

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

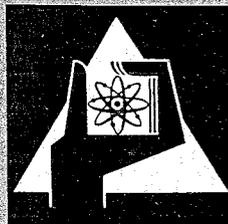
Juni 1966

KFK 460

Abteilung Reaktorbetrieb

Die Ausnutzung des Reaktors FR 2 als Forschungseinrichtung

H. Oehme, W. Marth



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



## Die Ausnutzung des Reaktors FR 2 als Forschungseinrichtung

### Utilization of the reactor FR 2 for research purposes

Von H. Oehme und W. Marth Aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung Reaktorbetrieb

#### 1. Allgemeines

Der Reaktor FR 2 wird seit Anfang 1964 bei voller Leistung planmäßig und nach Maßgabe der Experimente betrieben [1]. Trotz gewisser technischer Erschwernisse, die sich aus dem Reaktortyp ergeben (Tankreaktor), stellt der FR 2 einen sehr universell verwendbaren Reaktor dar. Hierzu tragen insbesondere seine folgenden Eigenschaften und Einrichtungen bei [2]:

großes Volumen der Spaltzone,  
 hohe thermische Neutronenflußdichte,  
 große Zahl von horizontalen Strahlrohren  
 sowie senkrechten Isotopen- und Bestrahlungskanälen,  
 günstige Raumverhältnisse um den Reaktorblock,  
 zahlreiche Zusatz- und Hilfseinrichtungen,  
 große Einschaltdauer.

Demgemäß ist der Reaktor vor allem geeignet für Strahlrohrexperimente, Aktivierungen (Isotopenproduktion), Brennstoffbestrahlungen und Kreislaufexperimente. Da die Flußdichte schneller Neutronen relativ niedrig ist, sind ohne Schaffung zusätzlicher Einrichtungen (Konverter) Werkstoffbestrahlungen nur bis zu mittleren Energiedosen sinnvoll. Der horizontale Schnitt durch den Reaktor in Fig. 1 gibt einen Überblick über die vorhandenen Experimentierkanäle. In der jetzt zweijährigen Betriebszeit lag die Einschaltdauer des FR 2 bei 70% [1]. Diese positive Tatsache ist jedoch erst eine Vorbedingung für den sinnvollen Einsatz dieses reinen Forschungsreaktors; deshalb soll hier die Frage behandelt werden, mit welcher Intensität und für welche Aufgaben seine Experimentiereinrichtungen eingesetzt werden. Durch die frühzeitige Planung von Experimenten in den Instituten und in speziell hierfür geschaffenen Arbeitsgruppen [3] konnte der Reaktor bereits am Anfang seiner Verfügbarkeit sehr gut ausgenutzt werden. Mitte 1965, vor Beginn der Umbauperiode im Zuge der Leistungssteigerung, war folgende experimentelle Nutzung des FR 2 gegeben:

Die verfügbaren Horizontalkanäle waren praktisch voll durch in Betrieb befindliche Experimente genutzt. Etwa ein Drittel der vorhandenen Isotopenpositionen war für die Isotopenproduktion eingesetzt. Hier wäre eine merkliche Intensivierung der Bestrahlungen möglich. Auf einer weiteren Isotopenposition wurde ein Versuch zur Erprobung eines thermionischen Emitters [4] durchgeführt. In der thermischen Säule wurden mehrere großvolumige Körper bestrahlt und nacheinander verschiedene physikalische Kurzzeitexperimente betrieben. Die Isotopen-Rohrpostanlage war ständig in Betrieb, besaß aber noch freie Kapazität. Auf drei Brennelementpositionen, die ursprünglich nicht für Experimente vorgesehen waren, waren Brennstoffbestrahlungskapseln eingebaut. In einem senkrechten Prüfkanal wurde eine Tieftemperatur-Bestrahlungseinrichtung [5] betrieben, während für einen zweiten, den zentralen Prüfkanal ein Brennelement-Bestrahlungskreislauf im Aufbau war. Damit kann die experimentelle Nutzung des Reaktors zum genannten Zeitpunkt als gut bezeichnet werden. Durch weitgehende Automatisierung der Steuer- und Überwachungseinrichtungen sowie der Datenerfassung ist dabei gewährleistet, daß sämtliche technischen und physikalischen Experimente im Drei-Wochen-Zyklus 24 Stunden täg-

