



**KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH**  
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG  
**Zentralinstitut für Reaktorexperimente**

**Das Zentralinstitut für Reaktorexperimente  
der Kernforschungsanlage Jülich**

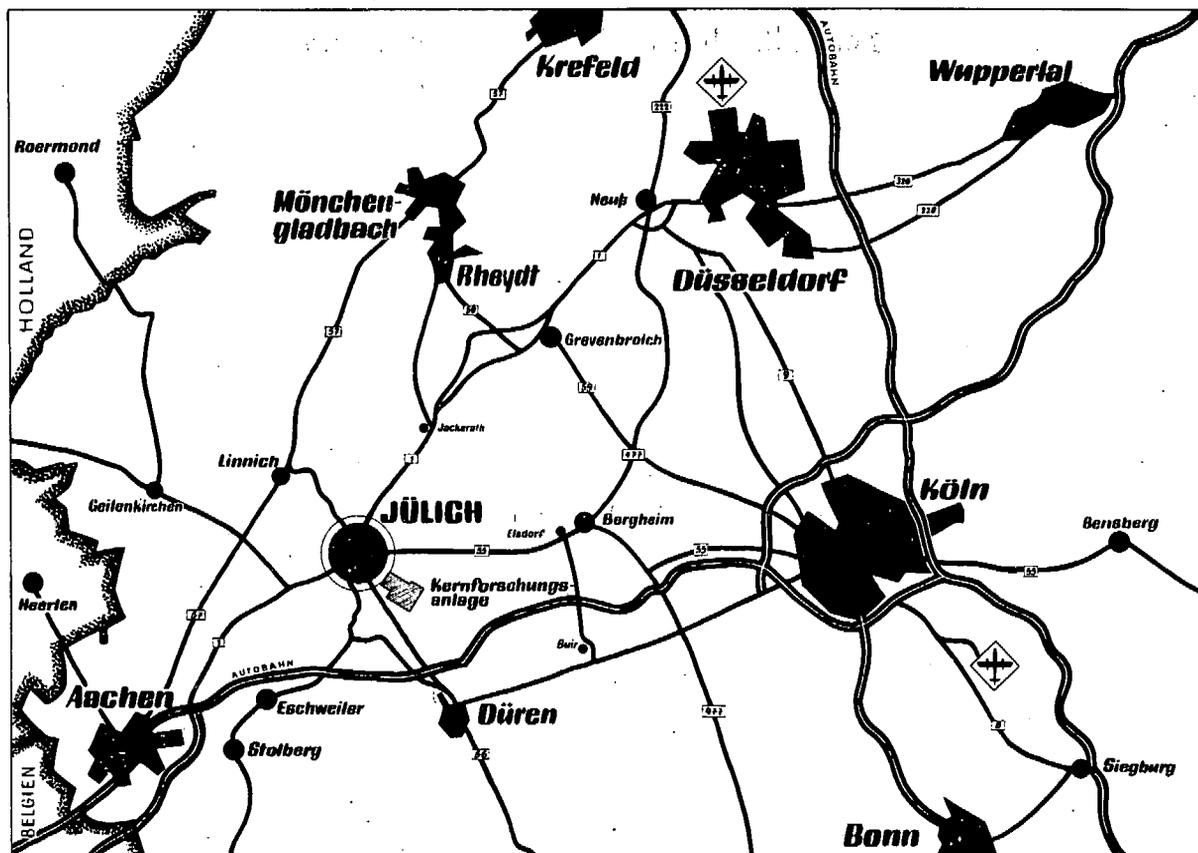
**Ergebnisse und Möglichkeiten**

von

**Max Pollermann u. a.**

**Jül - 796 - RX**  
**Oktober 1971**

**Als Manuskript gedruckt**



**Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 796**  
**Zentralinstitut für Reaktorexperimente Jül – 796 – RX**

Dok.: Reactor Experiments - Projects  
Reactor Experiments - Methods of Measurement  
Reactor Experiments - Engineering Aspects  
Reactor Experiments - Economic Aspects

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,  
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

# **Das Zentralinstitut für Reaktorexperimente der Kernforschungsanlage Jülich**

**Ergebnisse und Möglichkeiten**

von

Max Pollermann u. a.

## VORWORT

*Diese Druckschrift will in erster Linie über die Leistungen und Einrichtungen informieren, die das ZIR mit seinen Fachgruppen und Projektingenieuren anderen Instituten bieten oder im Rahmen einer Auftragsforschung einsetzen kann. Seine Leistungsfähigkeit soll mit der Darstellung einer Auswahl von wissenschaftlichen Ergebnissen und durchgeführten Projekten belegt werden, ohne ein vollständiges Bild über die gesamte Arbeit des Instituts geben zu wollen.*

*Die vom Institut entwickelten Einrichtungen und Verfahren sind im allgemeinen aus der Bearbeitung von bestimmten Aufträgen hervorgegangen. Es hat sich gezeigt, daß sie sich darüber hinaus sehr vielseitig einsetzen lassen.*

*Es sind dies technisch einsetzbare Verfahren der Reaktormesstechnik und der Strahlenmesstechnik, Bestrahlungseinrichtungen an Reaktoren, Berechnungsverfahren für Kreisläufe, Eichstände für hohe und tiefe Temperaturen, Apparaturen für Kalorimetrie, Wärmeleitungsmessung, Feuchtemessung, technische Gasanalyse und Kälteanlagen. Die Elektrotechnik baut Einrichtungen für Meß-, Steuer-, Regel- und Sicherheitssysteme und für die Datenverarbeitung, die Fertigungstechnologie bietet neuartige Schweiß- und Lötverfahren, die Prüfgruppe Verfahren und Einrichtungen zum Testen von Werkstoffen, Verbindungen, Komponenten und für Kaltversuche.*

*Aus der gleichzeitigen Bearbeitung mehrerer Projekte ergab sich eine für Projekte kleiner und mittlerer Größe besonders geeignete Form der Planungstechnik.*

*Die vielseitigen Anforderungen, die Reaktorexperimente stellen, brachten es mit sich, daß im ZIR nach und nach alle Bereiche der Physikalischen Technik gepflegt wurden, so daß sich das Institut auch für Experimente anderer Forschungsbereiche einsetzen läßt.*

*Der vorliegende Bericht entstand als Gemeinschaftsarbeit des Instituts.*

Jülich, September 1971

M. Pollermann



Abb. 1.0: Das Zentralinstitut für Reaktorexperimente

## 1. Aufgaben und Struktur des Instituts

### Die Entwicklung des Instituts

Das Institut besteht seit Ende 1960. Es umfaßte zunächst mehrere kleine, weit verstreute Arbeitsgruppen. Sie wurden nach und nach zu größeren Bereichen zusammengefaßt. Erst im Januar 1968 konnte der für 180 Mitarbeiter ausgelegte Neubau bezogen werden.

### Das Arbeitsprogramm

Das Zentralinstitut für Reaktorexperimente ist eine Gemeinschaftseinrichtung der KFA. Das heißt, seine Arbeit ist überwiegend durch Aufträge von anderen Instituten und von Dritten außerhalb der KFA bestimmt. Es übernimmt Auslegung und Bau von Experimentiereinrichtungen aller Art. Insbesondere werden Einrichtungen für die Ausnützung der Forschungsreaktoren in Jülich und anderen Zentren erstellt. Das ZIR beschafft, entwickelt, konstruiert und baut die dazu notwendigen Einrichtungen und berät bei der Planung und Zulassung der Versuche. Es führt die Routinebestrahlungen an den Reaktoren durch, übernimmt Bestrahlungsprojekte, stellt Personal für den Schichtdienst von Experimenten, betreibt die Kälteanlagen und liefert Kühlmittel. Es übernimmt Aufträge zur Messung und Auswertung von Experimenten, insbesondere Neutronenflüssen, Gammaflüssen, Temperaturen und Aufheizraten. Es entwickelt ferner die dazu notwendige Instrumentierung einschließlich des Sicherheitssystems und erstellt die Sicherheitsberichte.

### Einrichtungen und Verfahren

Dem Arbeitsprogramm entsprechend erstellte das Institut eine Reihe von Einrichtungen und arbeitete die erforderlichen Verfahren aus.

Für die Bestrahlungsvorhaben verschiedener Institute wurden eine Reihe von Bestrahlungseinrichtungen an den Reaktoren aufgestellt, mit denen auch sehr spezielle Wünsche erfüllt werden können. Für die Messung von Flußdichten, Temperaturen und Aufheizraten oder der Fluenzen bei Bestrahlungen entstanden am Reaktor einsetzbare Meßverfahren, für die nukleare, strömungs- und wärmetechnische Auslegung dem Strahlenfeld angepaßte Berechnungsverfahren. Aus den Funktions- und Störfallanalysen verschiedener Anlagen leiteten die Elektrotechniker Gruppen von Bausteinen ab, mit denen sich Meß-, Steuer-, Regel- und Sicherheitssysteme erstellen lassen. Auf die Konstruktion von Reaktoreinschüben wurde das Baukastensystem angewandt, das eine rationelle Herstellung ermöglicht. Für die Kreisläufe wurden zuverlässig arbeitende Baugruppen und Einheiten entwickelt, die vielseitig einsetzbar sind. Die hohen Ansprüche, die an die Fertigung von Einschüben und Kreisläufen gestellt werden mußten, führten zur Entwicklung einer speziellen Technologie der Schweiß- und Lötverfahren und zur Errichtung einer Werkstatt für Reinraummontage, die vorgeschriebenen Abnahmen und Kaltversuche zur Aufstellung von Prüfeinrichtungen und -Verfahren. Die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Projekte, die Einhaltung der Termine, die Berücksichtigung der Ar-

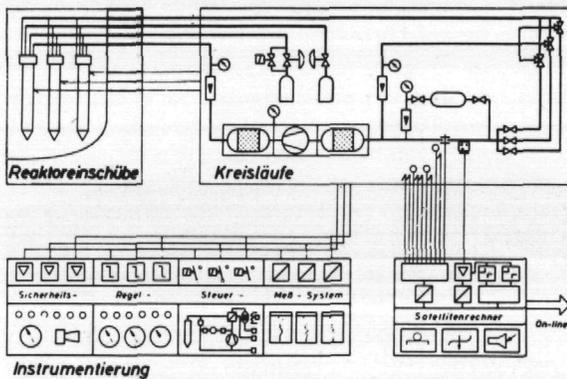


Abb. 1.1: Baugruppen einer Versuchsanordnung für Brennstoffbestrahlungen an einem Forschungsreaktor

beitskapazitäten und die Kostenabrechnung erforderte den Einsatz eines besonderen Verfahrens der Netzplantechnik.

In den ersten Jahren gingen Einrichtungen und Verfahren aus bestimmten Aufträgen hervor. Aus der sich wiederholenden Bearbeitung ähnlicher Aufgaben bildeten sich jedoch bald Fachgruppen, die ein bestimmtes Gebiet systematisch und nach dem neuesten Stand bearbeiteten, eigene Entwicklung betrieben und neue Ergebnisse erzielten. Während sich jedoch die wissenschaftlichen Institute der KFA auf ein enges Fachgebiet spezialisieren können, mußte das ZIR für die erfolgreiche Durchführung von Reaktorexperimenten sehr vielseitig sein. Das hat den Vorteil, daß es in der Lage ist, auch Versuchsanordnungen für andere Experimente zu bauen, bzw. solche Experimente planmäßig durchzuführen. In diesem Sinne ist es zu einem Institut für „Physikalische Technik“ geworden. Besonders zweckmäßig erscheint sein Einsatz für Projekte mittlerer Größe, die einerseits über die technische Kapazität eines wissenschaftlichen Instituts hinausgehen und andererseits nicht die Aufstellung eines Projektteams, wie es bei großen Projekten erforderlich ist, rechtfertigen.

Die für die Durchführung der Projekte notwendige Bereitstellung von Fachkapazitäten, Verfahren und Einrichtungen er-

möglicht es dem Institut zugleich, Einzelaufträge zu erledigen, die sich von einfachen Dienstleistungen bis zur selbständigen wissenschaftlichen Arbeit erstrecken können. Zusammen mit den Projekten ergibt sich auf diese Weise ein Auftragspektrum, das für ein Zentralinstitut besonders zweckmäßig ist, da es statistisch gesehen eine optimale Ausnutzung der Fachkapazität und der sehr kostspieligen Anlagen und Einrichtungen ermöglicht.

### Die Struktur des Instituts

Die aus der Bearbeitung der Aufträge hervorgegangenen Fachgruppen erhielten im Laufe der Zeit eine doppelte Funktion. Sie dienten einerseits der selbständigen Erledigung von Einzelaufträgen und betrieben eine anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung, andererseits bildeten sie Glieder einer Funktionskette zur planmäßigen Bearbeitung der Projekte. Dieser doppelten Funktion entsprechend erwies es sich als zweckmäßig, der historisch gewachsenen Organisation des Institutes eine Struktur zu überlagern, die einerseits die Bereitstellung der Fachkapazitäten sichert (Vertikalstruktur), andererseits die planmäßige Bearbeitung der Projekte ermöglicht (Horizontalstruktur).

Die **Vertikalstruktur** kann man aus den Baugruppen ableiten, die im Prinzip jede Versuchsanordnung für ein Reaktorexperiment aufweist. Abb. 1.1 zeigt als typisches Beispiel eine Brennstoffbestrahlungseinrichtung mit angeschlossenem Spülkreislauf. Für den In-pile-Teil im Strahlenfeld des Reaktors, seine Ausmessung, Auslegung und Entwicklung wird eine Gruppe Strahlentechnik benötigt. Die Konzeption der Kreisläufe mit Pumpen, Ventilen, Wärmetauschern, Filtern usw. wird von einer Gruppe Wärme- und Strömungstechnik erarbeitet. Das Meß-, Steuer-, Regel- und Sicherheitssystem wird von Elektrotechnikern ausgelegt und gebaut. Dazu kommen Probleme des Maschinenbau's und der Technologie. Eine weitere Gruppe ist für die Durchführung und Betreuung der Versuche verantwortlich. Diese Aufgaben führten zu der in Abb. 1.2 gezeigten Vertikalstruktur.

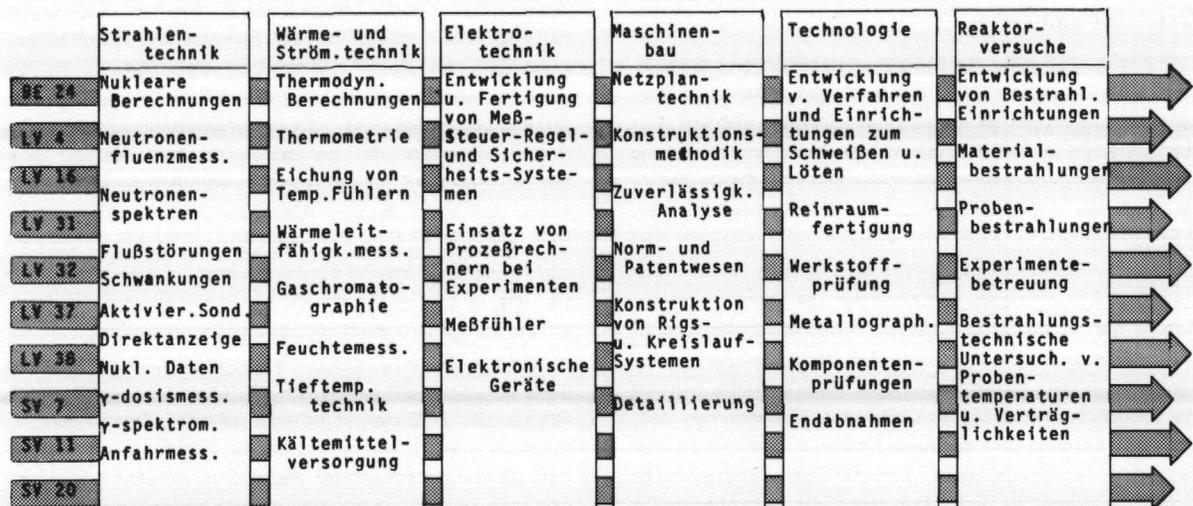


Abb. 1.2: Struktur des Zentralinstituts für Reaktorexperimente

Alle genannten Fachgruppen müssen so stark besetzt sein, daß sie gegenüber Fluktuationen stabil sind, daß sie die geforderten Termine halten können und das notwendige Minimum an Eigenentwicklung und Eigenforschung betreiben können. Die Erfahrung hat gezeigt, daß man mit etwa 25 Mitarbeitern pro Fachbereich kontinuierlich arbeiten kann, auch dann, wenn verantwortliche Mitarbeiter in den Abteilungen und Gruppen an die Industrie verloren gehen.

Neben der Arbeit an den Projekten betreiben alle Gruppen eine eigene wissenschaftlich-technische Entwicklung, die sie befähigt, auch neuartige Aufträge, die in ihren Arbeitsbereich fallen, selbständig zu erledigen.

Die **Horizontalstruktur** ergab sich aus der Notwendigkeit mehrere Projekte gleichzeitig zu erledigen und vereinbarte Termine einzuhalten. Sie führte zur Bestellung von Projekt-ingenieuren, die für die technische Ausführung einer Anlage und für die Einhaltung von Kosten und Terminen verantwortlich zeichnen. Ihre Arbeit wird durch eine Planungsgruppe mit einer besonderen Form der Netzplantechnik koordiniert. Die Bearbeitung der Projekte erfolgt in Zusammenarbeit mit den Fachgruppen des Instituts, wobei die Projekte gegenüber anderen Aufträgen im allgemeinen Vorrang genießen. In diesem Sinne laufen die Projekte quer durch alle Fachgruppen hindurch und bilden die in Abb. 1.2 dargestellte Horizontalstruktur.

### Die Organisation

Das Institut ist gegliedert in eine Zentralabteilung mit Verwaltung, Dokumentation und Institutswerkstatt und in drei

Abteilungen mit zusammen 14 Gruppen (Abb. 1.3). Die Physikabteilung umfaßt etwa die erste und zweite Fachgruppe aus Abb. 1.2, die Entwicklungsabteilung die dritte bis fünfte Gruppe und die Versuchsabteilung die sechste Gruppe.

Das ZIR beschäftigt zur Zeit 140 Angestellte (darunter 30 Akademiker und 29 Ingenieure), 34 Lohnempfänger, 8 Leihkräfte, 16 Lehrlinge und 9 studentische Hilfskräfte.

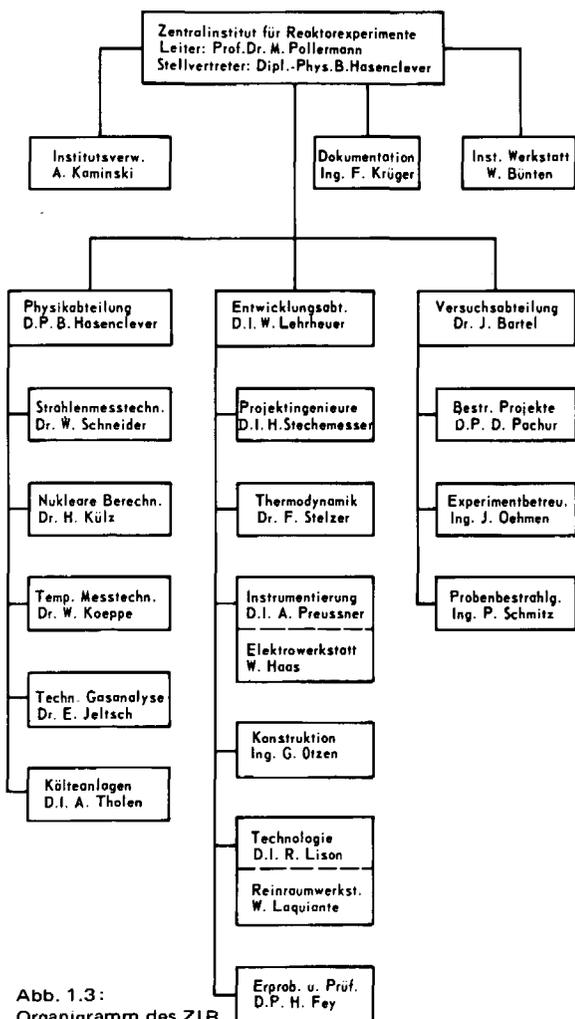


Abb. 1.3:  
Organigramm des ZIR

### Bücher, Veröffentlichungen und Berichte

Eine zahlenmäßige Übersicht über Veröffentlichungen und Berichte ergibt Tab. 1. Im Bericht selbst sind nur solche Berichte und Veröffentlichungen zitiert, die zum Verständnis des Textes beitragen und auch heute noch relevant sind. Bezüglich einer vollständigen Übersicht über die Berichte und Veröffentlichungen muß auf die Jahresberichte verwiesen werden.

