallel zum Regelstab, eine Notkühlung des Cores zustande. Dabei sinkt der Gesamtwiderstand des Kreislaufs so weit ab, daß die Fördermenge der beiden Pumpen auf 200 m³/h steigt. Davon werden 150 m³/h zur Core-Kühlung und 50 m³/h zur Regelstabskühlung verwendet.

Über ein druckloses Ausdehnungsgefäß und zwei Pumpen wird die Druckhaltung im Kreislauf gewährleistet. Die Reinigung des Schwerwasserkreislaufs erfolgt diskontinuierlich, damit nach Zusatz von Salpetersäure ein pD-Wert zwischen 5 und 5,5 erreicht wird. Durch diese Maßnahme kann die Korrosion der Brennelementplatten merklich erniedrigt werden.

Es ist geplant, den Schwerwasserkreislauf des Reaktors mit einer Aufkonzentrierungs- und Detritiations-Anlage zu verbinden. Mit dieser kombinierten Anlage sollen aus dem Schwerwasserinhalt von 40 m³ insgesamt 160 l H₂O pro Jahr entzogen werden und der Tritiumgehalt, der nach zehn Betriebsjahren etwa 50 Ci/l betragen würde, soll unter 5 Ci/l gehalten werden. Damit kann bei normaler Betriebsweise erwartet werden, daß die Isotopenreinheit nicht unter 99,7 Mol % absinkt, und es wird erreicht, daß der spezifische Tritiumgehalt nicht über den Bereich hinausgeht, über den schon umfangreiche praktische Erfahrungen vorliegen.

4.4. Meß- und Regeltechnik

Die meß- und regeltechnische Ausrüstung des Hochflußreaktors wird sich im wesentlichen nicht von derjenigen anderer Forschungsreaktoren unterscheiden. Im folgenden werden deshalb nur einige Besonderheiten kurz beschrieben.

Zum Anfahren des Reaktors werden bewegliche Spaltkammern verwendet. Sie können in horizontaler Richtung von der Wand des Reflektortanks 70 cm entfernt werden und damit einen Bereich von 7 Dekaden bestreichen. Dieser Bereich ist notwendig, weil der Reaktor zu Beginn eines Betriebszyklus eine vollständige neue Brennstoffladung erhält.

Die Regelung der Reaktorleistung erfolgt primär über den Neutronenfluß. Es ist jedoch vorgesehen, eine automatische Korrektur in Abhängigkeit von der thermischen Leistung einzuführen, d. h. über lange Zeit wird die thermische Leistung konstant gehalten. Damit soll im Langzeitverhalten die bestmögliche Konstanz sowohl betrieblich als auch für die Experimente erreicht werden.

Eine automatische Leistungsreduktion ist vorgesehen für den Fall, daß sich die Grenzleistung infolge Störung im Kühlsystem (Ausfall einer Hauptpumpe) verringert. Zu diesem Zweck wird in einem Rechner ständig die Grenzleistung aus den Parametern: Durchfluß, Eintrittstemperatur und Druck des Kühlmittels ermittelt. Unterschreitet die Grenzleistung einen vorgegebenen Wert, wird der Regelstab eingefahren, bis die tatsächliche Leistung unter dem neu ermittelten Grenzwert liegt. Von diesem Zeitpunkt an wird der Reaktor dann auf konstanten Neutronenfluß geregelt.

Damit sollen Schnellabschaltungen vermieden und Ausfallzeiten infolge von Xe-Vergiftung verringert werden.

Es wird geprüft, ob die Installation einer zentralen Datenverarbeitungsanlage am Hochflußreaktor Vorteile bringt. Folgende Funktionen stehen zur Diskussion:

- Registrierung von Daten
- Erfassung und Signalisierung besonderer Zustände
- Erfassung und Wiedergabe von Störabläufen
- Durchführung von Rechnungen

Sicherheitsfunktionen sollen von einer derartigen Anlage nicht übernommen werden.