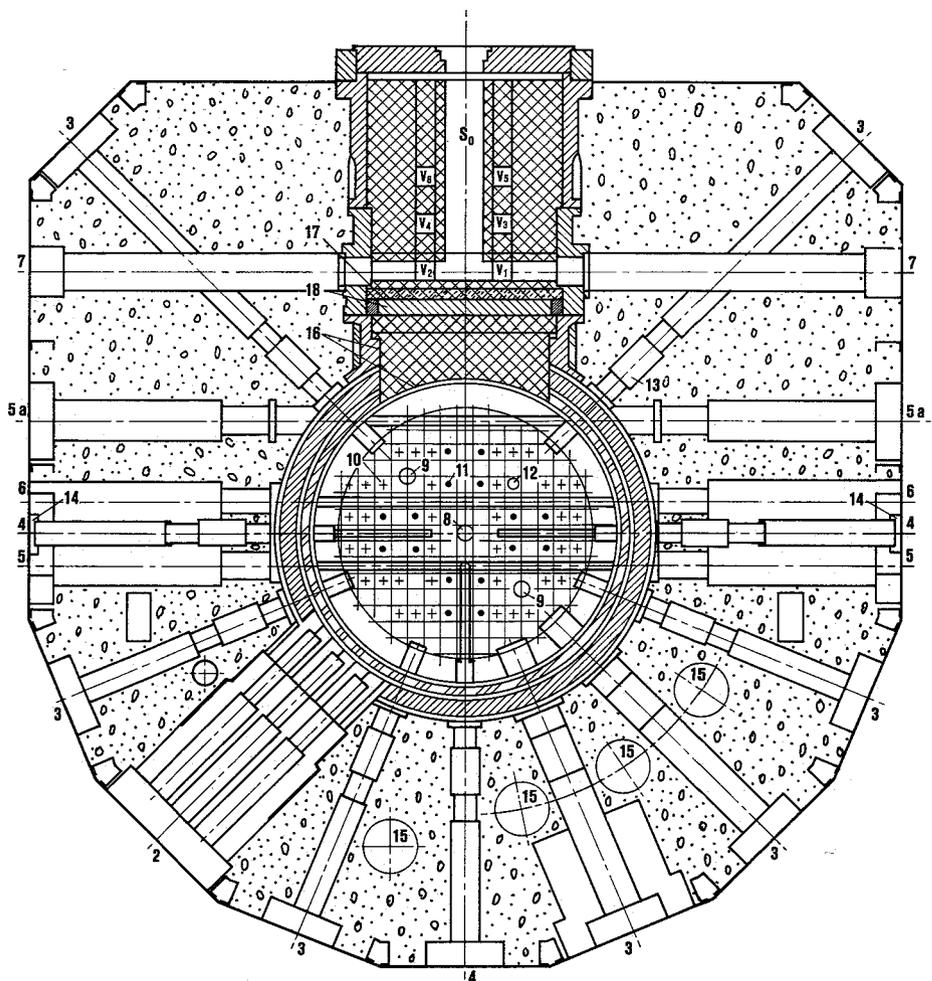


Fig. 1: Querschnitt durch den Reaktor FR 2, Karlsruhe

1 thermische Säule, 2 Meßsäule, 3 Reflektor-kanäle (R), 4 Kernkanäle (C), 5 durchgehender Kanal (D), 5a Tangentialkanal (T), 6 Rohrpostkanal (D), 7 Horizontalkanal durch thermische Säule (Th), 8 senkrechter Zentralkanal (durchgehend), 9 senkrechte Nebenkanäle (Fingerhutform), 10 Isotopenkanäle (+), 11 Trimmabschaltstäbe (-), 12 Feinregelstab (o), 13 Strahlenschieber für Horizontalkanäle, 14 Dichtschieber für Horizontalkanäle, 15 Schächte für Prüfkreislaufleitungen, 16 Aluminiumfenster, 17 Stahlschieber für thermische Säule, 18 Bleiboral-Schieber für thermische Säule,  $V_1$ – $V_6$  vertikale Kanäle in thermischer Säule,  $S_0$  Horizontalkanal in thermischer Säule

Fig. 1: Cross section of the reactor FR 2 at Karlsruhe

lich betrieben werden können. Insgesamt sind mehr als 20 Institute und Firmen mit z.T. mehreren Arbeitsgruppen ständig an der Ausnutzung des FR2 beteiligt, davon gehört knapp die Hälfte dem Kernforschungszentrum Karlsruhe an.