#### 1. Veröffentlichungen

1.1 Bücher	4
1.2 Zeitschriftenaufsätze	91
1.3 KFA-Berichte	31
1.4 Patente	9
1.5 Öffentliche Vorträge	37
	<hr/> 172

#### 2. Interne Berichte

2.1 ZIR-Berichte	119
2.2 Interne KFA-Berichte	7
2.3 Arbeitsberichte	92
2.4 Anträge an den Reaktorsicherheitsausschuß	143
2.5 Studienarbeiten in Zusammenarbeit mit Ingenieurschulen	15
	<hr/> 376

Tabelle 1:  
Veröffentlichungen und Berichte des ZIR (Stand Sept. 1971)

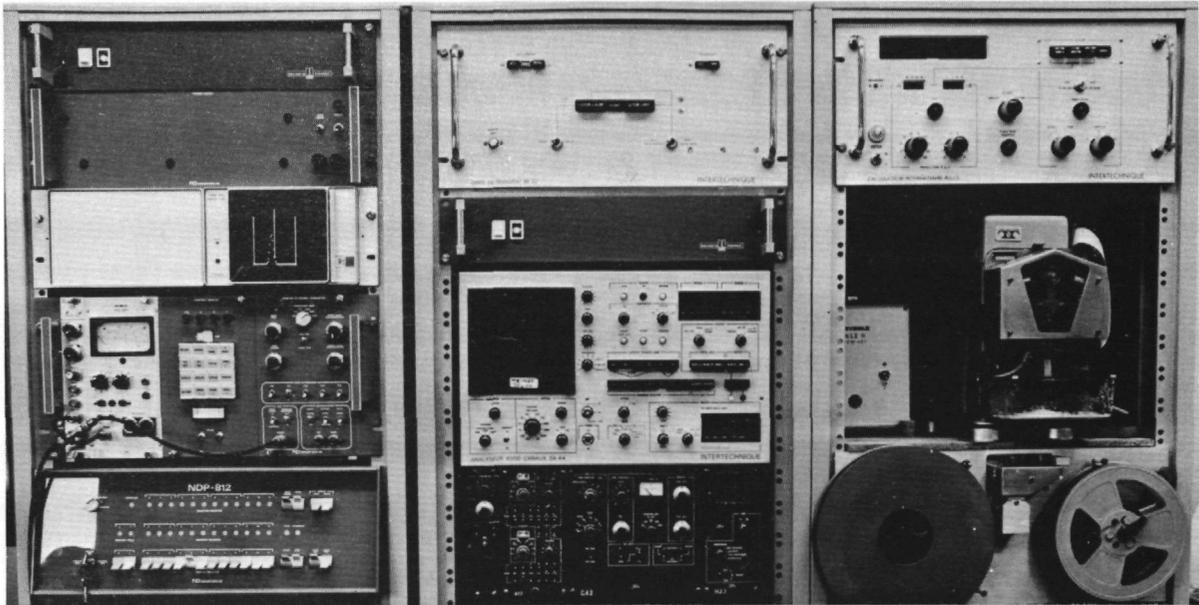


Abb. 2.0: Meßplatz zur Aktivierungsanalyse

## 2. Nukleare Messungen und Berechnungen

Voraussetzung für die Auslegung und Auswertung von Reaktorexperimenten ist die Bestimmung der Strahlungsintensität, der Strahlungsdosis und der Strahlungsqualität (Spektrum). Wesentlich sind Flußdichte und Fluenz der thermischen und schnellen Neutronen, das Neutronenspektrum, Gammadosis und Gammasppektrum. Mit den Meßwerten und den nuklearen Daten der Werkstoffe können die Betriebsparameter der Reaktoreinschübe berechnet werden: Reaktivität, Aufheizraten, Brennstoffbeladung, Flußabsenkung, Aktivierung und erforderliche Abschirmung. Diese Werte bestimmen die Konstruktion des Einschubs.

Bei fast allen Bestrahlungsexperimenten ist die Messung der Flußdichte, der Fluenz und der Gasaktivität, sowie in zunehmendem Maße eine Bestimmung des Neutronenspektrums wesentlicher Bestandteil des Experiments. Hierzu werden in vielen Fällen Versuche in simulierten Rigs vorgenommen, die auch Aufschluß über die Flußstörungen ergeben.

Messungen und Berechnungen erfordern häufig die Entwicklung neuer Verfahren, die Bestimmung nuklearer Daten und die Untersuchung bisher unzureichend bekannter Zusammenhänge zwischen Bestrahlung und ihrer Wirkung. (L.1) Hierin liegen neben der großen Zahl von Auftragsmessungen die wissenschaftlichen Aufgaben der Gruppe Strahlenmeßtechnik.

Bei den Verfahren liegt der Schwerpunkt in der Entwicklung von Aktivierungssonden für höhere Temperaturbereiche und dem Ersatz der sehr aufwendigen Aktivierungssondenmeßtechnik durch direktanzeigende Methoden.

Die für die Messungen erforderlichen Daten werden auf Grund neuer Literatur laufend korrigiert und zweifelhafte Werte neu vermessen. Absolutmessungen liefern die Standards für die Routineverfahren. Paraffin- und Wasserstandards mit einer Neutronenquelle ergaben gute Übereinstim-

mungen (Abweichung  $\leq 2\%$ ) mit Quellstärkenbestimmungen der PTB. (L.2,3)

Zur Diskussion der Meßergebnisse werden vielfach mit großem Nutzen moderne Methoden der Fehlerstatistik herangezogen. (L.4)

Besondere Bedeutung gewinnt in Zukunft der Zusammenhang zwischen Strahlenschädigung von Strukturmaterialien und Neutronenspektrum. Schwerpunkt der Arbeit im ZIR liegt auf der Bestimmung der Spektren mit dem Ziel, eine Zuordnung der gemessenen Fluenz zur Schädigungsrate zu ermöglichen.

Alle wissenschaftlichen Untersuchungen des ZIR sind koordiniert mit den einschlägigen Arbeitsgruppen bei EURATOM und IAEA. Damit ist gewährleistet, daß in erster Linie aktuelle Probleme angegangen, Doppelarbeiten vermieden werden und eine gegenseitige Ergänzung erfolgt.

Aus den Anforderungen, die von Projekten und Auftraggebern gestellt werden, und aus der Verfolgung des wissenschaftlichen Fortschritts ergaben sich im wesentlichen folgende Aufgabengebiete: Aktivierungssondentechnologie, Absolutkalibrierung und nukleare Daten (für meßtechnische Zwecke), Neutronenspektrometrie, Korrekturen für Flußstörungen, Filter, Spektralparameter und Zeitfaktoren, Flußprognosen einschließlich laufender Messungen mit direktanzeigenden Verfahren und Nukleare Berechnungen.

Zur Auslegung von Experimentiereinrichtungen werden alle Messungen an den Reaktoren mit ihren Meßbedingungen erfaßt und in zwangloser zeitlicher Folge, geordnet nach Positionen in tabellarischer und graphischer Form getrennt nach thermischem Fluß, epithermischem Fluß, schnellem Fluß und Gammafluß, im Rechnerausdruck als Arbeitsberichte herausgegeben. (L.28)

## Sonden-Aktivierungsverfahren

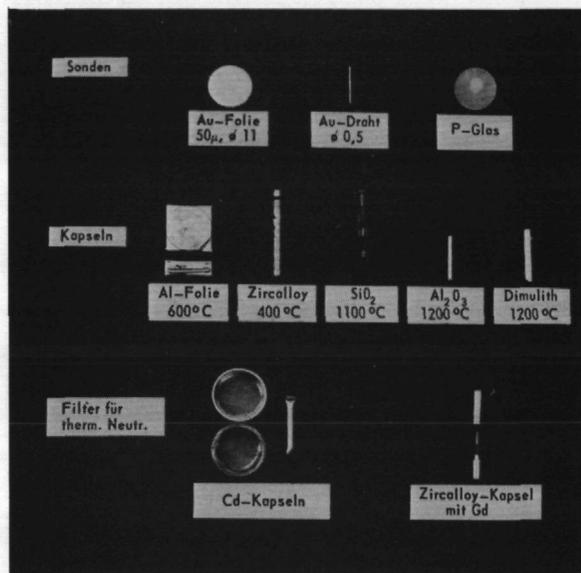


Abb. 2.1: Bestandteile der in der Neutronenmeßtechnik verwandten Aktivierungs sonden

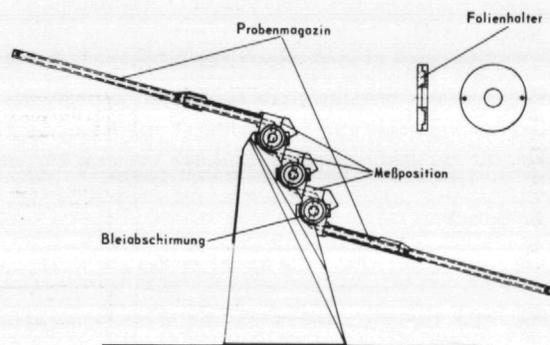


Abb. 2.3: Automatischer Probenwechsler

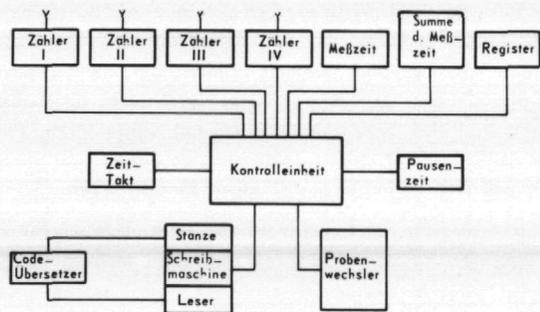


Abb. 2.4: Blockschaltbild der Relativmeßapparatur (Datenerfassungsteil)

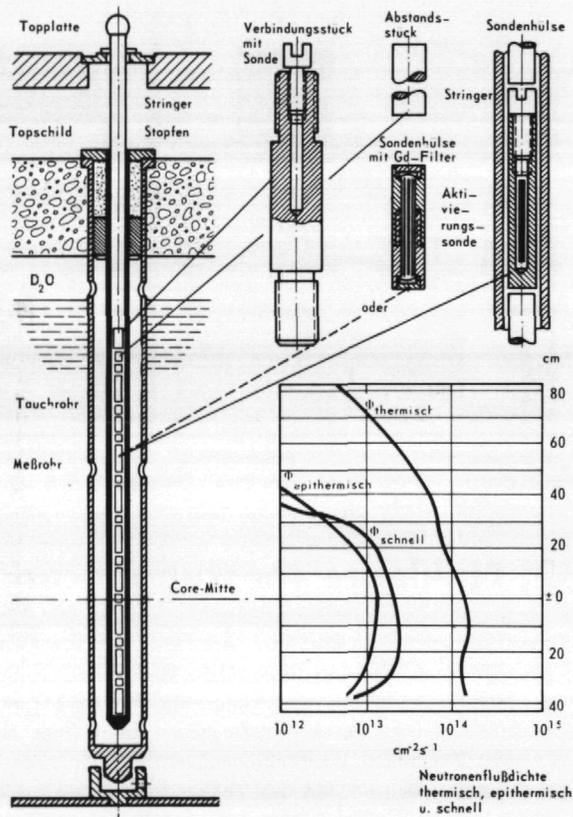


Abb. 2.2: Neutronen-Flußverteilungsmessung in einem Vertikalkanal des FRJ-2 mit Aktivierungs sonden

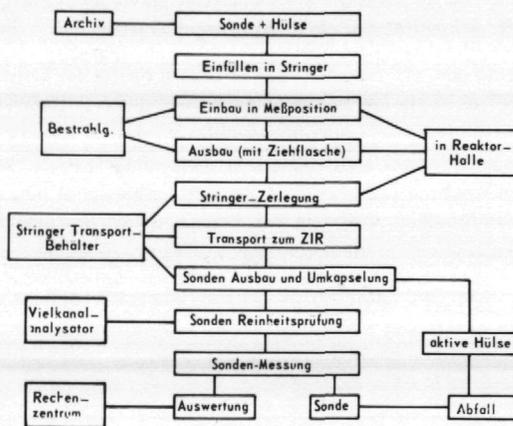


Abb. 2.5: Fließschema regelmäßiger Flußmessungen am FRJ-2 mit Aktivierungs sonden

## Sondenaktivierungsverfahren

Die Bestimmung des Neutronenflusses bzw. der -fluenz nach dem Sonden-Aktivierungsverfahren bildet eine Grundlage für die Experimentplanung und die Auswertung von Reaktorexperimenten (z.B. soll die vom Auftraggeber geforderte schnelle Fluenz garantiert werden). Die Methode hat den Vorteil, daß die Aktivierungssonden den experimentellen Gegebenheiten angepaßt werden können (z.B. kleines Meßvolumen an einer nur schwer zugänglichen Position). Der Gammauntergrund im Reaktor beeinflusst die Messung dabei nicht. Auf der anderen Seite erfordert dieses Verfahren einen großen technischen Aufwand. Es müssen Sonden der unterschiedlichsten Geometrien für verschiedene Temperatur- und Neutronenenergiebereiche entwickelt werden (Abb. 2.1), Korrekturgrößen (z.B. Flußdepression und Abbrand) müssen bestimmt werden, Meßapparaturen müssen erstellt werden, Auswertverfahren müssen entwickelt werden. Der einwandfreie Ein- und Ausbau, sowie der Transport der aktivierten Sonden zum Meßlabor muß gewährleistet sein. (L.5,6)

Abb. 2.2 zeigt ein Flußmeßrig im FRJ-2. Die Sonden (z.B. kurze Drahtstückchen aus Kobalt zur Bestimmung des thermischen Neutronenflusses) befinden sich in kleinen Zircaloy-Kapseln. Die Kapseln werden mit Distanzstücken in einem aus mehreren verschraubbaren Teilen bestehenden Stringer (Zircaloy-Rohr 6 Ø mm) untergebracht. Der Stringer

## Messung von Reaktorparametern mit direktanzeigenden Verfahren

In Abb. 2.10 sind mit dem Aktivierungssondenverfahren gemessene Neutronenflußverteilungen zusammen mit einer gemessenen Temperaturverteilung und mit einer gerechneten Gammaflußverteilung für den 2 V 1 Kanal des FRJ-2 dargestellt. Der große Aufwand, den das Aktivierungssondenverfahren erfordert, und die Forderung Parameter zeitlich zu verfolgen, führen zum Einsatz direktanzeigender Verfahren, bei denen die Datenverarbeitung unmittelbar über einen Prozeßrechner erfolgt.

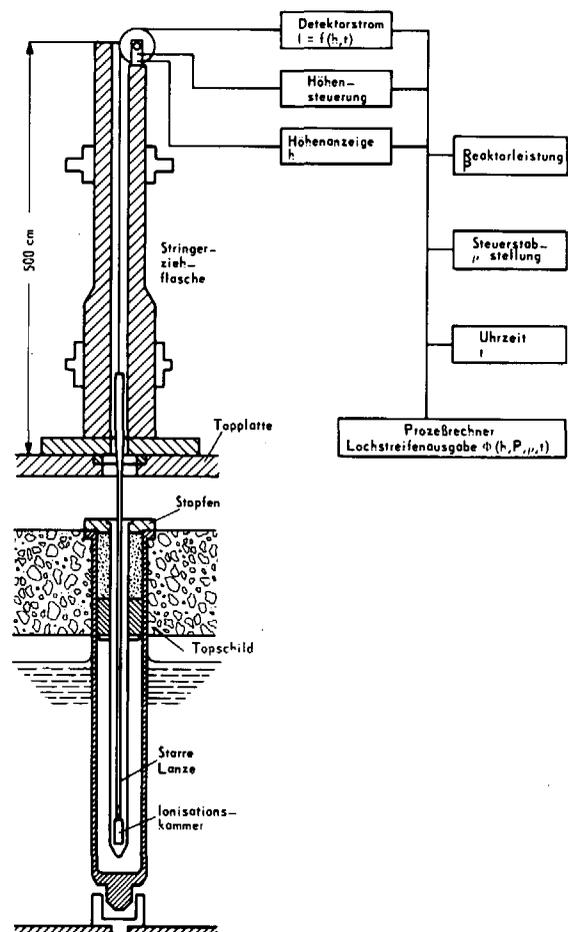
Abb. 2.6 zeigt die für die Vermessung der Vertikalkanäle des FRJ-2 entwickelte Meßeinrichtung. Der an einer starren Lanze befestigte Detektor wird längs der Achse des Meßkanals verfahren. Ein Prozeßrechner übernimmt die Steuerung der Lanze und berechnet aus dem Detektorsignal unter Berücksichtigung weiterer Parameter und eventueller Störgrößen (Leckstrom der Ionisationskammer, Gamma-Stör-signal bei Neutronenflußmessungen) den gesuchten Flußwert. Als Detektoren werden für Gammaflußmessungen Ionisationskammern, für thermische Neutronen Spaltkammern mit einer  $U^{235}$ -Beschichtung und für schnelle Neutronen Spaltkammern mit  $Th^{232}$ -Beschichtung eingesetzt.

Abb. 2.6: Reihumvermessung des thermischen und schnellen Neutronen- und  $\gamma$ -Flußprofils in den Brennelement- und Vertikalkanälen des FRJ-2 mit rechnergesteuerten Hochfluß-Ionisationskammern

selbst wird in das Flußmeßrohr eingeführt. Die Vermessung der Sonden liefert den axialen Neutronenflußverlauf als Funktion des Abstandes von der Core-Mittelebene.

Um in relativ kurzer Zeit viele Aktivierungssonden ausmessen zu können, ist es erforderlich, den Meßprozeß zu automatisieren. Jede Aktivierungssonde wird nacheinander in drei voneinander unabhängigen Meßkanälen (2 sich gegenüberstehende  $\gamma$ -Szintillationszähler) nach dem 2 aus 3-Prinzip ausgezählt (Abb. 2.3). Der Sondentransport erfolgt dabei ausschließlich durch die Schwerkraft. Der Datenverarbeitungsteil der Relativmeßapparatur (Abb. 2.4) liefert einerseits die Meßdaten in Klarschrift, andererseits werden die Meßdaten auf Lochstreifen ausgegeben, die auf der Großrechenanlage IBM-360/75 ausgewertet werden. (L.7,8) Abb. 2.5 zeigt den Ablauf einer Flußmessung am FRJ-2:

Für die Fluenzmessung steht ein abgeschirmter automatischer Probenwechsler im Aktivlabor zur Verfügung, der ebenfalls vom Datenverarbeitungsteil der Relativmeßapparatur gesteuert wird. Das Magazin kann bis zu 40 Sonden mit einer Einzelaktivität von maximal 100 mCi aufnehmen. Eine Umstellung dieser Apparatur auf Halbleiterdetektor mit spektraler Messung wird eine Auswertung der Sonden bei starker Störstrahlung ermöglichen. Dies wird zu Einsparungen bei der Sondenvorbereitung und damit zu einer wesentlichen Senkung der Dosisbelastung der Mitarbeiter führen.



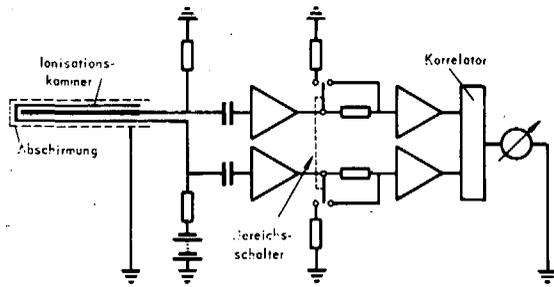


Abb. 2.7: Blockdiagramm des Wechselstromkanals mit abgeschirmter Ionisationskammer (CAMPBELL-Verfahren)

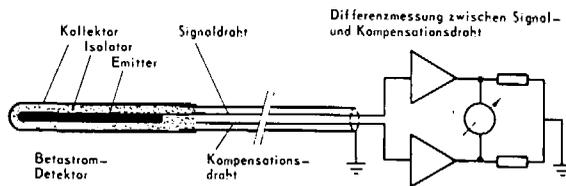


Abb. 2.8: Messung des thermischen Neutronenflusses mit Betaströmdetektoren für permanente Monitoring

Die insbesondere bei der Messung mit einer  $\text{Th}^{232}$ -Kammer erforderliche Diskriminierung des Gamma-Störpegels wird durch Anwendung des CAMPBELL-Verfahrens erreicht. (L.9) Dabei wird nicht wie sonst bei Hochfluß-Ionisationskammern üblich, der von der Kammer gelieferte Gleichstrom als Signalgröße für den zu bestimmenden Neutronenfluß verwertet, sondern das dem Gleichstrom überlagerte Rauschen. Wie sich zeigen läßt, wird damit die Gamma-Diskriminierung um den Faktor  $q_n/q_\gamma$  verbessert.  $q_n$  bzw.  $q_\gamma$  ist die bei der Registrierung eines Neutrons bzw. Gamma-Quants in der Ionisationskammer freigesetzte Ladung. Die erzielbare Verbesserung der Gamma-Diskriminierung beträgt abhängig vom Kammertyp mehr als 3 Dekaden.