4.5. Reaktorgebäude und lufttechnische Anlagen

Das Reaktorgebäude hat die Form eines stehenden Zylinders, nachdem die Unfallbetrachtung die Auslegung auf einem inneren Überdruck von 1,5 m WS verlangt. Der Reaktor ist zentrisch im Gebäude angeordnet. Die vertikale Unterteilung des zylindrischen Teils sieht drei Etagen vor. Mit einer lichten Höhe von 12 m dient die mittlere Etage als Experimentierhalle. Ihr Durchmesser beträgt 60 m und wird bestimmt durch den Bedarf an Experimentierfläche sowie an Verkehrs- und Lagerfläche (Wege, Abladestelle vor LKW-Einfahrt, Abstellplatz für Lukendeckel, Treppen, Aufzüge etc.). Die Flurhöhe der

Experimentierhalle befindet sich auf gleichem Niveau wie die Zufahrtsstraße, so daß schwere Teile durch eine LKW-Einfahrt direkt in die Experimentierhalle gebracht werden können.

Über der Experimentierhalle befindet sich die Beckenhalle. Von ihr aus werden die Manipulationen im Reaktorbecken und im anschließenden Lager- und Transportkanal durchgeführt. Am Ende des Transportkanals, der eine Breite von 4 m und eine Wassertiefe von 7 m hat, ist eine Heiße Zelle und ein Dekontaminationsraum vorgesehen. Außerdem sind am Umfang der Beckenhalle eine Reihe von Betriebsräumen angeordnet für z. B.: Zuluftanlage, Brennelementlager, Heiße Werkstatt. Ein Teil der Grundfläche ist für Experimentiereinrichtungen vorgesehen. Die Beckenhalle, in der ein großer Teil der Betriebsoperationen durchzuführen ist, ist über Aufzug und Treppe mit den darunterliegenden Etagen sowie über eine Personenschleuse mit dem angrenzenden Betriebsgebäude verbunden. Von der Schaltwarte aus, die auf gleichem Niveau im Nebengebäude liegt, ist durch Fenster ein Einblick in die Beckenhalle möglich.

Im Kellergeschoß sind die Primär-Kühlkreisläufe mit den zugehörigen Hilfsanlagen und die Abluftgebläse mit Filter untergebracht. Unterhalb des Kellergeschosses befindet sich noch die sogenannte Krypta. In ihr sind die D_2O -Sammeltanks und die Sumpftanks für H_2O untergebracht. Damit wird sichergestellt, daß alle Entwässerungen über natürliches Gefälle erfolgen können.

Für die Ausführung des Reaktorgebäudes ist folgende Lösung vorgesehen: Das Kellergeschoß (Boden, Decke und die wabenförmig angeordneten Zwischenwände) bildet die biegesteife Grundplatte für das Reaktorgebäude. Die zylindrische Außenhülle und die Kuppel werden doppelwandig ausgeführt. Der Raum zwischen den beiden Hüllen wird ständig auf einem Überdruck von 1500 mm WS gehalten, so daß auch beim größten anzunehmenden Unfall keine Gebäudeluft nach außen gelangen kann, obwohl die Leckrate der beiden Hüllen relativ groß sein darf (je 400 m^3/h).

Die Belüftung der drei Etagen des Reaktorgebäudes erfolgt durch drei parallele Anlagen, die bezüglich der Luftverteilung untereinander unabhängig sind. Aus ökonomischen Gründen wird für die Experimentier- und die Beckenhalle ein Teil der Luftmenge im Umluftbetrieb gefahren. Für das Kellergeschoß ist reiner Frischluftbetrieb vorgesehen. Im Normalbetrieb herrscht in der Experimentierhalle der Druck der Außenatmosphäre. In der Beckenhalle und den Fluren des Kellergeschosses wird der Druck ca. 5 bis 10 mm WS niedriger gehalten; in den D_2O -Räumen ist nochmals ein Druckgefälle von 5 bis 10 mm WS vorgesehen. Für den Fall einer Kontamination in der Experimentierhalle ist vorgesehen, den Druckunterschied zu den umgebenden Räumen umzukehren.