In mehrfacher Hinsicht hat am FR2 eine zweite Phase des Experimentierbetriebes begonnen. Sie ist vor allem dadurch gekennzeichnet, daß die ersten technischen Experimente, wie Kapsel- und Kreislaufversuche, begonnen werden konnten. Ferner werden weitere Strahlrohre benötigt, da die vorhandenen alle belegt sind. Unter Ausnutzung verschiedener physikalischer Möglichkeiten wird daher dem Mangel an horizontalen Strahlkanälen durch Vielfachausnutzung einzelner Kanäle zu begegnen versucht. Die wachsende Zahl großer technischer Experimente bringt durch ihre Vielschichtigkeit und ihre enge Verknüpfung mit dem Reaktorsicherheitssystem neue Probleme für den Betrieb

der Gesamtanlage. Dies gilt besonders für das Bestreben, Reaktor und Experimente mit höchster Einschaltdauer zu betreiben. Eine Auswirkung hiervon ist beispielsweise, daß in den nur vier betriebsfreien Tagen im Monat nicht mehr nur der Reaktor gewartet werden muß, sondern auch die meisten Reparaturen und Umbauten an den Experimentiereinrichtungen vorzunehmen sind. Dies zwingt zu einer ständigen exakten Vorplanung und sorgfältigen Erprobung auch im Bereich der Experimente.

Da inzwischen ausreichende Erfahrungen mit den verschiedenen Experimentierhilfseinrichtungen des FR2 (wie z. B. der Auswechsellmaschine für Strahlkanaleinsätze) vorliegen, fällt in die jetzige Phase auch die Anpassung dieser oft am grünen Tisch geplanten Einrichtungen an die verschärften Bedürfnisse eines möglichst rationalen Experimentierbetriebes. Schließlich konnten inzwischen mehrere Einrichtungen, die für die Durchführung und Auswertung technischer Experimente unerlässlich sind, fertiggestellt und z. T. in Betrieb genommen werden: heiße Zellen für alle Arten von Nachunter-