Abb. 2.7 stellt das Blockdiagramm des hier verwendeten CAMPBELL-Verstärkers dar. Dieser im Auftrag der AEG-Telefunken von H. WEISS/WIEN entwickelte Verstärker besitzt als besondere Eigenschaft die Möglichkeit, durch Korrelation der von der Zentral- und Mantelelektrode einer Ionisationskammer gelieferten Signale nach getrennter Verstärkung das beim einfachen CAMPBELL-Verstärker als Störpegel auftretende Verstärkergerauschen zu eliminieren.

Abb. 2.9 zeigt den mit diesem Wechselstromverstärker in Verbindung mit einer  $\text{U}^{235}$ -Spaltkammer gemessenen zeitlichen Verlauf des thermischen Neutronenflusses nach einer Reaktorabschaltung des FRJ-1 an der Core-Außenfläche in

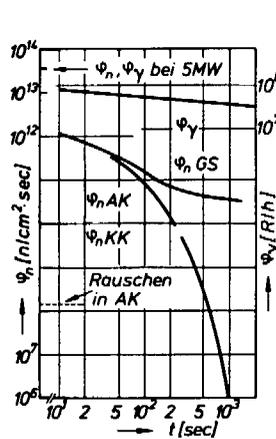


Abb. 2.9

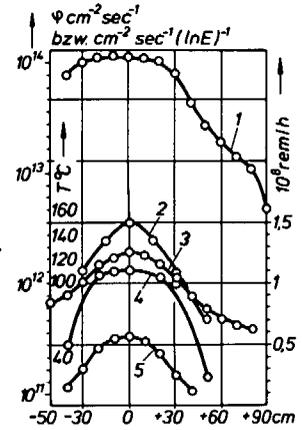


Abb. 2.10

Abb. 2.9: Zeitlicher Verlauf des thermischen Neutronenflusses  $\varphi_n$  und des  $\gamma$ -Flusses  $\varphi_\gamma$  nach einer Reaktorfortabschaltung GS: Messung des Gleichstromsignals AK bzw. KK: Messung des Wechselstromsignals in Auto- bzw. Kreuzkorrelation

Abb. 2.10: Meßwertverteilung im 2 V 1-Kanal des FRJ-2  
 1. Thermischer Fluß  $\varphi_{th}$  [ $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ]  
 2. Gammadosisleistung  $\varphi_\gamma$  [rem/h]  
 3. Temperatur  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 4. Epithermischer Fluß  $\varphi_{epi}$  [ $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}(\ln E)^{-1}$ ]  
 5. Schneller Fluß  $\varphi_s$  [ $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ]

Höhe der Core-Mitteebene. Während im Gleichstromverfahren schon bei einem Fluß von ca.  $5 \cdot 10^{11} \text{ n/cm}^2\text{sec}$  eine Störung durch den Gamma-Untergrund sichtbar wird, läßt sich im CAMPBELL-Verfahren (Autokorrelation) der Neutronenfluß bis ca.  $2 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2\text{sec}$  registrieren (der Rauschpegel des Verstärkers entspricht ca. 10 % des Kammer Signals) und in Kreuzkorrelation weiter bis ca.  $1 \cdot 10^7 \text{ n/cm}^2\text{sec}$ .

Mit dieser Anordnung wurden niedrige thermische Neutronenflußdichten bei hohem Gammauntergrund untersucht, um die ähnlichen Signal-Störungs-Verhältnisse für eine später einzusetzende  $\text{Th}^{232}$ -Kammer vorbestimmen zu können.

**Betaströmdetektoren** (Abb.2.8) nutzen die Betaaktivität aus, die sich im Emitter bei einer bestimmten Neutronenflußdichte im Gleichgewicht einstellt. Die Betastrahlen durchdringen die Isolierschicht zwischen Emitter und Kollektor und liefern einen Strom proportional zur Neutronenflußdichte. Als Emitter dienen vorzugsweise Vanadium und Rhodium. Da Vanadium im Gegensatz zu Rhodium einen  $1/v$ -Verlauf des Wirkungsquerschnitts zeigt, liefert eine Kombination der entsprechenden Detektoren ein Maß für die epithermische Flußdichte.

Wegen des geringen Durchmessers des Detektors (minimal 1,4 mm) und seiner Preiswürdigkeit ist der Betaströmdetektor besonders gut zum festen Einbau in Reaktorexperimente geeignet.

## Bestimmung von Neutronenspektren

Forschungsreaktoren liefern im Gegensatz zu Beschleunigern Neutronenspektren, deren Verlauf sich örtlich und zeitlich sehr stark ändern kann.

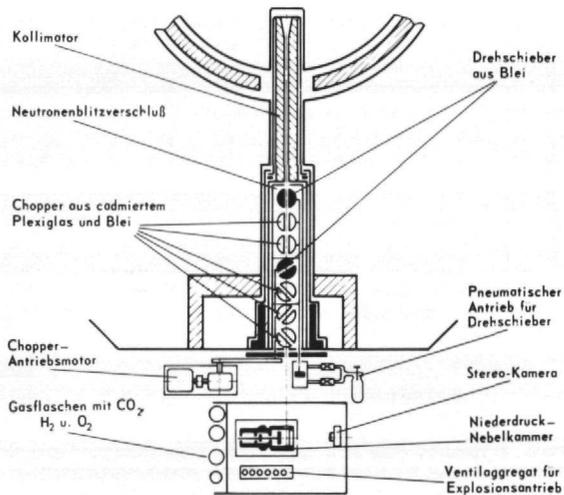


Abb. 2.11:  
Niederdrucknebelkammer an einem Strahlrohr des FRJ-1

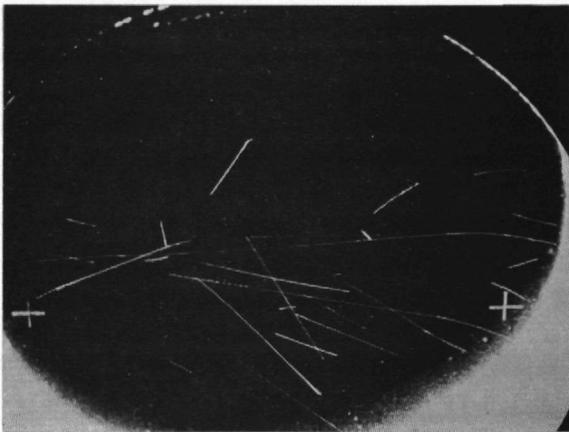


Abb. 2.12:  
Nebelspuren von Rückstoßprotonen  
bei 50 Torr Kammerdruck

Die Verfahren zur Bestimmung des Neutronenspektrums richten sich nach dem Meßort und den Energiebereichen. Im ZIR wurden eine Niederdrucknebelkammer zwischen 10 keV und 4 MeV, zwischen etwa 2 und 10 MeV ein Protonenrückstoßspektrometer eingesetzt, außerdem Kernspurplatten und Schwellwertsonden.

Die Niederdrucknebelkammer (Abb. 2.11) wurde an einem Strahlrohr des FRJ-1 verwendet. Sie wurde automatisch alle 2 Minuten durch einen Knallgasexplosionsantrieb für einige ms aktiviert. In dieser Zeit gab ein Neutronenblitzverschluss einen Neutronenimpuls frei, der in der Nebelkammer Rückstoßprotonen auslöste. Die Stereoaufnahmen der Nebelspuren (Abb. 2.12) wurden mit dem Reprojektions- und Auswertegerät (Abb. 2.13) halbautomatisch vermessen, wobei die Koordinaten digital auf Lochstreifen aufgenommen wurden. Die Berechnung der Streuwinkel und der Neutronenenergien erfolgte auf der IBM 360.

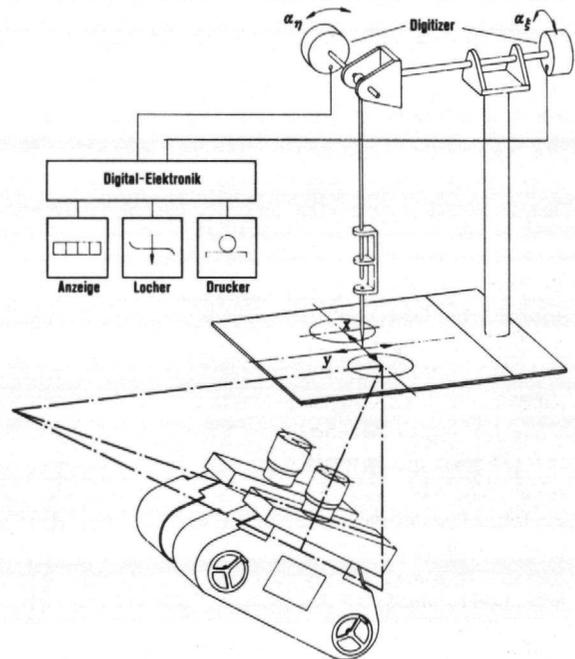


Abb. 2.13:  
Reprojektions- und Auswertegerät

Beim Rückstoßprotonenspektrometer (Abb. 2.14) werden Protonen in einer dünnen Polyäthylenfolie erzeugt. Ihre Energieverteilung wird für verschiedene Streuwinkel mit

einem Halbleiterdetektor gemessen. Abb. 2.15 zeigt das mit den beiden sich ergänzenden Verfahren aufgenommene Spektrum zwischen 10 keV und 10 MeV. (L.10)

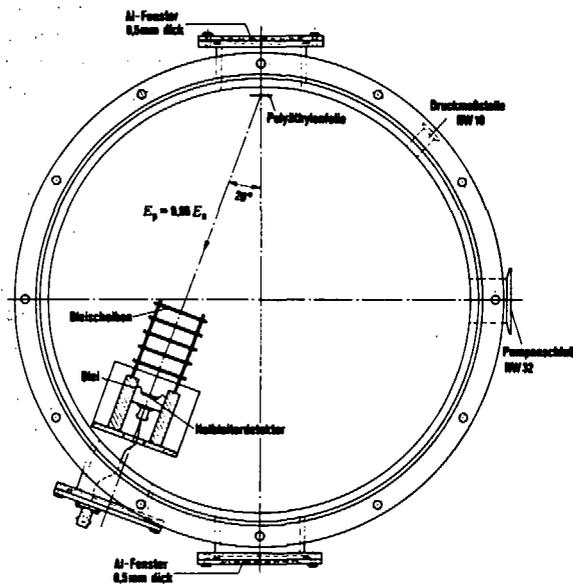


Abb. 2.14: Protonenrückstoßspektrometer (Streukammer)

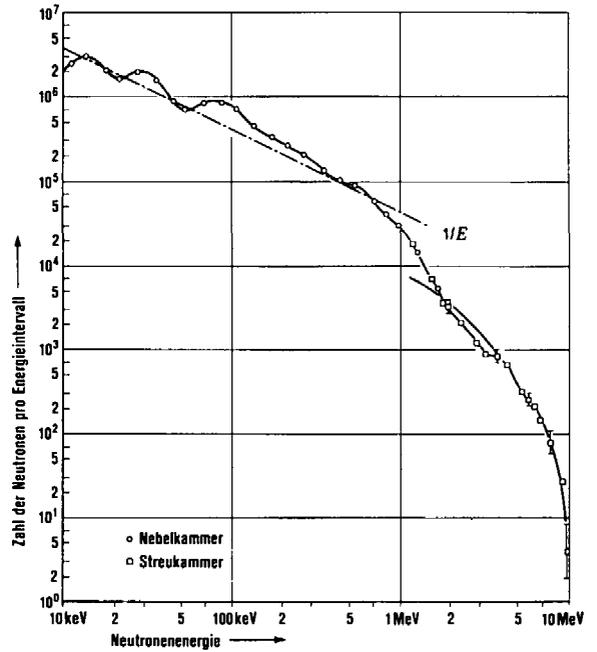


Abb. 2.15: Neutronenspektrum am Strahlrohr des FRJ-1

Kernspurplatten eignen sich zur Bestimmung des Neutronenspektrums am jungfräulichen Reaktor und an Neutronenquellen. Die Auswertung der Spuren erfolgt über Meßokulare und

Fernsehkamera auf dem Bildschirm. Zur Bestimmung der Z-Koordinate nutzt man die sehr kleine Schärfentiefe des Mikroskopobjektivs aus. Die optische Anordnung zeigt Abb. 2.16. Alle Meßwerte werden über Schlitztrommeln digitalisiert und auf Lochstreifen aufgenommen. Ihre Auswertung erfolgt auf der IBM 360. Abb. 2.17 zeigt das Neutronenspektrum einer Am-Be-Quelle, das mit der Anlage gemessen wurde. (L.11)

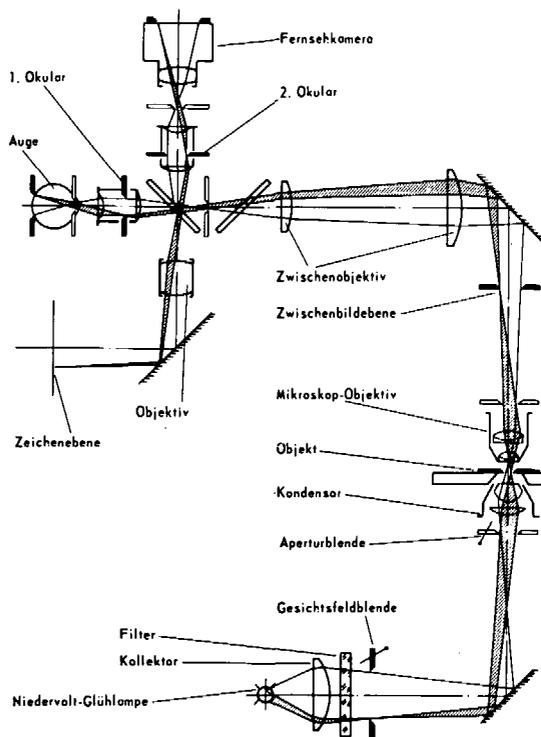


Abb. 2.16: Optische Anordnung der Kernspurmeßanlage

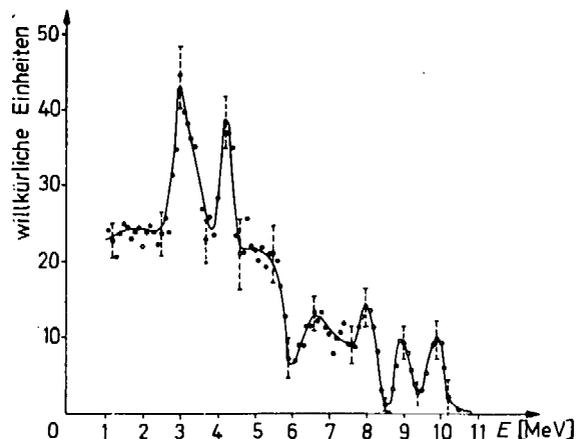


Abb. 2.17: Neutronenspektrum einer Am-Be-Quelle

## Schwellwertsonden

Bestimmte Kernreaktionen, z.B.  $(n,p)$ -,  $(n,\alpha)$ -,  $(n,2n)$ -Prozesse erfordern von den auslösenden Neutronen eine Mindestenergie (Schwellwertenergie). Man kann deshalb Nuklide, bei denen solche Reaktionen ausgelöst werden, zur Messung der spektralen Verteilung des Neutronenflusses ausnutzen. Jede Schwellwertreaktion zeigt einen bestimmten für sie charakteristischen Verlauf des Wirkungsquerschnittes mit der Neutronenenergie. Man kann bei einer geeigneten Auswahl von Reaktionen, deren Wirkungsquerschnitte bekannt sind, aus den Aktivierungen das Neutronenspektrum berechnen. (L.12) Die Probleme liegen dabei in geeigneten Annahmen über das

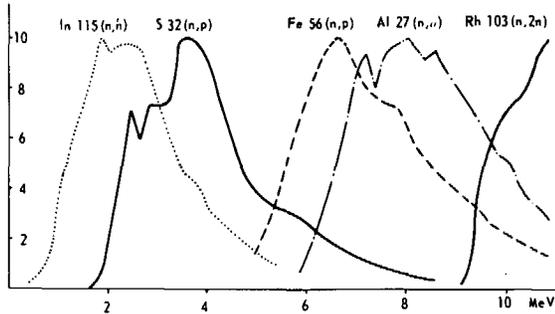


Abb. 2.18: Normierte Empfindlichkeitsfunktionen  $(\sigma(E)\phi(E))$  einiger Schwellwertreaktionen

zu berechnende Spektrum und der zweckmäßigen Auswahl der Reaktionen. Abb. 2.18 zeigt die Empfindlichkeitsfunktionen eines für diesen Zweck zusammengestellten Satzes von Aktivierungs-sonden. Abb. 2.19 stellt das Neutronenspektrum in einer Kernposition des FRJ-1 dar, das mit den Reaktionen  $In^{115}(n,n')$ ,  $Ni^{58}(n,p)$  und  $Al^{27}(n,\alpha)$  gemessen wurde; die Fehlergrenzen sind durch senkrechte Striche dargestellt.

Für die Praxis liegt bei den genannten Verfahren zur Bestimmung des Neutronenspektrums das Schwergewicht auf dem Sondenaktivierungsverfahren. Die übrigen Verfahren werden nur noch da eingesetzt, wo das Sondenverfahren nicht anwendbar ist.

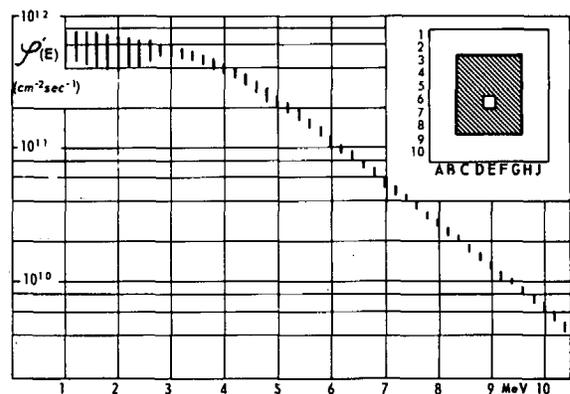


Abb. 2.19: Neutronenspektrum am Reaktor FRJ-1 in der Kerngitterposition E6

## Gammaspektrometrie

Die Gammaspektrometrie ist die Voraussetzung für die Sondenmeßtechnik und jede Art von Aktivierungsanalyse, insbesondere im Zusammenhang mit Reaktorexperimenten. Sie wurde ursprünglich mit Szintillationszählern in Verbindung mit Vielkanalanalysatoren bis zu einigen 100 Kanälen betrieben. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die höhere Auflösung der Halbleiterdetektoren in Verbindung mit entsprechenden Analysatoren nicht nur wesentlich bessere Informationen, insbesondere bei Reaktorexperimenten liefert, sondern auch die Durchführung der Verfahren erleichtert und die Strahlenbelastung des Personals erheblich reduziert.