5. Standort- und Sicherheitsfragen

Der größte anzunehmende Unfall beeinflusst in starkem Maße die Auslegung des Reaktors. Die Poolbauweise bringt einerseits den Vorteil mit sich, daß die nach Ausfall der Kühlung im Core freigesetzte Wärme im wesentlichen durch das Poolwasser aufgenommen werden kann. Freigesetzte Aktivitäten werden mit Ausnahme der Edel-

gase zum größten Teil im Poolwasser zurückgehalten. Daraus folgt, daß Unfälle, in deren Verlauf der Pool dicht bleibt, nur relativ geringe Gefahren für die Umgebung mit sich bringen. Andererseits ist die inhärente Sicherheit des Reaktors wegen des zwar negativen, aber kleinen Blasenkoeffizienten und des mit relativ großer Verzögerung auftretenden Temperaturkoeffizienten im Reflektor verhältnismäßig niedrig zu veranschlagen.

Weiterhin ist zu bedenken, daß Experimente in den Reaktor eingesetzt werden sollen, wie z. B. die Heiße Quelle ($2000^\circ K$) und die Kalte Quelle (ca. 30 Nm^3 Deuterium), die eine gewisse potentielle Gefahr in sich bergen. Obwohl diese Experimente so sicher ausgelegt werden, daß erst beim gleichzeitigen Versagen mehrerer Sicherheitseinrichtungen die Dichtheit des Reflektortanks und des Beckens gefährdet werden könnte, erscheint es wegen der möglichen Auswirkungen doch angebracht, deren Entleerung zu berücksichtigen. Bei einem derart definierten größten anzunehmenden Unfall wird die im Brennelement freigesetzte Energie an die Atmosphäre des Reaktorgebäudes abgegeben und die freigesetzten Aktivitäten werden zum größten Teil im Reaktorgebäude verteilt. Wegen der großen Bevölkerungsdichte im Umkreis des Reaktorstandorts und der relativ häufig auftretenden Windstillen ist es nicht möglich, unabhängig vom Zeitpunkt größere Aktivitätsmengen abzugeben.

Unter diesen Voraussetzungen ergaben sich hohe Anforderungen an die Ausführung des Reaktorgebäudes: Festigkeit gegen Innendruck (ca. 1,5 mWS), sehr hohe Dichtheit nach außen (doppelwandige Ausführung) und Abschirmung der direkten Strahlung (40 cm Betonstärke am zylindrischen Gebäudeteil).

6. Stand der Projektierung und Terminplanung

Nachdem das Vorprojekt im Jahre 1967 erstellt war, konnte 1968 die detaillierte Planung erfolgen. In den beiden folgenden Jahren, 1969 und 1970, wird im wesentlichen der Bau der Anlagen abgewickelt. Nach erfolgter Restmontage, Abnahme und Durchführung der Inbetriebnahme ohne Neutronen ist das erste kritische Experiment für die zweite Hälfte 1971 vorgesehen.

DK 621.039.572.004.1 (44+43)

Literatur

- [1] K. H. Beckurts: Höchstflußneutronenquellen, atomwirtschaft 12, S. 236 und S. 357 (Mai und Juli 1967).
- [2] J. M. Hendric: The Brookhaven High Flux Beam Research Reactor, A/Conf. 28/P/232.
- [3] P. Ageron et al: Geneva Conf. 1964 P/49.
- [4] K. H. Beckurts und R. Dautray: Proc. AEC-ENEA Seminar on Intense Neutron Sources, Paris, ENEA 1967.
- [5] F. T. Binford und E. N. Cramer: The High Flux Isotope Reactor, ORNL-3572.

Die Zeitschrift „atomwirtschaft“ erscheint monatlich. Redaktion: Wolfgang D. Müller. Anzeigenleitung: Walter Betz. Verlag Handelsblatt GmbH. Alle Düsseldorf, Kreuzstr. 21, Tel. 8 38 81. Druck: Droste-Verlag und Druckerei GmbH, Düsseldorf, Pressehaus. Jahresabonnement DM 114,— (Ausland DM 126,—), Einzelheft DM 9,50 (Ausland DM 10,50).