Tab. 1: Strahlrohrexperimente am FR2

Bezeichnung	Zielsetzung	Strahlkanal (Fig.1)	Spezielle Komponenten
1. Einfang-Polarimeter	Bestimmung von Spin und Parität von Kernniveaus und Multipolarität von Gamma-Übergängen	Reflektor-Kanal R1	Thermischer Neutronenpolarisator und -analysator, Analysator für Gammazirkularpolarisation
2. Winkelkorrelations-Spektrometer für innere Paarerzeugung	Bestimmung von Spin und Parität von Kernniveaus durch innere Paarerzeugung nach Neutroneneinfang	Tangential-Kanal $T_{west}$ (Vierfachnutzung)	Neutronenleiter für subthermische Neutronen (aus Glas), Spektrometer mit Halbleiterteleskopen. Anschluß an MIDAS [7]
3. Spaltprodukt-Spektrometer	Kernspektroskopie an Spaltprodukten	"	Neutronenleiter (wie oben), Koinzidenzanordnung aus 3 Halbleiterzählern für Gammaquanten und Spaltbruchstücke. Anschluß an MIDAS
4. Mößbauer-Anordnung	Festkörperphysikalische Untersuchungen	"	Neutronenleiter (wie oben), Mößbauer-Spektrometer
5. Gammaspktrometer	Untersuchung von Kernniveaus nach Neutroneneinfang	"	Neutronenleiter (wie oben), Gamma-Halbleiterspektrometer mit Anticompton-Anordnung
6. Winkelkorrelations-Spektrometer	Bestimmung der Spins angeregter Kernzustände über die Gamma-Winkelverteilung bei Neutroneneinfang	Core-Kanal C2	Monochromatorkristall, 1 fester und 1 schwenkbarer Szintillationskristall in Ebene senkrecht zum sekundären Neutronenstrahl, Anschluß an MIDAS
7. Pulverdiffraktometer	Untersuchung der Atomstruktur in Pulvern (z. B. Manganzinkferrit und Selenaten), magnetische Strukturen, Spinorientierung der Atome in Elementarzellen	Reflektor-Kanal R2	Monochromatorkristall, automatische Winkelprogrammsteuerung und Datenerfassung
8. Einkristall-Diffraktometer	Untersuchung der Atomstruktur in Einkristallen, z. B. Wasserstoffbrückenbindung in Imidazol	Reflektor-Kanal R2 (Doppelnutzung)	Wie bei 7. Außerdem programmgesteuertes Dreikreisgoniometer
9. Kalte Neutronenquelle	Messung totaler und differentieller Wirkungsquerschnitte, Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Flüssigkeiten und Festkörpern	Reflektor-Kanal R3	Heliumkühlanlage, $H_2$ -Moderatorkammer, flüssig- $N_2$ -gekühltes Neutronenfilter, mechanischer Neutronengeschwindigkeitsselektor, autom. Datenerfassung (s. a. Abschnitt 5)
10. Einkristall-Präzisions-spektrometer [11]	Aktivierungsmessungen, Spaltquerschnittsbestimmungen, Untersuchung von Kristallreflektivitäten, Messung der Dopplerbreite von U 238 in Abhängigkeit von der Temperatur	Core-Kanal C3	Programmierbare Präzisions-Winkelsteuerung, programmierbares Goniometer für Monochromator, autom. Datenerfassung
11. Drehkristall-Spektrometer [8]	Untersuchung atomarer Bewegungsvorgänge, Untersuchung des Einflusses der therm. Bindung auf Neutronenthalisierung durch Messung der zweifach differentiellen Streuquerschnitte in Moderator- und Kühlmaterialien (Zirkonhydrid, Graphit, Wasserdampf usw.)	Reflektor-Kanal R7 (Vierfachnutzung)	Rotierender Monochromatorkristall, rotierender Sekundärkollimator, Szintillations- und He-3-Zähler, Vielkanal-Laufzeitanalysator, Anschluß an MIDAS
12. Koinzidenz-Gammaspktrometer	Messung von Energie, Flußdichte und Koinzidenzbeziehung von prompten Gammaquanten bei Neutroneneinfang zur Bestimmung von Kernniveaus und ihren Quantenzahlen	Core-Kanal C1	Ge(Li)- und NaJ(Tl)-Detektoren, 2fach-3fach- und Schnell-Langsam-Summenkoinzidenzsystem. Anschluß an MIDAS
13. Fünfkristall-Paarspektrometer	Hochauflösende Spektroskopie von $(n,\gamma)$ -Reaktionen im Energiebereich 3 bis 11 MeV	Tangential-Kanal $T_{ost}$	Primärdetektor: lithiumgedröfete Germaniumdiode, Sekundärdetektoren: abgeschrägter NaJ-Szintillationszähler ( $3'' \times 3''$ ). Anschluß an MIDAS
14. Universal-Diffraktometer [9]	Untersuchung der Atomlagen und magnetischen Struktur in Pulvern, Flüssigkeiten und Einkristallen bei verschiedenen Temperaturen (Alkalimetallschmelzen, hydrierte Verbindungen der Übergangsmetalle, z. B. $Me_2CH_x$ , Ferrite)	Reflektor-Kanal R5 (Zweifachnutzung)	Spektrometer zur Wellenlängenveränderung, autom. Winkelprogrammsteuerung und Datenerfassung, programmierbares Dreikreis-Präzisionsgoniometer, Meßbank mit 4 Zählrohren, Probenofen [12]
15. Einkristall-Diffraktometer (im Bau)	Untersuchung der Atomlagen in Einkristallen	Reflektor-Kanal R5	Programmierbares Vierkreis-Goniometer, autom. Datenerfassung, teilweise Datenverarbeitung

suchungen, eine sog. heiße Box [6] für werkstoffkundliche Versuche, Abgas- und Speichersysteme für radioaktive Gase, erweiterte Strom- und Wasserversorgung, Programmier- und Messanordnungen usw.

Nicht zuletzt rundet die Erhöhung der Reaktorleistung auf 44 bis 60 MW das Bild dieser zweiten Phase ab, weil dadurch die Versuchszeiten stark verringert und verschiedene Experimente überhaupt erst möglich werden.

Für die verschiedenen Arten von Experimentiereinrichtungen und Experimenten am FR 2 seien im folgenden einige Einzelheiten der Ausnutzung angeführt.