Abb. 2.20 zeigt das Blockschaema eines Meßstandes, Abb. 2.0 eine Teilansicht der im Institut benutzten Anlage. Um die hohe Energieauflösung voll auszunutzen, sind Verstärkungs- und Nullpunktsschwankungen, die eine Linienverbreiterung bewirken, auszuschalten. Die Stabilisierung kann mit Impuls-generatoren durchgeführt werden. Zur Auswertung der Spektren kann die graphische Darstellung des Spektrums oder ein Lochstreifen benutzt werden, dessen Verarbeitung im Rechenzentrum vorgenommen wird. (L.13)

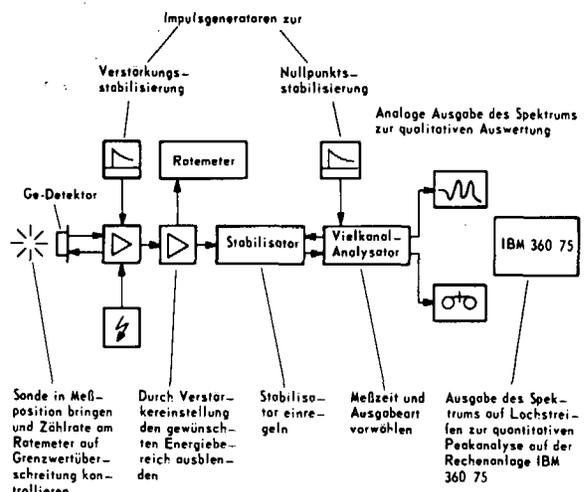


Abb. 2.20: Blockschaubild eines Meßplatzes zur Gammaspektrometrie

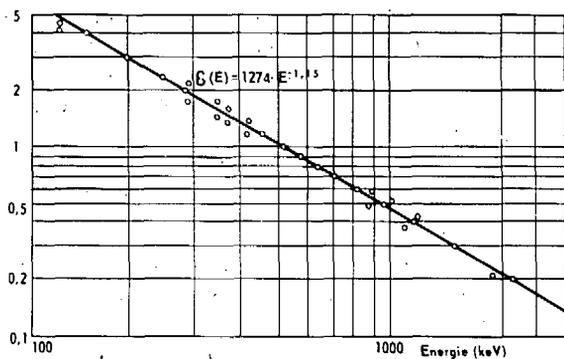


Abb. 2.21:  
Empfindlichkeitsfunktion eines Germaniumzählers,  
gemessen mit EU152

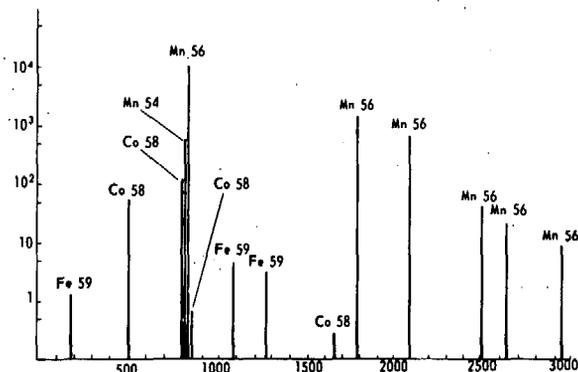


Abb. 2.22:  
Schematisches Gammасpektrum  
einer Eisen-Nickelsonde zur Bestimmung des  
schnellen Neutronenflusses

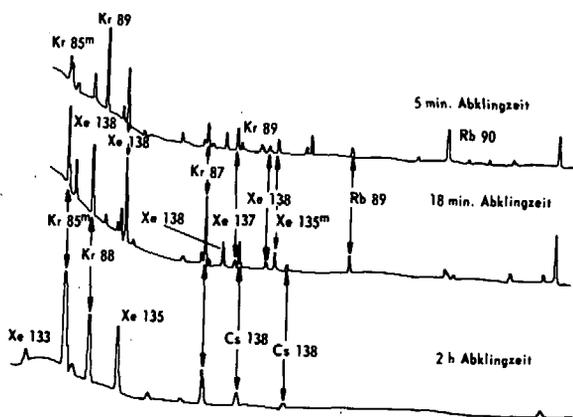


Abb. 2.23:  
Spaltgasspektren nach verschiedenen Abklingzeiten

Die Interpretation des Gammасpektrums verlangt eine umfangreiche Sammlung nuklearer Daten. Das sind vor allem Gammaenergien, Übergangswahrscheinlichkeiten und Konversionskoeffizienten. Mit bekannten Zerfallsschemata kann man dann eine Photopeak-Eichkurve (Abb. 2.21) erstellen, die der Auswertung unbekannter Spektren zugrundegelegt wird. (L.14)

### Absolutmessung von Aktivitäten

Bei der zuvor beschriebenen Anwendung von Aktivierungs-sonden werden Relativmessungen vorgenommen. Die erforderlichen Absolutbestimmungen werden nach der  $4\pi\beta$  und der  $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -Koinzidenz-Methode durchgeführt. (L.16) Die

Als Beispiel zeigt Abb. 2.22 das schematische Gammасpektrum einer Eisen-Nickelsonde, aus deren Aktivität das Neutronenspektrum berechnet werden kann.

Als zweites Beispiel bringt Abb. 2.23 eine Spaltproduktanalyse, wie sie im Projekt LV 31 im Spülkreislauf einer Brennstoffbestrahlungsuntersuchung eingesetzt wurde. (L.15) Eine hohe Empfindlichkeit für den Nachweis der Spaltproduktemission aus beschichteten Uranteilchen und eine große Ausbeute an Informationen wird dadurch erreicht, daß man mit Hilfe von Kühlfallen den Meßvorgang so steuert, daß die Messung nach verschiedenen Abklingzeiten erfolgt. Man erhält dann im ersten Spektrum vorzugsweise die kurzlebigen, im zweiten die mittellebigen und im dritten langlebige Spaltprodukte, wobei jedesmal der Untergrund durch die restlichen Gruppen zurücktritt. Das Verfahren und seine ingenieurmäßige Entwicklung stellt einen entscheidenden Fortschritt für das Testen von Kernbrennstoffen dar.

Kombination von  $4\pi$ -Messung und  $\beta\text{-}\gamma$ -Koinzidenzmessung bringt einen Gewinn an Meßgenauigkeit und ermöglicht auch die Messung von Nukliden mit komplizierteren Zerfallsschemata, ohne daß dabei die Zählausbeuten im  $\beta$  und  $\gamma$ -Zähler bekannt sein müssen.

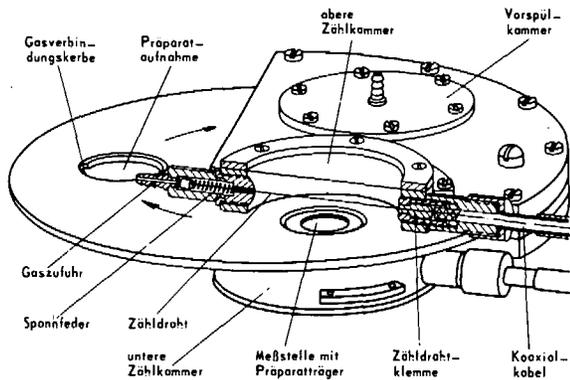


Abb. 2.24:  $4\pi\beta$ -Methandurchflußzähler

Abb. 2.24 zeigt einen für dieses Verfahren entwickelten  $4\pi\beta$ -Zähler. Er besteht aus zwei mit Methan gespülten Zählkammern, mit einem  $50\mu\text{m}$  dicken Zählrohr aus Stahl. Das Präparat wird mit einer Drehscheibe in die Vorspülposition und dann zwischen die beiden Zählkammern geschoben.

Der  $4\pi\beta$ -Zähler wird nach Abb. 2.25 zwischen zwei Szintillationszähler gebracht. Nach der Verstärkung und Diskriminierung der Impulse werden Zählraten und Koinzidenzraten auf Lochstreifen aufgenommen und der Datenverarbeitung zugeführt.

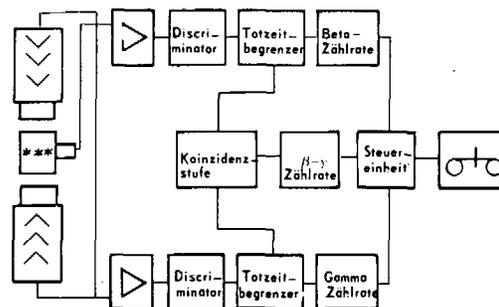


Abb. 2.25:  $4\pi\beta$ - $\gamma$ -Koinzidenzeinrichtung

Neben der Absolutbestimmung von Lösungen wurde besonderer Wert auf die Messung von dicken Sonden gelegt, wie sie bei der Neutronenfluß-, Fluenz- und Spektrumsbestimmung verwendet werden.

Als Auftragsmessungen wurden bisher für folgende Nuklide Meßverfahren entwickelt und Absolutbestimmungen vorgenommen: Au-198, Ca-45, Ce-141(L-17), Co-58, Co-60, Cu-64, J-131, Mn-56, Na-24, Pa-233, Sc-46, Si-31, Sr-90. Die Aktivitäten werden allgemein auf  $< 1,5\%$  genau gemessen.

## Dosimetrie mit nichtnuklearen Sonden

Sondenmeßverfahren haben den Vorteil, daß sie ohne Signalleitungen, z.B. auch in verschweißten Probenbestrahlungskapseln eingesetzt werden können. Es lag also nahe, nach Sondenverfahren auch für die Gammastrahlung zu suchen, die sich mit Aktivierungssonden überhaupt nicht erfassen läßt. Auch für die Messung der Schädigungsdosis in einem Neutronenfeld sind nichtnukleare Verfahren interessant, weil z.B. die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit von Wolfram durch schnelle Neutronen(L-18) eine der Schädigungsrate von Strukturmaterialien sehr viel ähnlichere Empfindlichkeitsfunktion hat als Schwellwertdetektoren.

Die Dosimetrie mit nichtnuklearen Sonden für Reaktorexperimente unterscheidet sich von ähnlichen Verfahren für Strahlenschutz Zwecke dadurch, daß die Fluenzen bzw. Dosisleistungen um mehrere Zehnerpotenzen höher liegen. Dies

stellt eines der Probleme für die Entwicklung geeigneter Verfahren dar. Das zweite Problem liegt darin, daß bei der Dosimetrie einer Strahlenart der Einfluß anderer Strahlenarten und vor allem der Temperatur gering sein muß, wenn man in einem komplexen Strahlenfeld zu brauchbaren Meßwerten kommen will.

Es zeigte sich, daß unter Berücksichtigung dieser Probleme Neutronendosimetrie mit optischen und elektrischen Verfahren und Gammadosimetrie mit viskosimetrischen, volumetrischen, Verflüssigungs- und optischen Verfahren möglich ist. Alle Verfahren erforderten die Entwicklung spezieller Apparaturen. Für Untersuchungen des Störeinflusses von Fremdstrahlung und der Temperatur wurde ein besonderes Testrig, LV 16, entwickelt.

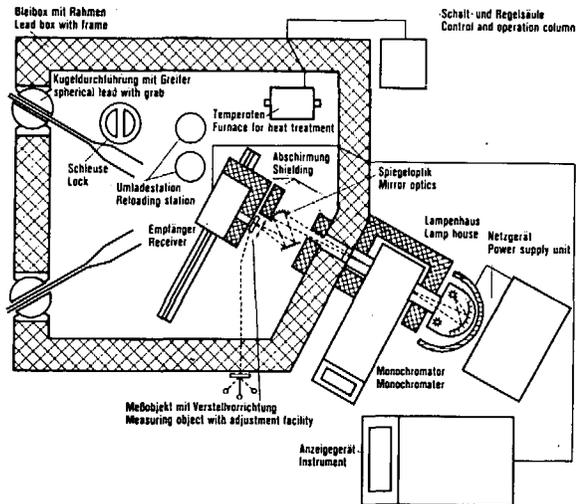


Abb. 2.26:  
Bleizelle für optische Messungen

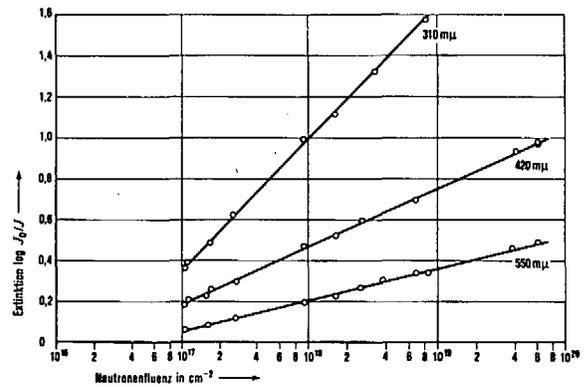


Abb. 2.27:  
Neutroneninduzierte Verfärbung  
von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Einkristallen (Probendicke 1 mm)  
bei verschiedenen Wellenlängen

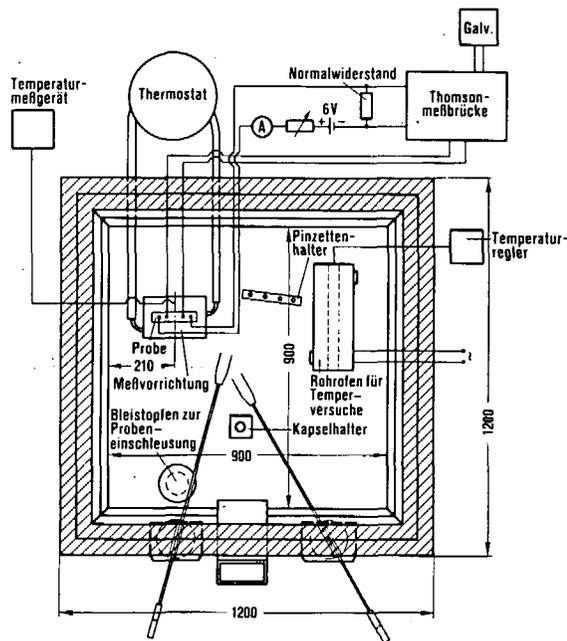


Abb. 2.28:  
Bleizelle mit Zusatzeinrichtungen  
für die Widerstandsmessung an Wolfram-Drahtsonden  
zur Neutronenflußmessung (schematisch)

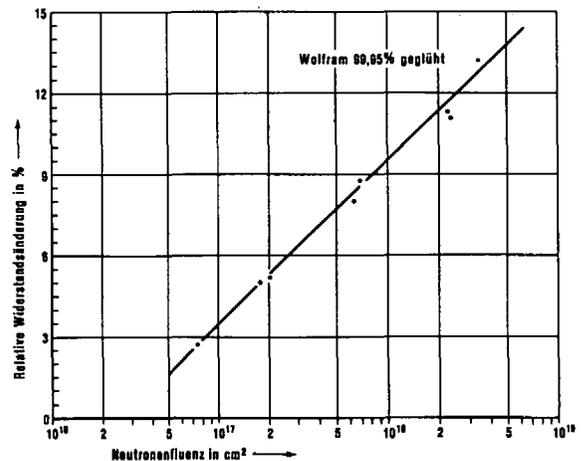


Abb. 2.29:  
Relative Widerstandsänderung von Wolfram-  
Drahtsonden als Funktion der Neutronenfluß (Co 58)  
(Wolfram 99,95%, geglüht)

Die optische Auswertung stark aktivierter Glasdosimeter und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Sonden (L.19,20,21) erfolgte in einer Bleizelle, (Abb. 2.26). Diese enthält neben den Durchführungen und Greifern den Temperofen für das Ausheizen der Sonden und ein Spektralphotometer für die Messung der strahleninduzierten Verfärbung (Abb. 2.27).

Die Bleizelle für die Widerstandsmessungen an aktiven Wolframdrähten ist in Abb. 2.28 dargestellt. Sie ist mit Temperofen, Thermostat, Meßvorrichtung und Meßbrücke ausgestattet. Abb. 2.29 zeigt die relative Widerstandsänderung als Funktion der Neutronenfluß (Nickelfluß).

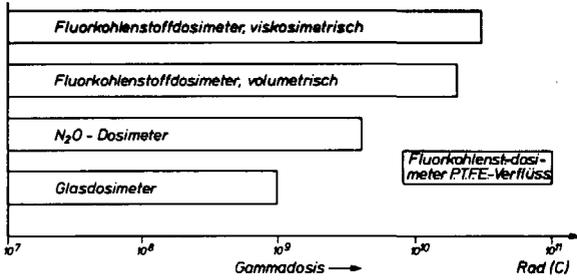


Abb. 2.30: Einsatzbereiche von Gammadosismetern für Kernreaktoren

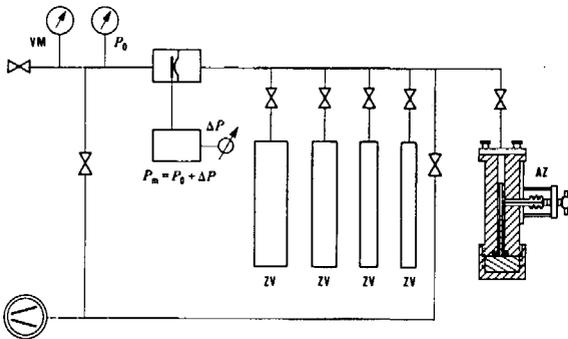


Abb. 2.32: Apparat zur Bestimmung von Radiolysegasmengen

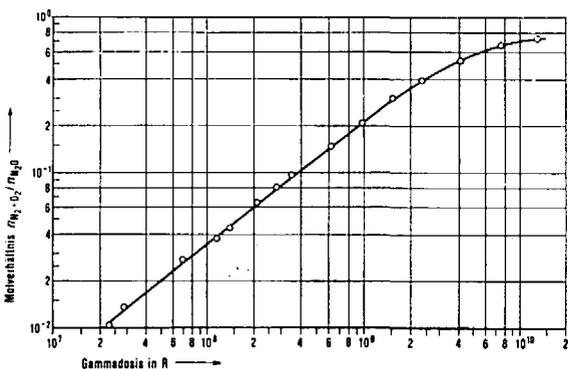


Abb. 2.33: Kalibrierungskurve der N<sub>2</sub>O-Dosimeter

Gammadosismeter wurden für verschiedene Einsatzbereiche (Abb. 2.30) entwickelt. Sie erstrecken sich bis etwa  $10^{11}$  Rad.

Zur Kalibrierung von Gammadosismetern wurde Kobalt-60-Strahlung und Reaktorstrahlung verwendet. Es zeigt sich, daß die thermischen Neutronen die Verfärbung bei hohen Dosiswerten erheblich reduzieren und die Sonde daher nur bis etwa  $10^9$  Rad verwendet werden kann (Abb. 2.31).

Für volumetrische Verfahren wurde die Apparatur, Abb. 2.32, entwickelt. Als Sonde wurde N<sub>2</sub>O in einer Quarzampulle verwendet. Der durch Radiolyse im Strahlenfeld gebildete Sauerstoff und Stickstoff wird bestimmt, indem die Ampulle in der Vorrichtung AZ bei tiefen Temperaturen zermüht wird. Dabei kondensieren das restliche N<sub>2</sub>O und das ebenfalls gebildete NO<sub>2</sub>, und die Permanentgase können

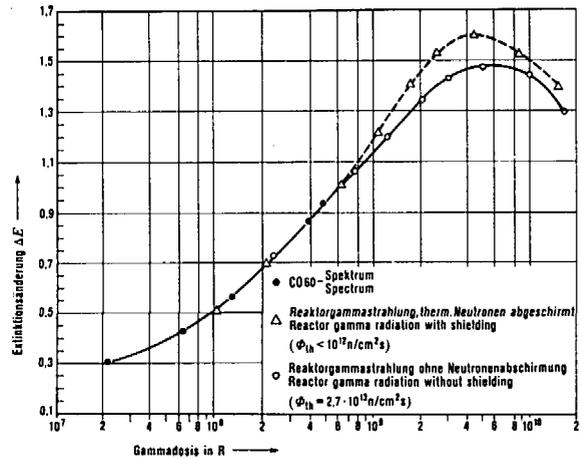


Abb. 2.31: Kalibrierungskurve eines Dosimeterglases für Reaktor Zwecke

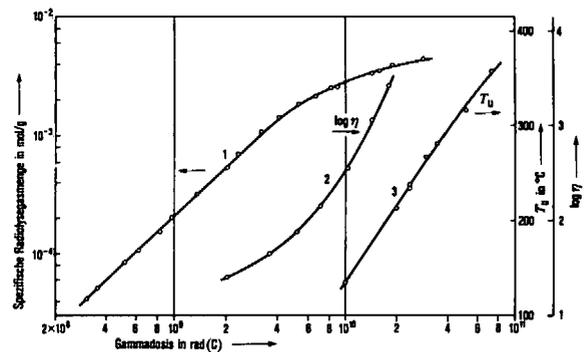


Abb. 2.34: Kalibrierungskurven von Polytetrafluoräthylen-Dosimetern bei Benutzung verschiedener Meßverfahren

mit einem empfindlichen Membranmanometer gemessen werden. Abb. 2.33 zeigt die Eichkurve dieses Verfahrens. (L.22)

Das volumetrische Verfahren ist auch auf Fluorkohlenstoffe (L.22,23,24,25) anwendbar (Abb. 2.34). Außerdem hat sich hierfür ein viskosimetrisches Verfahren mit handelsüblichen Geräten bewährt. Es zeigt sich ferner, daß auch die Verflüssigungstemperatur bestimmter Fluorkohlenstoffe (PTFE) zur Bestimmung der Gammadosis benutzt werden kann.

Mit der Überprüfung der Dosimetrieverfahren im Testrig LV 16 sind die Arbeiten über die Dosimeter mit nichtnuklearen Verfahren abgeschlossen.

Es ist anzunehmen, daß die Bedeutung dieser Verfahren mit den steigenden Anforderungen an die Erfassung der Bestrahlungseffekte zunimmt.

## Nukleare Berechnungen

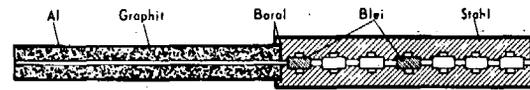
Die Parameter der geplanten Versuchsanordnungen und die zu verwendenden Materialien müssen in enger Zusammenarbeit mit den Ingenieuren aufgrund von Rechnungen bestimmt werden. Im wesentlichen müssen die Anordnungen unter folgenden Gesichtspunkten durchgerechnet werden:

- Sicherheit: Die Dosisleistung im Raum, der für die Bedienung der Experimente vorgesehen ist, darf die vorgeschriebenen Werte nicht überschreiten. Abschirmung und Geometrie müssen danach eingerichtet werden. (L.26)
- Reaktivitätsänderung: Sie ist ein Maß der Belastung für den Reaktor durch die Experimentiereinrichtung.
- Veränderung des bestrahlten Materials wie Aufheizung durch Energieübertragung von  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen, Neutronen oder Spaltprodukten, Aktivierung (L.27), Conversion.

Die letztgenannten Rechnungen sind auch für die Auswertung von Versuchsergebnissen notwendig.

Als Beispiel zeigt Abb. 2.35 einen Reaktoreinschub für den FRJ-1, die dafür berechneten Neutronenflußdichten und die Punktquellstärken der durch diese bewirkte Aktivierung in verschiedenen Gammaenergiebereichen. Man sieht, durch das Borablech wird die thermische Flußdichte sehr stark herabgesetzt und baut sich aus dem schnellen Fluß allmählich wieder auf. Die Aktivierung entsteht im wesentlichen durch thermische Neutronen, sie hat daher am Ort des Borableches ebenfalls ein ausgeprägtes Minimum.

Charakteristisch für alle Rechnungen auf diesem Gebiet ist, daß die Geometrie der Anordnungen sehr selten so einfach ist, daß exakte Rechnungen durchgeführt werden können. Meist lassen sich nur Näherungsverfahren verwenden, die bei allen Sicherheitsfragen so benutzt werden müssen, daß die Grenzwerte nicht überschritten werden.



Kollimator mit Neutronenblitzverschluß für FRJ-1

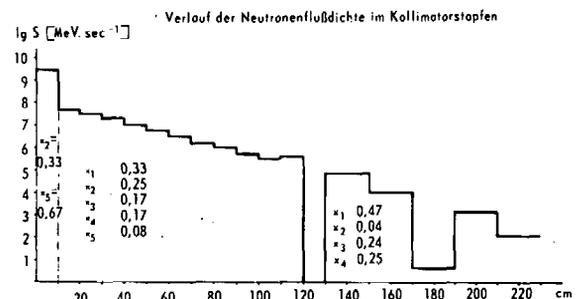
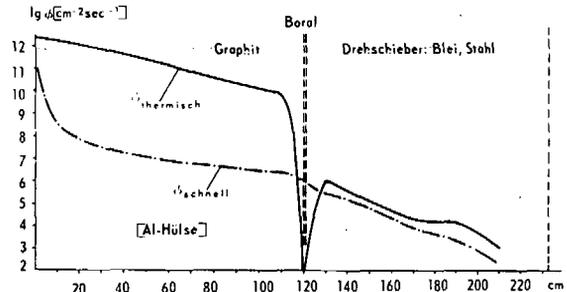


Abb. 2.35: Punktquellstärken aus der Aktivierung durch schnelle und thermische Neutronen.  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  geben die relativen Anteile an 0,8, 1,3, 1,7, 2,5 und 2,8 MeV-Strahlung

Zum Aufbau der Gruppe Nukleare Berechnungen hat Herr Dipl.-Phys. Mohammed Sekkal wesentlich beigetragen. Er war seit 1.3.1965 Mitarbeiter des ZIR und starb nach kurzer schwerer Krankheit am 17.4.1970 in Jülich.

## Literaturverzeichnis zu Kapitel 2

- (L.1) Schneider, W.: Neutronenmeßtechnik, Walter de Gruyter & Co., Berlin (erscheint demnächst)
- (L.2) Borchardt, G.; Schneider, W.: JÜL-140-RX, Mai 1963
- (L.3) Borchardt, G.; Hasenclever, B.: JÜL-179-RX, Sept. 1964
- (L.4) Weise, L.: Statistische Auswertungen von Kernstrahlungsmessungen, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien 1971
- (L.5) Borchardt, G.: JÜL-503-RX, Sept. 1967
- (L.6) Borchardt, G.: Atomkernenergie 15 (1970) 311
- (L.7) Borchardt, G.; Hasenclever, B.; Schneider, W.: ZIR-Bericht Nr. 66/12, Juli 1966  
Vortrag: International Conference on Radiation Measurements in Nuclear Power, Berkeley, Sept. 1966  
Radn. Meas. in Nucl. Power, Paper 7.1, 1966
- (L.8) Borchardt, G.: ZIR-Bericht Nr. 69/3, Jan. 1969
- (L.9) Schmidt, K.: ZIR-Arbeitsbericht Nr. MV 4/4, Nov. 1968
- (L.10) Lang, H.: Diss. TH Aachen, 1969 = JÜL-599-RX, Juli 1969
- (L.11) Greiß, H.B.: Nukleonik 10 (1968) 283
- (L.12) Meixner, Ch.: JÜL-726-RX, Febr. 1971
- (L.13) Meixner, Ch.: JÜL-572-RX, Febr. 1969
- (L.14) Meixner, Ch.: Gammaenergie tabellen zur Aktivierungsanalyse, Thieme-Taschenbuch Bd. 38, München 1970
- (L.15) Meixner, Ch.: ZIR-Bericht Nr. 69/1, Febr. 1969
- (L.16) Dieck, L.: JÜL-355-RX, Jan. 1966
- (L.17) Lang, H.; Dieck, E.L.: J. appl. Rad. Isotopes (Z. Veröffentl. angen.)
- (L.18) Jeltsch, E.: Atomkernenergie 13 (1968) 289
- (L.19) Jeltsch, E.; Graf, W.: Atomkernenergie 13 (1968) 425
- (L.20) Graf, W.; Jeltsch, E.: Atomkernenergie 15 (1970) 82
- (L.21) Jeltsch, E.: Atomkernenergie 15 (1970) 312
- (L.22) Jeltsch, E.: Atomkernenergie 14 (1969) S. 369
- (L.23) Jeltsch, E.: Nukleonik 11 (1968) 307
- (L.24) Jeltsch, E.; Graf, W.: Atomkernenergie 16 (1970) 55
- (L.25) Jeltsch, E.; Graf, W.: Atomkernenergie 17 (1971) 218
- (L.26) Sekkal, M.; Graudus, E.: Interner Bericht ZIR-68/3
- (L.27) Sekkal, M.; Graudus, E.: Interner Bericht ZIR-67/3, Nov. 1967
- (L.28) Borchardt, G.; Lang, H.; Meixner, Ch.; Schmidt, K.; Schneider, W.; Weise, L.: ZIR-Arbeitsberichte MV1/MV4 1-6 (werden fortlaufend ergänzt)

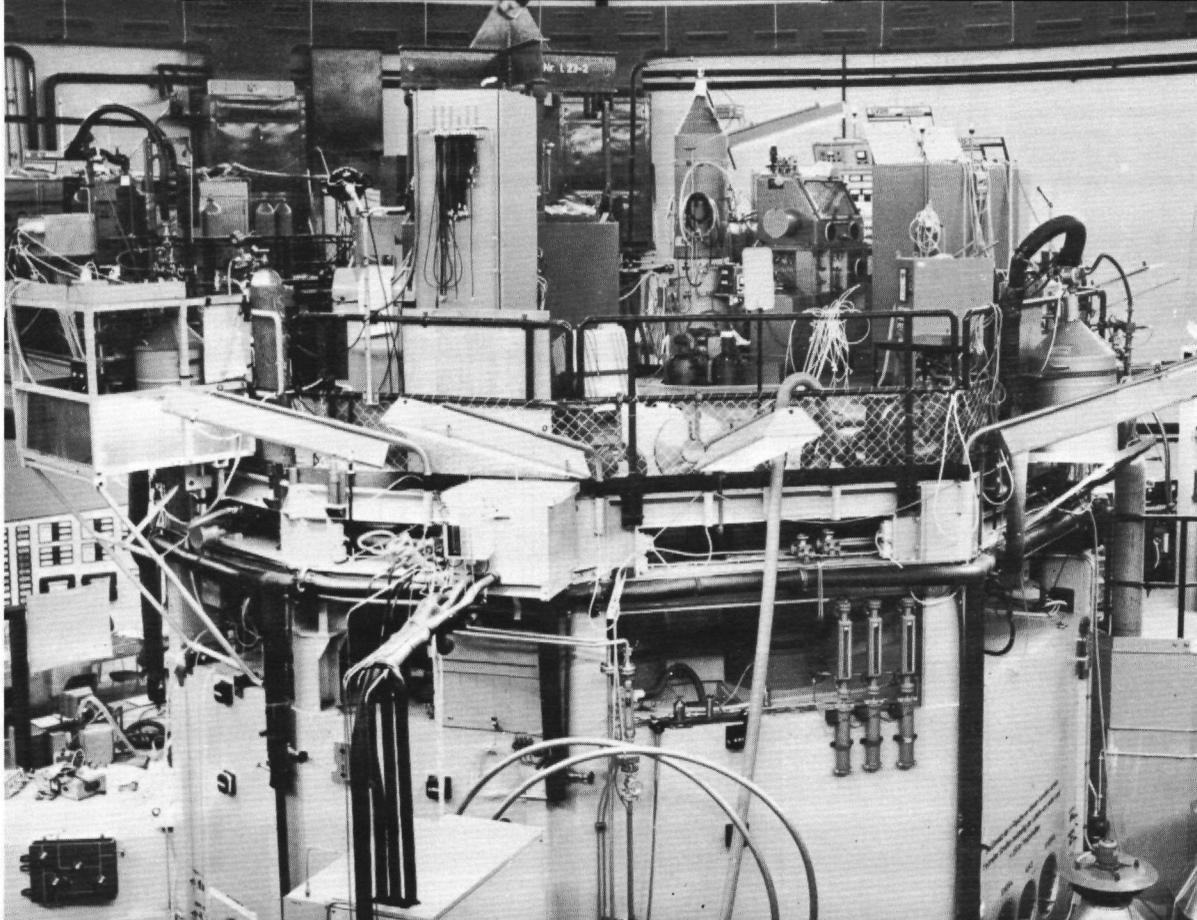


Abb. 3.0: Reaktorexperimente am Reaktor FRJ-2 (DIDO)

### 3. Reaktornutzung und Reaktorexperimente

Forschungsreaktoren lassen sich ausnutzen zur Bestrahlung von Proben, für Material- und Brennstoffbestrahlungen und Strahlrohrexperimente.<sup>(L.1)</sup> Die KFA Jülich ermöglicht mit ihren Reaktoren FRJ-1 und FRJ-2 alle diese Anwendungen.

#### Probenbestrahlung

Die Probenbestrahlung findet besonders viel Anwendung in der Chemie, in den Lebenswissenschaften und für technologische Untersuchungen. Die Forderungen, die an die Bestrahlungen gestellt werden, sind sehr vielseitig in Bezug auf thermische oder schnelle Neutronenflußdichte, Gammauntergrund, Probengröße, Bestrahlungstemperatur, Bestrahlungsdauer, Einschuß- und Ausschußzeit usw. Die Sicherheitsvorschriften und die Strahlenschutzverordnung stellen weitere Bedingungen.<sup>(L.2)</sup> Um alle diese Forderungen zu erfüllen, braucht man verschiedene Bestrahlungseinrichtungen. Der Vergleich mit in- und ausländischen Reaktorstationen zeigt, daß Jülich hier eines der vielseitigsten Angebote aufweist.

Die **Bestrahlungseinrichtungen am FRJ-1**, einem Schwimmbadreaktor vom Typ MERLIN, nutzen die bequeme Zugänglichkeit dieses Reaktors aus. Alle Einrichtungen wurden im ZIR von Grund auf neu entwickelt und gefertigt.

Bei den **Rohrbestrahlungseinrichtungen BE 22** (Abb. 3.1) erfolgt die Bestrahlung in einem Rohr, das in der Gitterplatte des Reaktors eingesetzt ist.<sup>(L.3)</sup> Die gekapselten Bestrahlungsproben werden in einem Fahrkorb mit einer Seilwinde zum Reaktorkern hinabgelassen und dort während der Be-

strahlung von strömendem Poolwasser gekühlt. Nach der Bestrahlung werden sie hochgewunden und unter Wasser mit einem Greifer in einen Spezial-Blei-Transportbehälter umgeladen. Ein Sicherheitsfangkorb verhindert, daß bei diesem Vorgang eine Kapsel in den Reaktor fällt. Mit der Einrichtung können normal 21 Proben von 13 mm Ø und 95 mm Höhe, in Sonderfällen 3 Proben von 50 mm Ø und 100 mm Höhe bei einer thermischen Flußdichte von etwa  $5 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und einer schnellen Flußdichte von  $1 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  bestrahlt werden. Be- und Entladung erfolgt bei laufendem Reaktor.

Beim **Einsatzverfahren BE 3** (Abb. 3.2) erfolgt die Bestrahlung in einem Leerelement, das in irgendeine Randposition des Reaktorkerns oder in den Kern selbst eingesetzt werden kann.<sup>(L.4)</sup> Jedes Leerelement kann 4 Bestrahlungsbüchsen aufnehmen und jede Bestrahlungsbüchse 21 verschweißte Aluminiumkapseln von 16 mm Ø und einer Länge von 36 mm oder 7 Kapseln von 105 mm Länge. Die beladenen Leerelemente werden mit einem Spezialgreifer in die Gitterplatte eingesetzt. Sie werden bei der Bestrahlung vom strömenden Kühlwasser des Reaktors gekühlt, so daß jede Kapsel umflossen wird. Die Entladung der Leerelemente erfolgt auf der Abstellplatte des Reaktors. Mit einem Spezialgreifer werden die Büchsen einzeln entnommen und in einen Spezialblei behälter eingesetzt.

Das Verfahren läßt sich mit thermischer Neutronenflußdichte bis zu  $1 \cdot 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und schneller Flußdichte bis zu  $4 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  durchführen. Be- und Entladung kann nur bei abgeschaltetem Reaktor erfolgen.

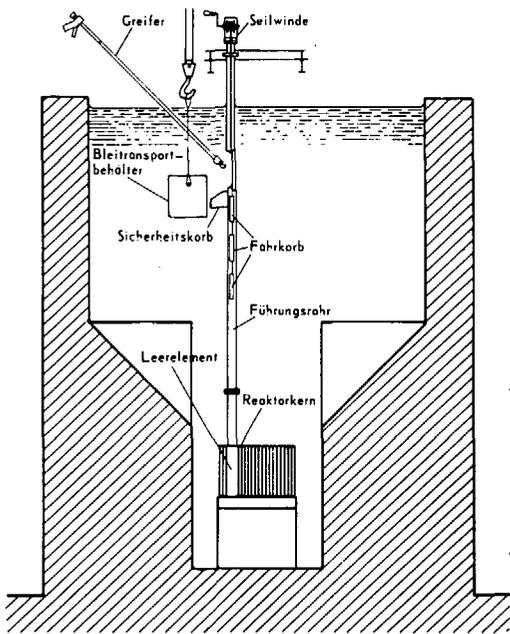


Abb. 3.1:  
Rohrbestrahlungseinrichtung BE 22 für einfachen und sicheren Probenwechsel während des Reaktorbetriebs

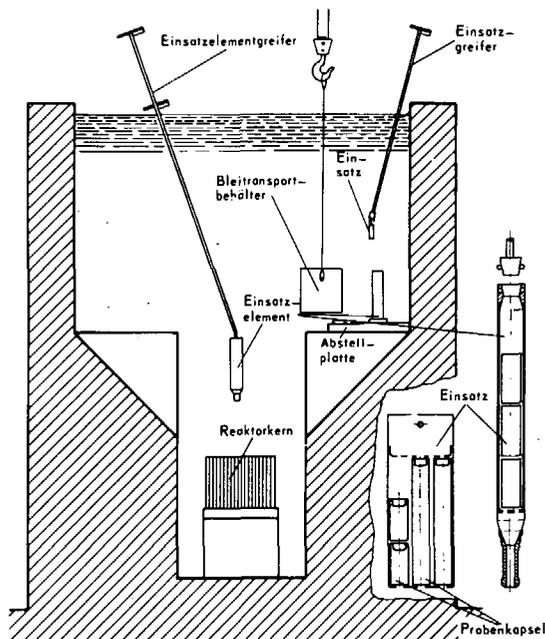


Abb. 3.2:  
Einsatzverfahren BE 3 für Langzeitbestrahlungen am Kernrand und im Kern des Reaktors

Die Rohrpostanlage BE 1 (Abb. 3.3) ermöglicht Bestrahlungszeiten von einigen Sekunden bis zu 30 Minuten.<sup>(L.5)</sup> Sie ist mit 3 Fahrrohren ausgestattet, die bis zu einem Abstand von etwa 15 cm an den Kernrand führen und Bestrahlungen mit thermischen Flußdichten von etwa  $1 \cdot 10^{12}$  bis  $3 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und schnellen Flußdichten von  $1 \cdot 10^{11}$  bis  $5 \cdot 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ermöglichen. Die gekapselten Proben werden in Transportbüchsen aus Polyäthylen eingesetzt, über die Eingabeschleuse in die Drehtrommel eingeführt und von

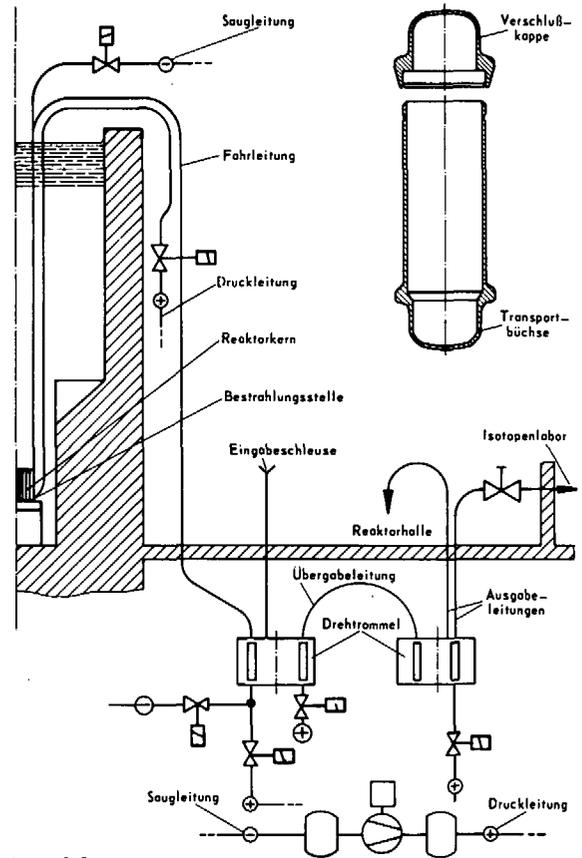


Abb. 3.3:  
Pneumatische Rohrpost BE 1 mit Trommelverteiler für wahlweise Ausgabe in der Reaktorhalle und im Isotopenlaboratorium

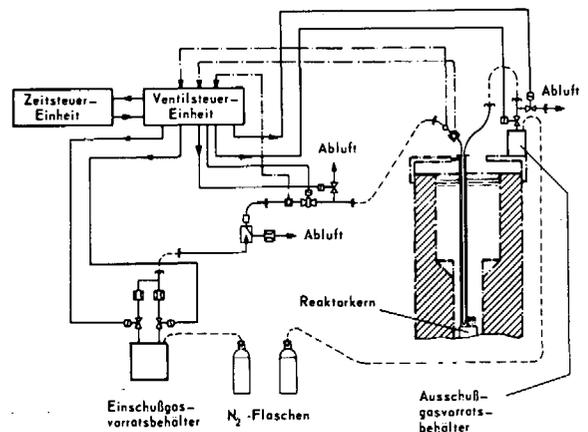


Abb. 3.4:  
Schnelle Rohrpost BE 25 für Bestrahlungsaufgaben der Nuklearchemie

da mit komprimiertem  $\text{CO}_2$  in die Bestrahlungsposition eingeschossen. Die Proben temperaturen liegen bei etwa  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nach der Bestrahlung wird die Büchse über die erste Drehtrommel in eine zweite übergeführt und von da in der Reaktorhalle in einem bereitstehenden Transportbehälter oder direkt in das Isotopenlabor des FRJ-1 ausgegeben. Insgesamt dauert die Entladung etwa 1 Minute.

Die Schnelle Rohrpost BE 25 (Abb. 3.4) gestattet extrem

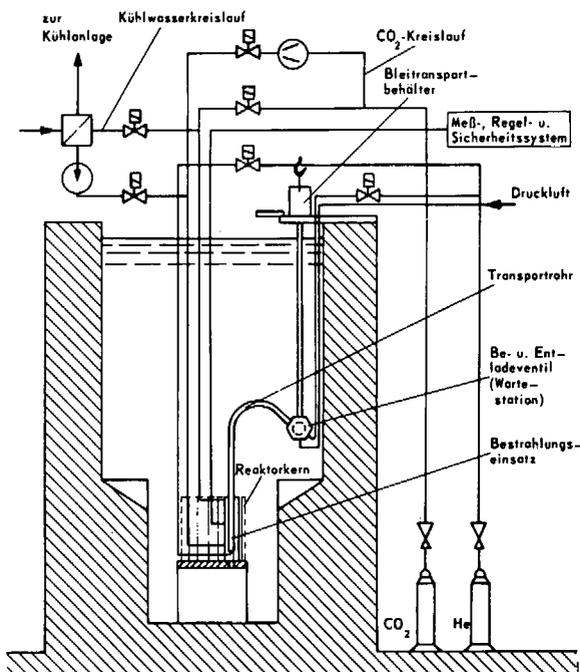


Abb. 3.5:  
Dosimeter-Testrig LV 16 A mit einstellbarer Temperatur-  
regelung von 40°C bis 300°C

kurze Bestrahlungen (1 s) und Ausschußzeiten von weniger als 1 s.<sup>(L.6)</sup> Die Proben werden mit Polyphenylenoxid-Rohrpostbüchsen mit einem Nutzvolumen von 5 cm<sup>3</sup> mit komprimiertem Stickstoff eingeschossen und können im Gasstrom gekühlt werden. Bei einer thermischen Flußdichte von etwa  $3 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und schnellen Flußdichten von etwa  $4 \cdot 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ergibt sich eine Bestrahlungstemperatur von etwa 100 °C. Die Anlage wurde ursprünglich für die Nachbestrahlung von Kernbrennstoff zum Zwecke der Abbrandmessung entwickelt und gemeinsam mit dem Institut für Nuklearchemie gebaut. Sie wurde inzwischen diesem Institut zur Ausnutzung übertragen.