## 2. Strahlrohrexperimente

Nach der Leistungserhöhung im Frühjahr 1966 werden an den 14 verfügbaren horizontalen Strahlrohrausgängen (Fig. 1) 18 Experimente in Betrieb sein (Tab. 1). Sie gehören vor allem den folgenden Forschungsrichtungen an:

- Atomstrukturuntersuchung durch elastische Streuexperimente,
- Untersuchung der atomaren Bewegungsvorgänge in Festkörpern und Flüssigkeiten durch unelastische Streuversuche,
- Untersuchung magnetischer Eigenschaften mit polarisierten Neutronen,
- Untersuchungen zur Theorie der Atomkerne durch Beobachtung der Einfang-Gammastrahlung und ihrer charakteristischen Eigenschaften (Energieniveaus, Parität, Spin usw.).

Um eine volle Ausnutzung des Reaktorbetriebes zu erreichen, sind die Experimente, soweit erforderlich, mit vollautomatischen Programmsteuerungen ausgerüstet, deren Befehle über Lochstreifen eingegeben werden. Die Meßdaten und Meßparameter werden ebenfalls automatisch über Lochstreifen und Drucker oder über die integrierte Rechieranlage MIDAS [7] erfaßt. Neben der Vielfachausnutzung von Strahlkanälen mit bis zu 4 Experimenten, z. B. durch Strahlauffächerung, führt der gleichzeitige Einsatz von mehreren Neutronenzählrohren oder -zählkristallen an den einzelnen Experimenten zu einer verbesserten Reaktornutzung. Die Anwendung dieser Techniken beim Drehkristallspektrometer mit seinen 3 bis 4 Versuchseinrichtungen und etwa 20 Zählkristallen wird in [8] beschrieben, während z. B. bei einem Pulverdiffraktometer [9] durch geeignete Konstruktion noch mit 4 Zählrohren gleichzeitig gemessen wird.

## 3. Kleinbestrahlungen

Zur Durchführung von laufend anfallenden Kleinbestrahlungen (Tab. 2) steht am FR 2 eine Reihe von Anlagen und Kanälen zur Verfügung:

- In einem durchgehenden Horizontalkanal ist eine im Saugbetrieb arbeitende Rohrpostanlage eingebaut, die Probebestrahlungen auf einstellbaren Kernpositionen erlaubt.
- 13 vertikale Isotopenkanäle können mit je bis zu 29 Harwellkapseln beladen werden.
- Voluminöse Proben, die eine hohe Neutronenflußdichte benötigen, können in einem Teil des senkrechten Zentralkanals (Durchmesser 200 mm) bestrahlt werden.
- Die thermische Säule besitzt 11 Kanäle, die technische Proben bis zu den Dimensionen 600 mm × 400 mm aufnehmen können; außerdem sind hier sogenannte Drehteller zur Erzielung homogener Aktivierungen eingebaut.

Tab. 2: Nichttechnische Kleinprobenbestrahlungen im Jahr 1965 \*

Zahl der Bestrahlungen pro Monat	Rohrpost ca. 40	Isotopenkanäle ca. 50
Verwendungszweck:		
Erzeugung von Radionukliden (Quellen)	33 %	62 %
Aktivierungsanalysen	16 %	8 %
Studium von Strahlenschäden	2 %	7 %
Studium der Edelgasdiffusion	19 %	7 %
Spaltstoff- und Spaltproduktuntersuchungen	30 %	6 %
Sonstige Zwecke	10 %	10 %

\* Die Präparate dienen z. T. mehreren Verwendungszwecken, weswegen sich Summen von über 100 % ergeben können

Die technischen Bestrahlungen werden wegen der meist größeren Probenabmessungen vorwiegend in der thermischen Säule sowie im Zentralkanal durchgeführt. Zum Zwecke der Aktivierung werden regelmäßig Laufbüchsen und Kolbenringe, zur Untersuchung von Strahlenschäden Gläser, Lacke, Elektronikteile und komplette Bauelemente wie Fernsehkameras bestrahlt.

Zur Vereinfachung der organisatorischen Abwicklung des Bestrahlungswesens werden die anfallenden Proben hinsichtlich ihrer „Gefährlichkeit“ in 2 Kategorien eingeteilt [13]. Substanzen der Liste A können ohne besondere Beschränkungen bestrahlt werden, für Liste B gelten spezielle Begrenzungen bezüglich Menge, Neutronenflußdichte, Proben-temperatur u. dgl.