Das Testrig LV 16 A (Abb. 3.5) wurde für den Test von Dosimetersonden entwickelt.<sup>(L.7)</sup> Es gestattet einerseits die Bestrahlungstemperatur mit vorgekühltem Wasser bis auf 40 °C zu senken und allmählich auf 100 °C ansteigen zu lassen und mit einem CO<sub>2</sub>-Kreislauf und Zusatzheizung Temperaturen zwischen 110 °C und 300 °C einzustellen. Es besteht ferner die Möglichkeit, die thermische Flußdichte gegenüber der schnellen Flußdichte durch eine Abschirmung mit Bor zu senken. Die Einrichtung ermöglicht also die Untersuchung des Einflusses von Temperaturen und Neutronspektrum auf Bestrahlungseffekte, wobei Probenkapseln von 105 mm Länge und 16 mm Durchmesser benutzt werden können und thermische Flußdichten bis zu etwa  $5 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und schnellen Flußdichten bis zu  $1 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  erzielt werden. Die Bestrahlungszeiten sind nicht beschränkt. Be- und Entladung können bei laufendem Reaktor erfolgen.

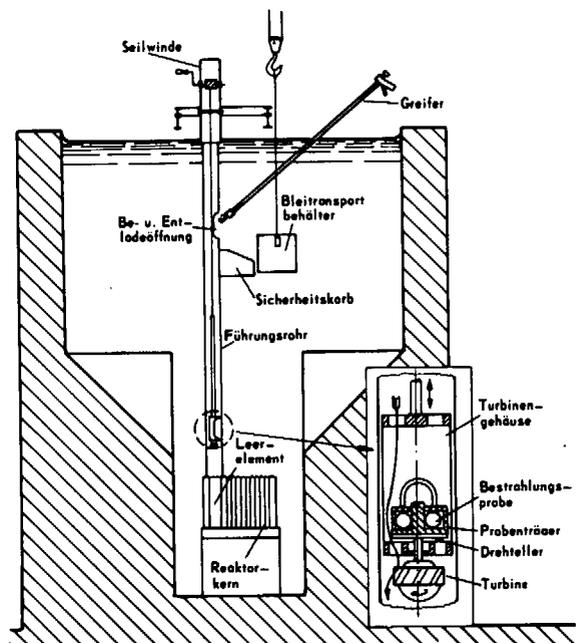


Abb. 3.6:  
Drehteller-Bestrahlungseinrichtung BE 26 zum gleichmäßigen  
Aktivieren von Meßsonden und Proben

Der Drehteller BE 26 (Abb. 3.6) ist eine Bestrahlungseinrichtung, mit der man 10 Proben von 16 mm Ø und 3,5 mm Höhe mit einem identischen Neutronenfluß bestrahlen kann.<sup>(L.8)</sup> Man kann auf diese Weise Aktivierungs sonden für Neutronenflußdichte-Messungen kalibrieren oder bei der Aktivierungsanalyse die Vergleichsproben bestrahlen. Die Bestrahlungseinrichtung ähnelt der Rohrbestrahlungseinrichtung. Statt des Fahrkorbs wird jedoch ein Turbinengehäuse eingesetzt, in dem der Probenträger auf einen Drehteller gesetzt werden kann. Das Gehäuse wird in die Bestrahlungsposition abgelassen, in der die vorgeschriebene Neutronenflußdichte (max. thermisch  $5 \cdot 10^{13}$ , schnell  $1 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) herrscht. Die Turbine wird vom Kühlwasserstrom des Reaktors angetrieben. Über einen fluidischen Meßfühler wird die Drehung überwacht. Nach der Bestrahlung wird wie bei der Rohrbestrahlung der Probenträger entnommen und auf den Transportbehälter umgeladen.

Bei allen Bestrahlungen am Leichtwasserreaktor FRJ-1 ist mit einem relativ starken Untergrund an schnellen Neutronen und an Gammastrahlung zu rechnen. Auf der anderen Seite ist die Bestrahlungskapazität dieses Reaktors für Kleinproben sehr hoch und Sonderwünsche in Bezug auf Zeitpunkt und Form der Bestrahlung sind leicht erfüllbar.

Die Bestrahlungseinrichtungen am FRJ-2, einem Schwerwasserreaktor vom Typ DIDO, sind an die Experimentierkanäle gebunden. Man erhält bei Ihnen bei höherer thermischer Flußdichte einen geringeren Untergrund an schnellen Neutronen und Gammastrahlung.

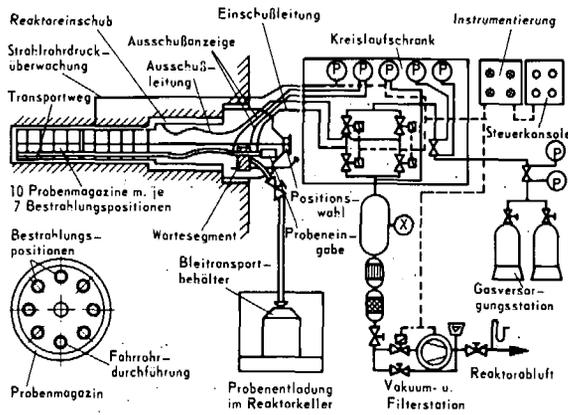


Abb. 3.7: Trommelmagazin-Einrichtung BE 4 mit mechanisch-pneumatischer Proben-Bel- und Entladung bei Reaktorbetrieb

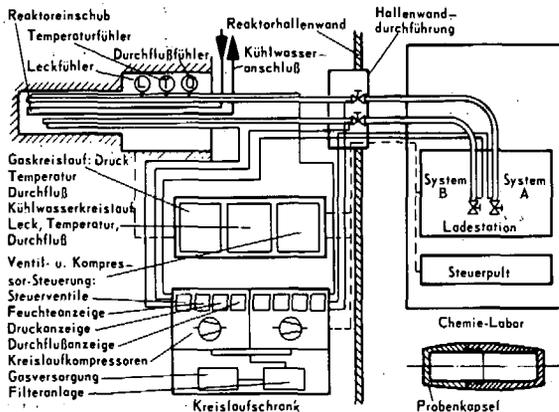


Abb. 3.8: Standard-Rohrpost BE 12 mit Anschluß an das Radiochemische Laboratorium

Die Trommelmagazinbestrahlungseinrichtung BE 4 (Abb. 3.7) kann bis zu 70 Harwell-Schraubkapseln aus Aluminium aufnehmen. (L.9) Ihre Länge beträgt etwa 74 mm, der Durchmesser 27 mm. Die Kapseln werden mit  $\text{CO}_2$  pneumatisch wahlweise in eine der 10 Probenmagazine eingeschossen und mechanisch aus dem Einschüßkanal herausgedreht. Sie können unbeschränkte Zeit hindurch bestrahlt werden, wobei sich je nach Lage thermische Neutronenflußdichten zwischen  $1 \cdot 10^{10}$  und  $1 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und schnelle Flußdichten zwischen  $10^7$  und  $10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  einstellen.

Die Bestrahlungstemperaturen liegen dementsprechend zwischen  $60^\circ\text{C}$  und  $350^\circ\text{C}$ . Der Ausschüß in das Wartesegment erfolgt wieder pneumatisch nach Eindrehen der Probe in den Kanal. Mechanisch wird die Probe dann in einen Transportbehälter, der im Reaktor-Keller aufgestellt ist, ausgestoßen.

Die Standard-Rohrpost BE 12 (Abb. 3.8) wurde von der Firma Vickers Armstrong anknüpfend an die für Harwell gebaute Anlage entwickelt. (L.10) Mit ihr lassen sich unabhängig voneinander zwei Proben in Rohrpostbüchsen aus Polyphenylenoxid bestrahlen, wobei thermische Flußdichten

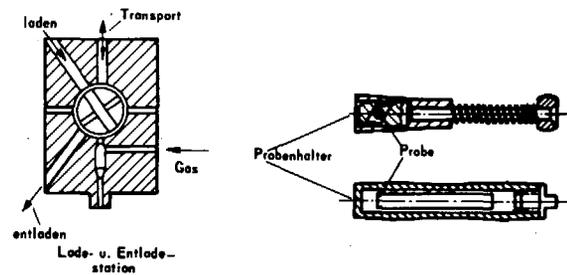
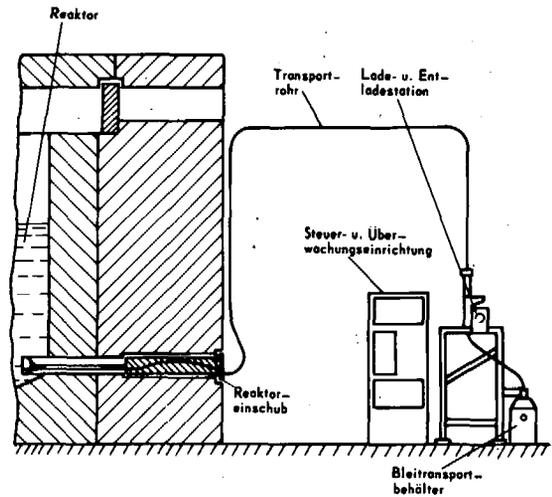


Abb. 3.9: Schnelle Rohrpost BE 11 zum Bestrahlen von Kleinproben mit automatischer Entladung in eine Meßapparatur

von  $1,5 \cdot 10^{13}$  bzw.  $2,5 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  sowie schnelle Flußdichten von  $1 \cdot 10^{10}$  bzw.  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  erreicht werden. Der Innenraum der Büchse ist 100 mm lang und 24 mm im Durchmesser. Die Lade- und Entladestation der Anlage befindet sich außerhalb der Reaktorhalle in einem Raum neben einem Chemie-Labor, das vom Zentrallabor für Chemische Analyse ausgenutzt wird. Die Bestrahlungskanäle werden mit Wasser gekühlt. Die Probentemperatur liegt bei einer Zuladung von 30 g unter  $100^\circ\text{C}$ . Es sind Bestrahlungszeiten zwischen einigen Sekunden und einigen Stunden möglich.

Die Schnelle Rohrpost BE 11 (Abb. 3.9), ebenfalls von der Firma Vickers-Armstrong geliefert, ermöglicht die Bestrahlung kleiner Kugeln (ca. 2 mm  $\varnothing$ ), die nach dem Ausschüß automatisch vom Probenbehälter getrennt und in die Meßapparatur eingeschleust werden. (L.11) Der gesamte Ausschüßvorgang dauert etwa 3 s. In Sonderfällen können Proben bis zu etwa 100 mg in Zircaloy-Schraubkapseln ohne automatische Entladung bestrahlt werden. Die Probentemperatur liegt bei  $150^\circ\text{C}$ , die thermische Flußdichte bei etwa  $5 \cdot 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und die schnelle Flußdichte bei  $3 \cdot 10^{10} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

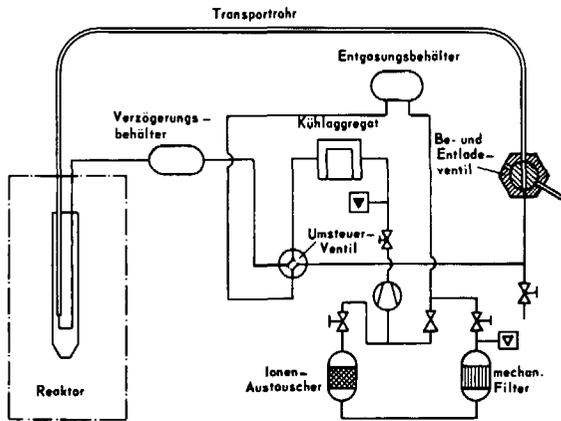


Abb. 3.10:  
Hydraulische Rohrpost BE 20  
zum Bestrahlen von (bis zu 5°C) gekühlten Proben  
bei hohem Neutronenfluß

Die **Hydraulische Rohrpost BE 20**: Bei medizinischen Untersuchungen kann man in der Diagnostik anstelle von Radioisotopen mit stabilen Isotopen arbeiten, wenn man die dem Patienten entnommenen Flüssigkeiten nachträglich aktivieren kann. Auf diese Weise läßt sich eine radioaktive Belastung des Patienten völlig vermeiden. Voraussetzung für dieses Verfahren ist die Möglichkeit, sehr niedrige Bestrahlungstemperaturen einzuhalten. Es zeigte sich, daß dies nur mit direkter Umspülung der umhüllten Probe von tiefgekühlter Flüssigkeit möglich ist. Es müssen ferner hohe thermische Flußdichten und kurze Transportzeiten zum Meßort möglich sein. Diesen Spezifikationen entsprechend wurde die hydraulische Rohrpost (Abb. 3.10) entwickelt. (L.12,13) Die Rohrpostbüchse nach Abb. 3.3 (zusätzlich mit Schlitzen versehen) wird hier bei der Bestrahlung von Wasser durchströmt, das mit einem Kühlaggregat auf 5°C vorgekühlt werden kann. Mit Polyäthylenbüchsen können bei einer thermischen Flußdichte von  $10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und einer schnellen Flußdichte von  $7 \cdot 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  Bestrahlungszeiten von einigen Sekunden bis zu einer Stunde, mit Polyphenylenoxid-Büchsen bis zu etwa 36 Stunden erreicht werden. Vor der Entladung aus dem Ventil werden die Büchsen durch Ausblasen von Kühlwasser befreit, so daß sie direkt in die Meßapparatur eingesetzt werden können.

### Verteilerstation BE 27

Die Bestrahlungsbüchsen werden mit Ausnahme der Proben, die im Isotopenlabor des FRJ-1 verarbeitet werden, in Blei-

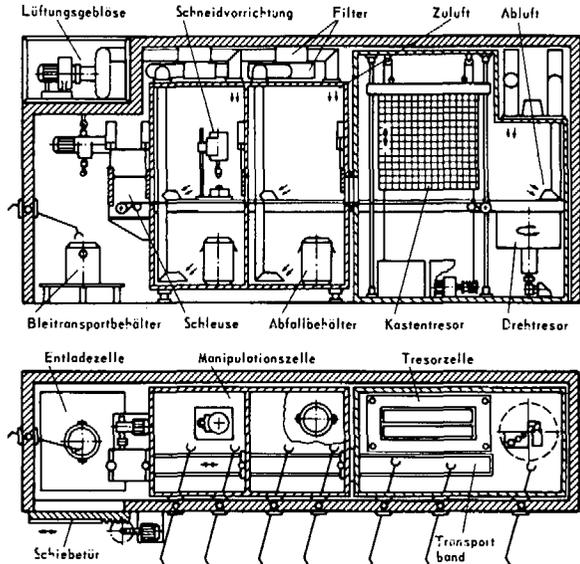


Abb. 3.11:  
Gasdichte und bleigeschirmte Zelle zum Aufarbeiten  
aktiver Proben

transportbehältern per Gabelstapler zur Verteilerstation im Keller des ZIR gebracht (Abb. 3.11). Die Station ist als gasdichte Zelle mit einer 10 cm dicken Bleiabschirmung ausgebildet und ist für die Verarbeitung von Aktivitäten bis zu 1 Curie Kobalt behördlich zugelassen. In dieser Zelle werden die Bestrahlungsbüchsen aus den Bleitransportbehältern entnommen, mit dem Transportband in die Manipulationszelle gefahren und dort mit Spezialwerkzeugen geöffnet. Die Bestrahlungskapseln werden von störenden Hüllen befreit und neu verpackt. Je nach Aktivität werden die neuen Gefäße in bleigefütterte Büchsen oder in Bleiversandbehälter eingesetzt. Die Bestrahlungsbüchsen werden im Kastentresor aufbewahrt, bis ihre Aktivität soweit abgeklungen ist, daß sie wieder verwendet werden können. Die Proben werden im Drehtresor gespeichert, bis sie vom Auftraggeber abgerufen werden.

### Bestrahlungsuntersuchungen

Die zweckmäßige Durchführung von Probenbestrahlungen fordert laufend Untersuchungen über die sich bei der Bestrahlung einstellenden Temperaturen, über die Verträglichkeit von Proben und Umhüllungen und über Bestrahlungseffekte, vor allem, wenn sie zur Gefährdung von Einrichtungen oder Personen führen können. Eine Reihe von Effekten lassen sich näherungsweise vorausberechnen. Im übrigen werden alle Bestrahlungserfahrungen in Listen verarbeitet, die bei der Zulassung von Proben in der Bestrahlungsprüfgruppe des Reaktorsicherheitsausschusses herangezogen werden. In strittigen Fällen wird eine Entscheidung des Reaktorsicherheitsausschusses herbeigeführt.

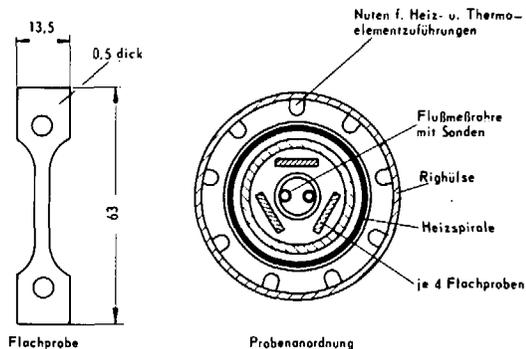


Abb. 3.12:  
Schnitt durch einen Probenträger eines  
Stahlbestrahlungsrigs LV 27

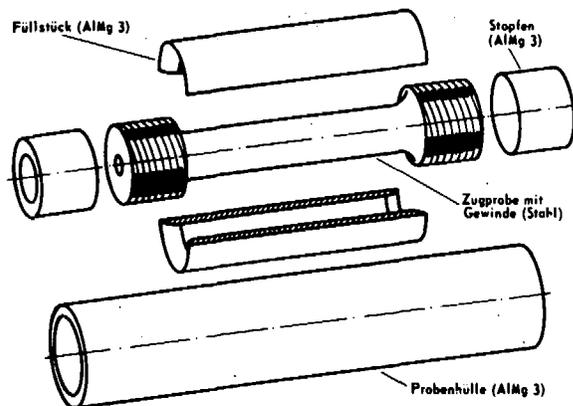


Abb. 3.13:  
Einfassung der Normzugprobe zur besseren  
Wärmeableitung

### Materialbestrahlungen

Materialbestrahlungen werden meist zum Testen von Strukturmaterialien für Leistungsreaktoren eingesetzt. Ziel ist es

für gewöhnlich, das Ausmaß von Strahlenschäden zu bestimmen, die diese Materialien bei ihrem späteren Einsatz erfahren. Da Strahlenschäden vor allem durch schnelle Neutronen erzeugt werden und die Testzeit gegenüber der späteren

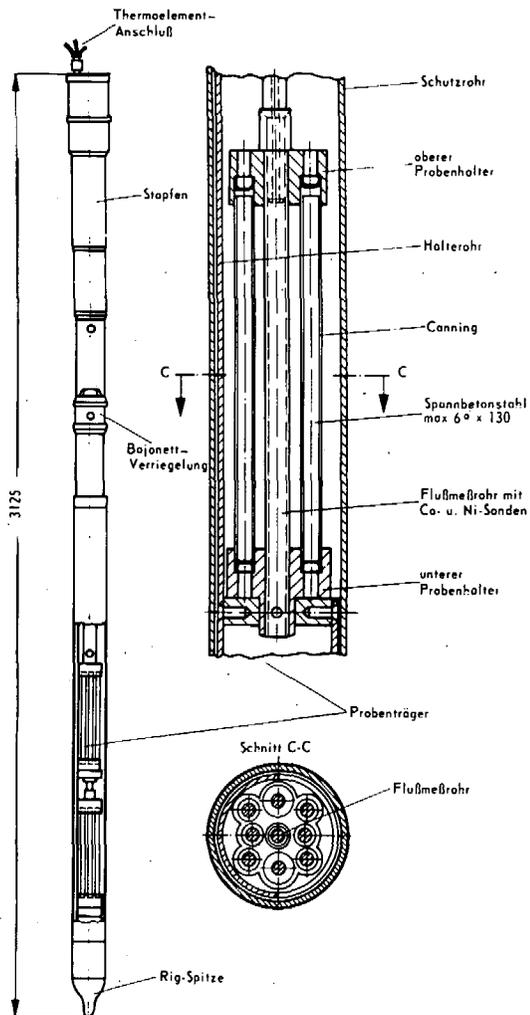


Abb. 3.14:  
Poolwassergekühltes Kapselrig BE 21 für Baustähle und  
Probenbestrahlung in Brennelementen und am Kernrand

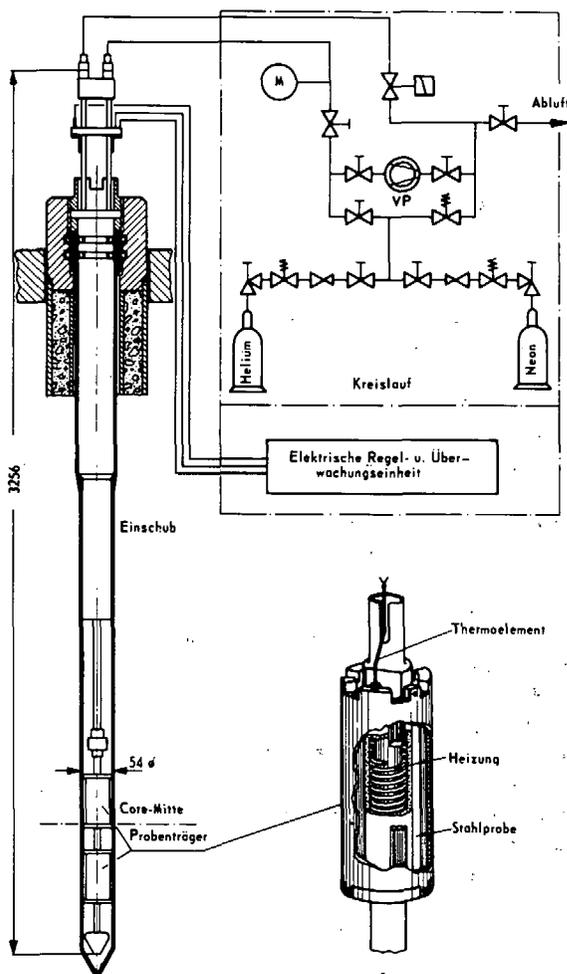


Abb. 3.15:  
Instrumentiertes Stahlbestrahlungsrig BE 9.3  
mit Kreislaufschema

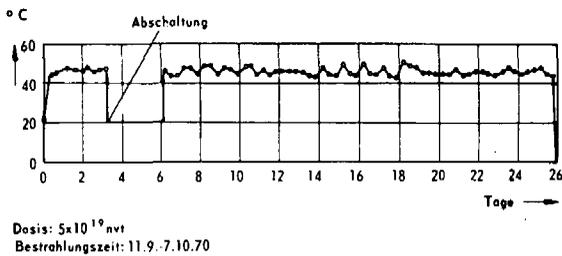


Abb. 3.16:  
Zeitlicher Temperaturverlauf in einer bestrahlten  
Stahlprobe BE 21

Lebensdauer erheblich verkürzt werden muß, verlangen solche Bestrahlungen eine hohe schnelle Flußdichte. Am FRJ-2 Jülich erhält man sie, indem man die Bestrahlung im Innern eines Mark-IV-Brenn-Elements durchführt, so daß die Proben möglichst dicht vom Brennstoff umgeben sind. Da Strahlenschäden im Gleichgewicht stark von der Temperatur abhängen, muß die Bestrahlungstemperatur in engen Grenzen konstant gehalten werden. Die Reaktoreinschübe (L.14,15) werden deshalb mit Thermoelementen bestückt und mit einer Temperaturregelung durch variable Kühlung oder Heizung ausgestattet. Man nennt den entsprechenden Reaktoreinschub „Instrumentierte Kapsel“ oder nach englischem Vorbild „Rig“. Mit den Materialproben zusammen werden Nickelsonden bestrahlt, mit denen man die schnelle Fluenz bestimmt, der die Probe ausgesetzt war.

Im **Stahlbestrahlungsprogramm** des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute wurden in großem Umfang Stahlproben im FRJ-2 bestrahlt: flache Zugproben (L.16) (Abb.3.12) und runde Zugproben (L.17) (Abb. 3.13), Baustahlproben mit größerer Ausdehnung und Proben mit quadratischem Querschnitt für Kerbschlaguntersuchungen. Um definierte Bestrahlungsbedingungen zu erhalten, müssen die Proben möglichst ohne Gaspalt in Metall eingepackt werden. Flachproben werden zu Paketen zusammengefaßt (Abb. 3.12), Rundproben erhalten sorgfältig angepaßte Halbschalen (Abb. 3.13). Baustahlproben, die bei niedriger Temperatur bestrahlt werden sollen, werden gekapselt und in einer Halterung gefaßt (Abb. 3.14) in Rigs bestrahlt (L.18), die vom Kühlwasser durchströmt sind.

Für die Bestrahlung von Stahlproben bei Temperaturen zwischen 200 °C und 650 °C werden Rigs der Firma Vickers-Armstrong benutzt (Abb. 3.15). Diese Rigs und ihre Instrumentierung wurden vom ZIR an die hohen Anforderungen des VDEh-Programms angepaßt. Sie enthalten 2 Kapseln zur Aufnahme von je 12 Stahlproben. Die Temperatur wird durch eine elektrische Heizung eingestellt. Die Wärme wird über einen äußeren Gaspalt mit Helium-Neon-Gasgemisch geführt, der so bemessen ist, daß die nukleare und die regelbare elektrische Aufheizung zusammen die geforderte Temperatur auf wenige Grad Celsius genau ergeben, unabhängig von den Schwankungen der nuklearen Aufheizung. Die Grobeinstellung erfolgt durch Änderung des Mischverhältnisses Helium - Neon (s.S. 42).

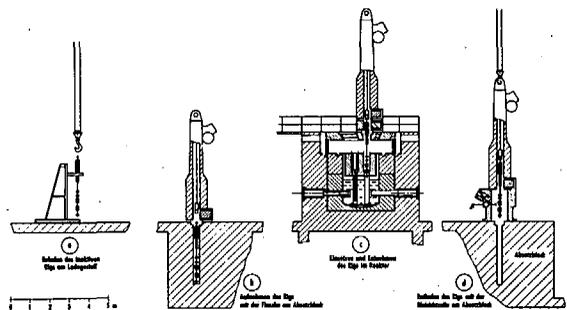


Abb. 3.17:  
Auswechselforgänge bei der Rigbestrahlung von Stahlproben

In einem Kapselrig für **Spannbetonstähle** (Abb. 3.14) wird eine Bestrahlungstemperatur von 70 °C verlangt. Hierzu wird ein Gleichgewicht zwischen nuklearer Aufheizung und der Wasserkühlung eingestellt. Abb. 3.16 zeigt den Temperaturverlauf während einer Bestrahlungsdauer von 26 Tagen mit einer dazwischenliegenden Reaktorabschaltung.

### Auswechselforgänge

Abb. 3.17 zeigt die Auswechselforgänge, wie sie bei der Stahlbestrahlung durchgeführt werden müssen. (L.19) Zunächst wird das inaktive Rig mit den Stahlproben in einem Ladegestell beladen. Das Rig kommt dann in den Absetzblock und wird aus diesem in eine Vertikalfflasche hineingezogen (b). Die Vertikalfflasche wird auf die Topplatte des Reaktors aufgesetzt und das Rig in ein Mark-IV-Brenn-Element des Reaktors abgesenkt (c). Nach der Bestrahlung wird das hochaktive Rig wieder mit der Vertikalfflasche aus dem Reaktor entnommen. Die Flasche wird auf eine Bleisichtzelle über dem Absetzblock aufgesetzt. Nun wird das Rig so weit abgelassen, daß einer der Probenträger im Gesichtsfeld des Bleiglasfensters erscheint, und die Proben mit Greifern und Spezialwerkzeugen herausgestoßen werden können. Sie werden dann in einen Bleitransportbehälter ausgeschleust. Das Rig kann dann neu beladen werden.

### Experimentebetrieung

Um die Experimentatoren von der ständigen und sehr personaufwendigen Überwachung ihrer Experimente zu entlasten, wurde am Reaktor FRJ-2 eine Arbeitsgruppe Experimentebetrieung für Rig- und Loopexperimente mit durchgehendem Schichtbetrieb eingerichtet. Diese überwacht und wartet insbesondere die Einrichtungen für das VDEh-Stahlprogramm und die Kernbrennstoffbestrahlungsexperimente des Instituts für Reaktorwerkstoffe.

Die Wartung der Experimente umfaßt neben den routinemäßigen Arbeiten wie z.B. Kontrolle der Meßwerte und Entnahme von Analysenproben, auch das Anfahren und Abschalten der Experimente, das Eingreifen bei Störfällen, sowie Mithilfe bei der Erprobung und dem Ein- und Ausbau der Experimente.

Auf Grund der reichen Betriebserfahrungen und der Störfalldokumentation konnten wichtige Anregungen zur Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit der Reaktorexperimente gewonnen werden.

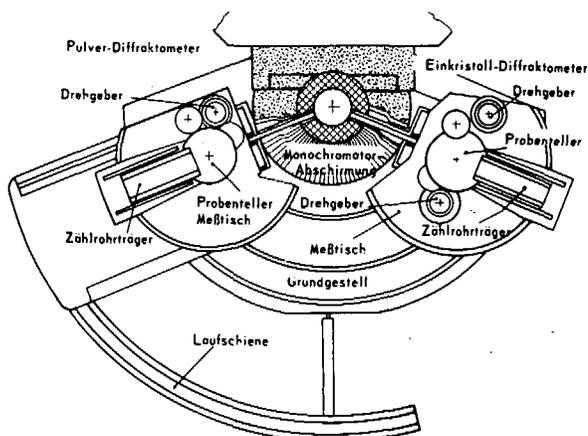


Abb. 3.18:  
Neutronen-Doppeldiffraktometer SV 7  
des Mineralogischen Instituts der Universität Bonn  
(Grundriß)

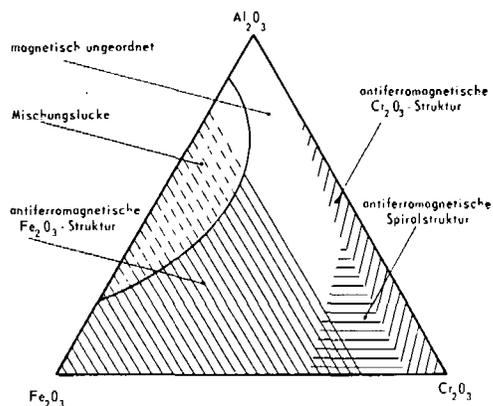


Abb. 3.20:  
Projektion des magnetischen Phasendiagramms  
des ternären Mischkristallsystems  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$   
auf die Konzentrationsebene

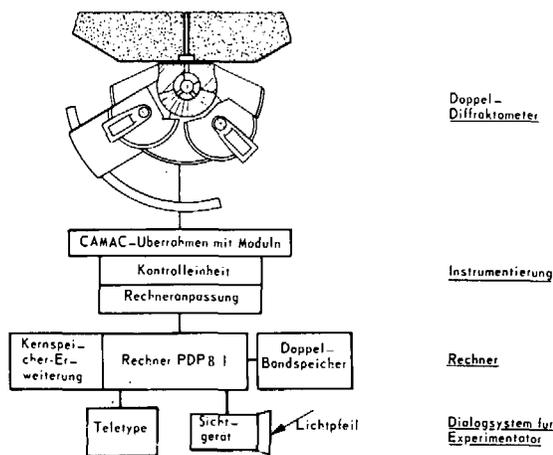


Abb. 3.19:  
Blockschaltbild der Rechnersteuerung des  
Neutronen-Doppeldiffraktometers SV 7

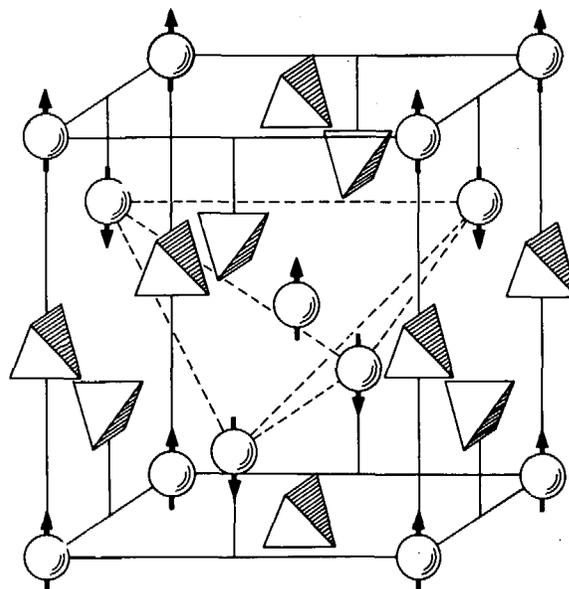


Abb. 3.21:  
Kristallstruktur und antiferromagnetische Struktur von  
Dysprosiumphosphat  $\text{DyPO}_4$  bei 1,9 Kelvin.  
(Dysprosium-Atome: Kugeln, Sauerstoff-Atome an den Ecken  
der Tetraeder, Phosphor-Atome im Zentrum der Tetraeder.  
Die Pfeile geben die Richtung der  
magnetischen Momente der Dy-Atome an.)

### Strukturuntersuchungen mit dem Neutronendiffraktometer SV 7

Neben einigen Strahlrohruntersuchungen über Filter und Strahlenfänger wurden vom ZIR Inpilateil, Abschirmung und Sicherheitsinstrumentierung der Diffraktometer am FRJ-2 entwickelt. Aus den Erfahrungen mit diesen Anlagen ergab sich eine Zusammenarbeit des Mineralogischen Instituts der Universität Bonn mit dem ZIR auch in bezug auf die Nutzung des Doppeldiffraktometers SV 7. Abb. 3.18(L.20) zeigt die Anlage, mit der an einem Strahlrohr des FRJ-2 gleichzeitig Messungen an Kristallpulvern und an Einkristal-

len möglich sind. Da Untersuchungen dieser Art wegen der langen Meßzeiten sich wirtschaftlich nur noch mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung durchführen lassen, wurde das Diffraktometer vom Zentrallabor für Elektronik in Zusammenarbeit mit der Bonner Gruppe und dem ZIR unter Verwendung des Camac-Systems mit einem freiprogrammierbaren Rechner ausgerüstet (Abb. 3.19).

Beispiele für die wissenschaftlichen Ergebnisse zeigen die Abb. 3.20(L.21) und 3.21(L.22).

### Literaturverzeichnis zu Kapitel 3

- (L.1) Marth, W.: Bestrahlungstechnik an Forschungsreaktoren, Thieme-Taschenbuch, Bd. 13, München, 1969
- (L.2) Sicherheitsvorschriften für den Betrieb der Reaktoren FRJ-1 und FRJ-2 mit Experimenten, Jülich, April 1964
- (L.3) Sicherheitsbericht BE 22
- (L.4) Sicherheitsbericht BE 3
- (L.5) Sicherheitsbericht BE 1
- (L.6) Sicherheitsbericht BE 25
- (L.7) Sicherheitsbericht LV 16A
- (L.8) Sicherheitsbericht BE 26
- (L.9) Sicherheitsbericht BE 4
- (L.10) Sicherheitsbericht BE 12
- (L.11) Sicherheitsbericht BE 11
- (L.12) Sicherheitsbericht BE 20
- (L.13) Stechemesser, H.; Sachse, K.: Kerntechnik 12 (1970) 449
- (L.14) Sicherheitsbericht BE 9
- (L.15) Sicherheitsbericht LV 27
- (L.16) Arbeitsberichte LV 27, Britz, L.; Pachur, D.
- (L.17) Arbeitsbericht BE 9, Küpper, H.
- (L.18) Sicherheitsbericht BE 21
- (L.19) Pachur, D.: Kerntechnik 6 (1964) H.11, S.515
- (L.20) Jumpertz, E.A.; Scharenberg, W.; Stechemesser, H.; Althaus, U.: JÜL-500-RX, Aug. 1967
- (L.21) Scharenberg, W.: JÜL-611-RX, Juli 1969
- (L.22) Scharenberg, W.; Will, G.: Intern. J. Magnetism. 1 (1971) 277

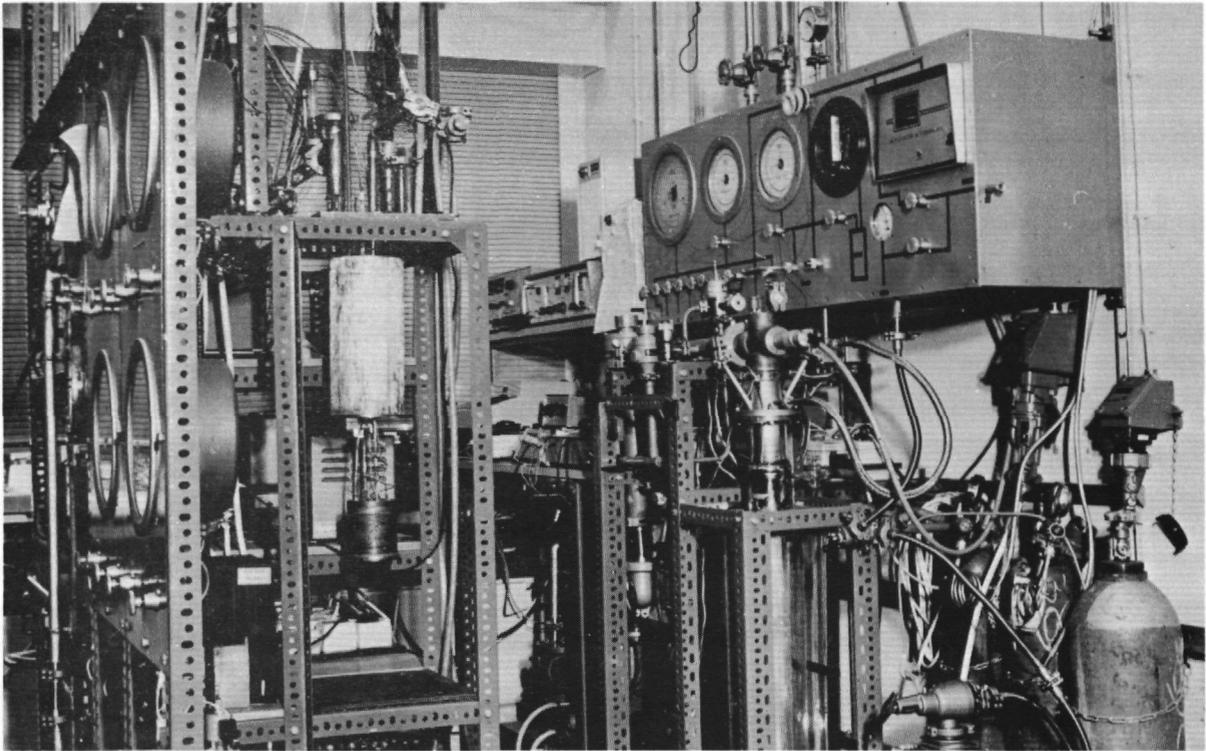


Abb. 4.0: Tieftemperatur-Eichlabor mit Metall-Kryostat (links) und Bad-Kryostat (rechts)

## 4. Kreisläufe, hohe und tiefe Temperaturen

### Wärme- und strömungstechnische Auslegung von Reaktorexperimenten (L.14)

Bei vielen Experimenten müssen bestimmte Zustandsbedingungen eingehalten werden z.B. Temperatur, Druck, Durchfluß, chemische Zusammensetzung, Reinheit. Dies geschieht, indem man Flüssigkeiten oder Gase in Kreisläufen umwälzt, in denen Heiz- oder Kühlelemente, Kompressoren, Vakuumpumpen, Düsen, Diffusoren, Filter, Ventile, Meßfühler usw. eingesetzt sind. Die Komponenten dieser Kreisläufe sollen so ausgelegt sein, daß sich die geforderten Zustandsbedingungen möglichst genau ergeben. Dazu ist eine wärme- und strömungstechnische Auslegung erforderlich, mit denen man die Temperatur- und Druckprofile sowohl quer durch die einzelnen Komponenten als auch längs des gesamten Kreislaufs erhält. (L.1,2,3)

Abb. 4.1 zeigt als Beispiel **radiale Profile** durch ein Hochtemperatur-Brennstoffrig. Sie ergeben sich aus einem elektrischen Ersatzschaltbild der Wärmequellen, der Wärmewiderstände (Strahlung, Leitung und Konvektion) und der Wärmekapazitäten und liefern für jede geforderte Bestrahlungstemperatur zwischen 500 °C und 1800 °C Brennstoffbelastung und Geometrie in Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung (He, N<sub>2</sub>) im äußeren Ringspalt.

Bei der **Kalten Neutronenquelle** (L.4) mußte aus Sicherheits-

gründen die Verflüssigung von Wasserstoff innerhalb eines Strahlrohrs mit kaltem He erfolgen. Die Berechnungen zeigten, daß dies in Kernnähe wegen der nuklearen Aufheizung des Wärmeaustauschers nicht möglich ist. Pumpen sind nicht einsetzbar. Mit Hilfe eines **Thermosiphonsystems** (Abb. 4.2) wurde das Problem gelöst. Abb. 4.3 zeigt, wie man die **Stützen** eines solchen Systems in bezug auf minimalen Kälteverlust optimiert.

Die **Verdampfung flüssiger Systeme** im Strahlenfeld folgt einem anderen Mechanismus als die Verdampfung, bei der die Energie von einer beheizten Wand übergeht, da mit der Verminderung der Masse auch die zugeführte Wärmeleistung abnimmt (Abb. 4.4).