## 4. Kapselexperimente

Die Bestrahlung von Kapselversuchseinsätzen (Rigs) erfolgt im FR 2 vor allem auf Isotopenkanalpositionen (Fig. 1), von denen bis zu 41 verfügbar sind. Daneben stehen noch in begrenztem Umfang Brennelementpositionen zur Verfügung.

Im Jahre 1965 wurden 2 Typen von Kapseln fertiggestellt, wovon 7 Exemplare im Reaktor bis zu 5 Monaten bestrahlt wurden. Der eine Kapseltyp diente der Bestrahlung eines thermionischen Emitters [4] mit einer Wärmeleistung von 500 W und einer Emittertemperatur von 2000 °K. Der zweite Kapseltyp wurde zur Bestrahlung von Kernbrennstoffen entwickelt. Die Spezifikationen werden vom Projekt Schneller Brüter formuliert, die Planung des Experimentes obliegt dem Institut für Reaktorentwicklung [10].

Diese Kapseln (Fig. 2) ermöglichen die Bestrahlung von 4 übereinander angeordneten, umhüllten Brennstoffproben (Prüflingen) von je 25 cm Länge. Die Spaltungswärme wird durch D<sub>2</sub>O abgeführt, als wärmeübertragendes Medium dient eine eutektische Blei-Wismut-Legierung. Während des Betriebes werden die Hüllrohrtemperaturen entlang der Prüflinge an 8 verschiedenen Stellen gemessen, außerdem wird die Höhe des Pb-Bi-Spiegels mit drei Thermoelementen in 2-von-3-Sicherheitschaltung ständig überwacht.

Wesentliche Betriebsdaten sind die folgenden:

Stableistung	450 W/cm,
Hüllrohrtemperatur	550 °C,
Abbrand	5000 MWd/t,
Hüllrohrmaterial	austenitischer Stahl.

Die Begrenzung der Hüllrohrtemperatur erfolgte wegen der oberhalb 550 °C stark ansteigenden Korrosion von austenitischem Stahl in der Pb-Bi-Legierung.

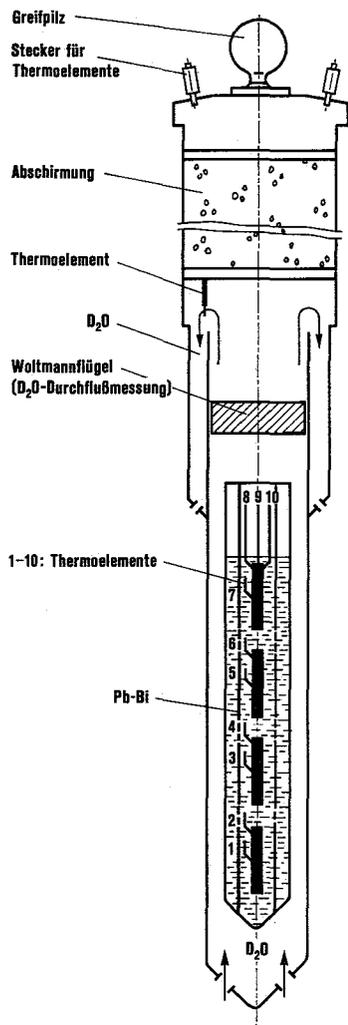


Fig. 2: Schematic drawing of a fuel irradiation rig for the reactor FR 2

Der Betrieb dieser Kapseln im Reaktor verlief nach geringen anfänglichen Schwierigkeiten (Ausfall von Thermoelementen) zufriedenstellend. Zur Erreichung höherer Stableistungen (700...800 W/cm) und damit höherer Abbrände wurde ein weiterer Kapseltyp geplant, bei dem vor allem das Pb-Bi-Eutektikum durch Natrium ergänzt ist.

### 5. Kreislaufexperimente

Als erstes Kreislaufexperiment wurde die Tieftemperatur-Bestrahlungsanlage im Sommer 1965 in Betrieb genommen; der Einsatz von zwei weiteren Anlagen (Helium-Abbrand-Loop und kalte Quelle) ist für 1966 geplant. – Die Tieftemperatur-Bestrahlungsanlage [5] erlaubt die Bestrahlung von Proben zwischen 12°K und 300°K sowie die anschließende Messung physikalischer Eigenschaften ohne oder mit Temperung in der Zwischenzeit. Eine schematische Übersicht der Auslegung der kalten Quelle zeigt Fig. 3.

Fig. 2: Schemaskizze einer Brennstoffbestrahlungs-Kapsel für den FR 2

Charakteristische Daten der Gesamtanlage sind die folgenden:

Moderatorkammer-Volumen	250 cm <sup>3</sup> ,
Kälteanlage	He-Refrigerator mit 2 Expansions-Turbinen (210 W bei 12,5°K),
thermische Neutronenflußdichte im Moderator	$4,9 \cdot 10^{18}$ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> .

Für die Brennelemententwicklung im Rahmen des Projektes Schneller Brüter wurde ein Helium-Druckgaskreislauf [10] entwickelt, dessen Out-of-Pile-Erprobung und Aufbau am Reaktor abgeschlossen ist und der 1966 am FR 2 in Betrieb gehen wird. Die Testelemente sind umhüllte UO<sub>2</sub>- und UO<sub>2</sub>-

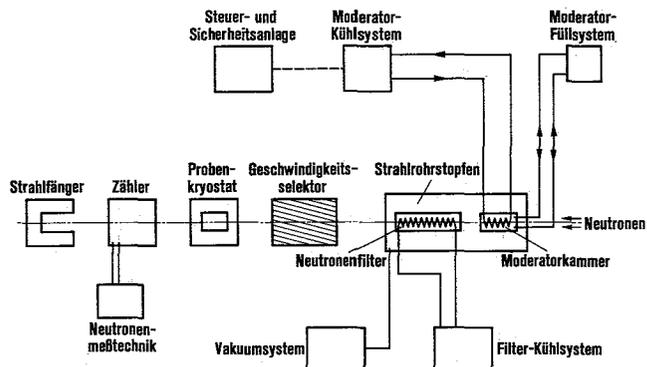


Fig. 3: Blockschaltbild der im Aufbau befindlichen kalten Neutronenquelle am FR 2

Fig. 3: Block diagram of the cold neutron source under construction at the reactor FR 2

PuO<sub>2</sub>-Stäbe, die von einem Druckrohr umgeben, in den Zentralkanal des Reaktors eingebracht werden. Wichtigstes Ziel des Versuchsprogrammes sind Langzeitbestrahlungen bis zu Abbränden von 100 000 MWd/t, z. T. mit Spaltgas-Druckaufbau-Messungen. Bei einzelnen, kürzer dauernden Versuchen sollen vor allem die Brennstoffveränderungen im Anfahrbetrieb untersucht werden. Die Kühlung und die Konstanthaltung der Temperatur der Prüflinge erfolgt durch Helium.

Charakteristische Daten der Anlage sind die folgenden:

Prüflinge	UO <sub>2</sub> und UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> , angereichert auf 4...8%, Durchmesser 7,4...12 mm,
Stableistung	300...1000 W/cm,
Hüllen-Temperatur	500...600 °C,
Heliumtemperatur am Prüfling	100...160 °C,
He-Betriebsdruck	30 at,
He-Gasgeschwindigkeit am Kühlspalt	107 m/s.

(Eingegangen am 18. 2. 1966)

### Literatur

- [1] Eisermann, W.: Kerntechnik 8, 249 (1965)
- [2] Diederichs, M., und W. Eisermann: Atomwirtschaft 4, 251 (1963)
- [3] Süßmann, G., und K. Zuehlke: Atomwirtschaft 4, 255 (1963)
- [4] Merges, V., und H. Winkenbach: Kerntechnik 8, 263 (1966)
- [5] Decker, W., J. Diehl, K. Hein, H. Katheder und Ch. Leitz: Kerntechnik 8, 257 (1966)
- [6] Krautwedel, H. L.: Kerntechnik 1, 26 (1965)
- [7] Krüger, G., G. Dimmler, G. Zipf, H. Hanak und R. Merkel: Kerntechnik 8, 273 (1966)
- [8] Ripfel, H.: Kerntechnik 8, 267 (1966)
- [9] Oehme, H.: Atompraxis, in Vorbereitung
- [10] Bojarsky, E.: Symposium on Irradiation Experiments, European Atomic Energy Society, Den Haag, September 1965
- [11] Albold, E.: Kerntechnik, im Druck
- [12] Oehme, H., und J. Hauschild: Kerntechnik 8, 121 (1966)
- [13] Dienst, W., und W. Marth: Kerntechnik 8, 121 (1966)