Für die **Leistungserhöhung des FRJ-2** war die **Kühlung der Strahlrohreinsätze** durch das Reaktorwasser über den He-gefüllten Ringspalt nachzurechnen. Abb. 4.5 zeigt die Verteilung der Wärmequelleneigigkeit und die aus dem Wärmeübergang durch Strahlung, radiale und axiale Wärmeleitung resultierende Verteilung der Temperatur.

Die **Temperaturregelung** von Bestrahlungsrigs hängt außer von der Gaszusammensetzung im Regelgasspalt auch von der Spaltweite ab und damit von der thermischen Wärmeausdehnung der spaltbegrenzenden Materialien. Abb. 4.6 zeigt die Änderung der Spaltweite eines Niob-Edelstahlsystems mit der Temperatur.

## Verfahren zur Berechnung von Temperaturfeldern in Reaktoren

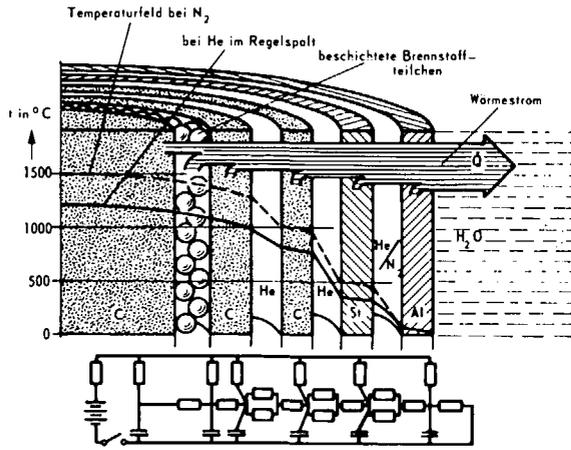


Abb. 4.1: Radiales Temperaturfeld in einer Hochtemperatur-Bestrahlungseinrichtung für beschichtete Teilchen. Das Ersatzschaltbild (unten) dient als Rechenmodell

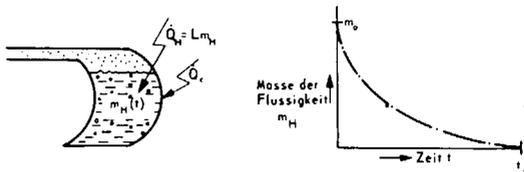


Abb. 4.4: Verdampfen einer nuklear beheizten Flüssigkeit.  $\dot{Q}_H$  in der Flüssigkeit absorbierte Wärmeleistung;  $\dot{Q}_C$  von der Gefäßwand eindringende Wärmeleistung

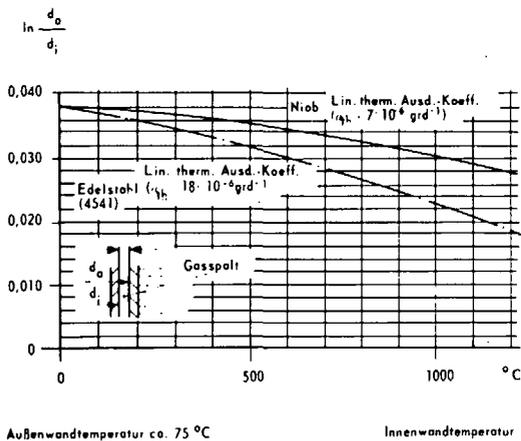


Abb. 4.6: Änderung der Weite eines gasgefüllten Ringspaltes als Funktion der linearen thermischen Ausdehnung des Innenkörpers und der Innenwandtemperatur

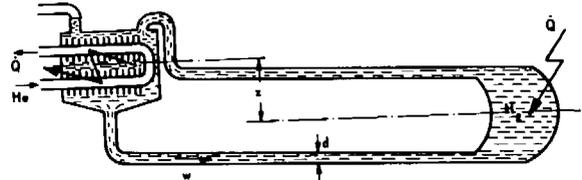
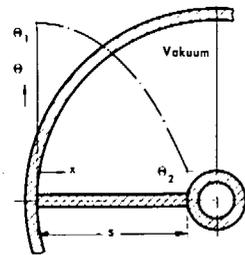
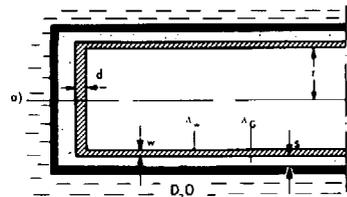


Abb. 4.2: Thermosiphon der Kalten Neutronenquelle (schematisch)

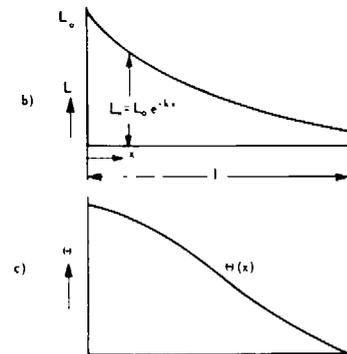


Durch eine Zentrierstütze einer im Wärmequellenfeld befindlichen Tieftemperaturleitung dringt ein minimaler Wärmestrom ein, wenn die Stützenlänge  $s$  so gewählt wird, daß der Temperaturgradient auf der Raumtemperaturseite gleich Null wird.

Abb. 4.3: Zur Längenoptimierung des Befestigungsstegs einer Tieftemperatureinrichtung im Reaktorstrahlenfeld



Querschnitt eines Reaktorbestrahlungskanals mit Fingerhutrohr (schraffiert)



Verteilung der Wärmequellenergieigkeit

Typischer Temperaturverlauf im Fingerhutrohr

Abb. 4.5: Temperaturfeld im Fingerhutrohr eines Strahlrohrs

## Thermometrie

Für die Temperaturmessungen werden fast durchweg Thermoelemente eingesetzt. Die zu erfassenden Temperaturbereiche erstrecken sich von wenigen Kelvin bis zu über 3000 K. In allen diesen Bereichen müssen Kalibrierungen durchgeführt werden. Für Aufträge von anderen Instituten der KFA werden teilweise sehr hohe absolute Genauigkeiten verlangt, die sich nur an international festgelegten Fixpunkten realisieren lassen. Der Eichstand für relative Messungen (Abb. 4.7) umfaßt den Bereich 0 °C bis 1000 °C. Die Temperaturen werden bis 250 °C mit Wasser- und Ölthermostaten, von 250 °C bis 1000 °C durch Öfen mit Metallblockeinschüben und Schutzgasfüllungen erzeugt. Nach den Empfehlungen der internationalen praktischen Temperaturskala erfolgt der Vergleich bis 630 °C mit einem Platinwiderstandselement, darüber mit einem Pt/Pt-Rh-Thermoelement mit digitaler Spannungsmessung. Die erreichbaren Genauigkeiten

betragen bis 250 °C: 0,1 °C, bis 600 °C: 2 °C und darüber 4 °C. Die Aufnahme einer Eichkurve (20 Meßpunkte) erfordert etwa 30 Stunden.

Im Eichstand für **Absolutmessungen** (Abb. 4.8) werden als Temperaturfixpunkte der Tripelpunkt des Wassers und die Erstarrungspunkte der Metalle Zinn, Zink, Antimon und Silber verwendet. Die Metalle werden zunächst etwas über ihren Schmelzpunkt aufgeheizt und durch einen elektronischen Regler auf konstanter Temperatur gehalten. Dann wird mit einem Programmgeber ein zeitlich linearer Temperaturabfall in der Schmelze erzeugt, bis sich durch die bei Erstarrung freiwerdenden Schmelzwärmen ein Plateau ausbildet (Abb. 4.9). Es wird mit einem Pt/Pt-Rh-Thermoelement oder einem Widerstandsfühler ausgemessen. Beim Zn-Punkt ergab sich eine Reproduzierbarkeit von besser als  $2 \cdot 10^{-3}$  °C (Abb. 4.10).

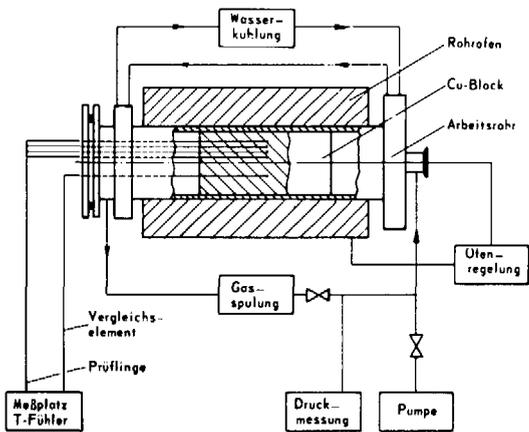


Abb. 4.7:  
Relativ-Temperatur-Prüfstand

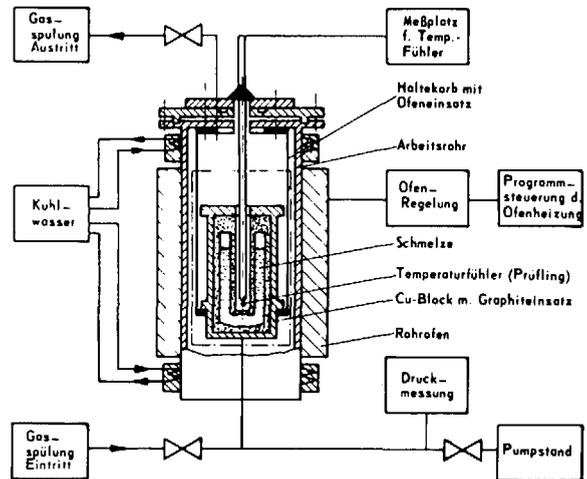


Abb. 4.8:  
Absolut-Temperaturprüfstand

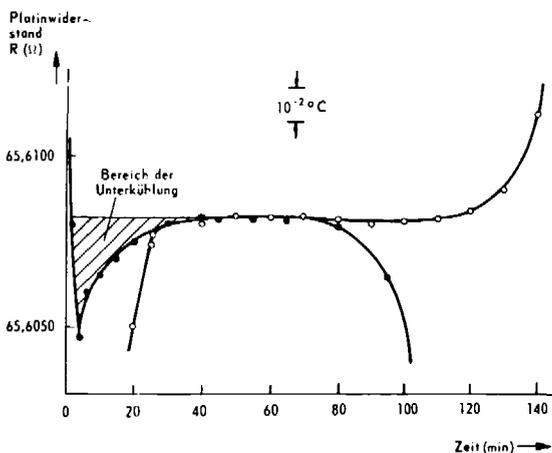


Abb. 4.9:  
Schmelz- und Erstarrungskurve von Zn

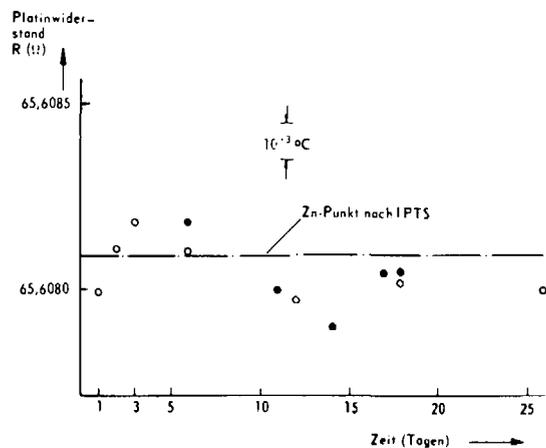


Abb. 4.10:  
Absolutbeträge ausgemessener Zn-Plateaus  
(Kreise: Erstarrungsplateaus, Punkte: Schmelzplateaus)

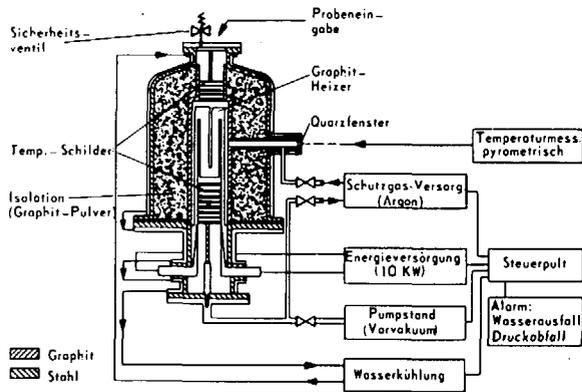


Abb. 4.11: Schema des Graphit-Hochtemperaturprüfstandes für Temperaturen bis 3000 K

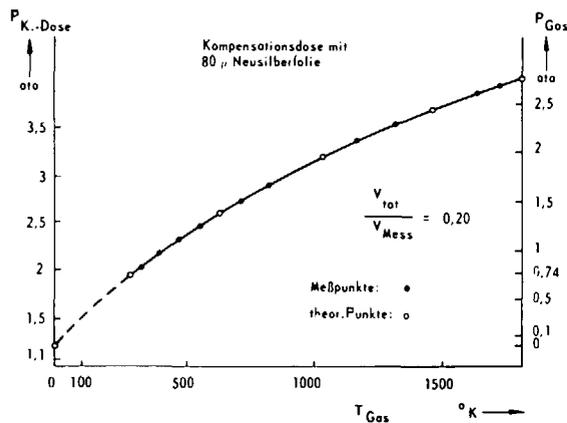


Abb. 4.13: Eichkurve eines Gasthermometers mit einer 80  $\mu$ -Neusilber Kompensationsdose, dargestellt sind die Drücke des Meßsystems ( $P_K$ -Dose) und des Gases ( $P_{Gas}$ ) in Abhängigkeit der Temperatur des Gasthermometers ( $T_{Gas}$ )

Der Hochtemperaturprüfstand (Abb. 4.11) enthält Öfen der Firma Spembley, die mit Heizelementen aus Wolfram bzw. Graphit von je 10 kW Leistung bestückt sind. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem Mikropyrometer. Es lassen sich

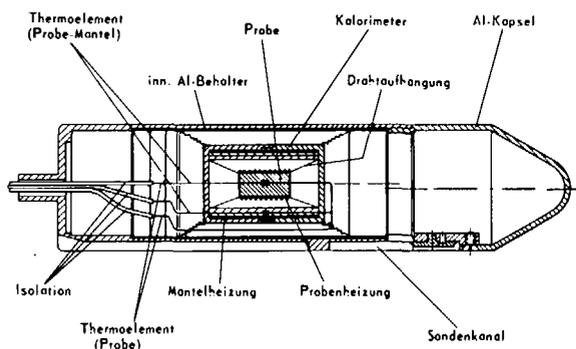


Abb. 4.14: Reaktoreinschub zur Messung von nuklearen Aufheizraten im Reaktor FRJ-2

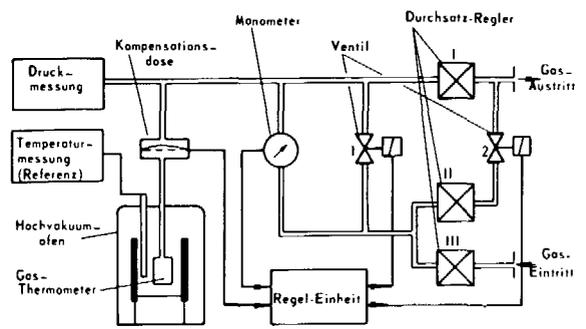


Abb. 4.12: Prinzipschema des Meßplatzes für Gasthermometer

unter Vakuum Temperaturen bis zu 2500 K, in Schutzgas bis zu 3000 K erreichen.

Außer den Prüfständen wurden für Mantelthermoelemente ein Prüfprogramm für Zuverlässigkeitsgrößen und die entsprechenden Prüfvorrichtungen entwickelt.

Gasthermometer für Inpile-Messungen können an Stelle von Hochtemperaturthermoelementen eingesetzt werden. Abb. 4.12 zeigt eine derartige Anordnung. Hierbei wird die Änderung des Gasdruckes eines abgeschlossenen Systems zur Messung der Temperatur ausgenutzt. Die Messung des Druckes erfolgt nach einem Kompensationsverfahren. Abb. 4.13 zeigt die Eichkurve für einen speziellen Meßfühler, sein Durchmesser beträgt 6 mm und seine Länge 40 mm.

### Kalorimetrie

Zur Berechnung der nuklearen Aufheizung in Reaktoreinschüben des FRJ-2 wurden die Aufheizraten in Magnesium, Graphit und Polyäthylen mit dem adiabatischen Kalorimeter (Abb. 4.14) gemessen. Abb. 4.15 zeigt Meßwerte für verschiedene Vertikalabstände von der Kernmitte im Vergleich zum thermischen und epithermischen Fluß, (L.5)

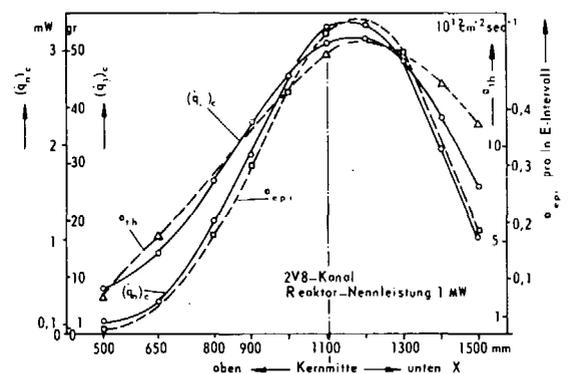


Abb. 4.15: Neutronenaufheizrate von Graphit ( $\dot{q}_{n,c}$ ) und Gammaaufheizrate von Graphit ( $\dot{q}_{\gamma,c}$ ), sowie der thermische Neutronenfluß ( $\phi_{th}$ ) und der epithermische Neutronenfluß ( $\phi_{epi}$ ) in Abhängigkeit des Bestrahlungsortes (x)

## Wärmeleitmessungen

Für die Hochtemperatur-Reaktorentwicklung ist die Wärmeleitfähigkeit von Coated-Particles-Schüttungen von großer Bedeutung. Sie wurde mit der Apparatur Abb. 4.16 für Temperaturen bis 1450 °C und einem Heliumdruck von 40 atü aus dem radialen Temperaturgefälle in einer zylindrischen Anordnung gemessen.<sup>(L.6)</sup> Messungen unter Reaktorbedingungen wurden in einem Rig (Abb. 4.17) durchgeführt. Hierbei konnte bei einer Wärmestrombelastung am äußeren Rand

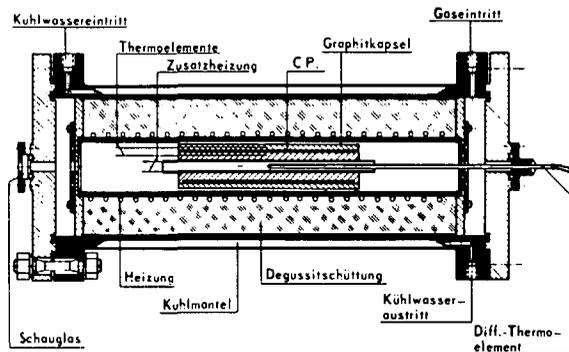


Abb. 4.16: Out of pile-Apparatur zur Messung des Wärmeleitkoeffizienten von Coated particles-Schüttungen

der Schüttung von maximal 108 W/cm<sup>2</sup> das Wärmeleitintegral bis 1800 °C bestimmt werden.

Die Wärmeleitung von Graphit als bestimmendem Strukturmaterial für Hochtemperaturreaktoren wurde mit einer modifizierten Kohlräusapparatur nach Abb. 4.18 zwischen 50 °C und 1000 °C in einer He-Atmosphäre von ca. 400 Torr gemessen. Gleichzeitig wurde die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Abb. 4.19 zeigt die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit infolge einer Reaktorbestrahlung.

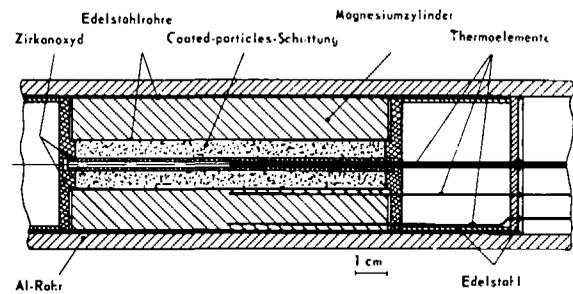


Abb. 4.17: Teilsicht des Reaktoreinschubs zur Messung des Wärmeleitintegrals einer Coated particles-Schüttung

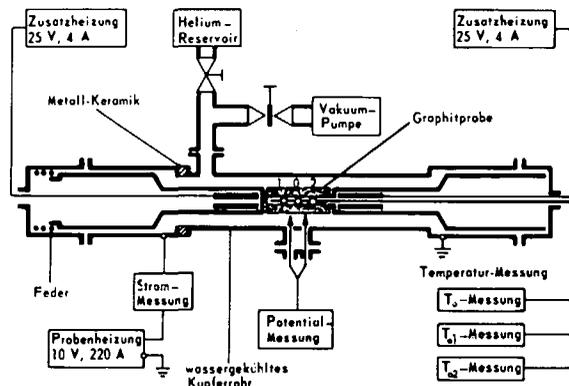


Abb. 4.18: Apparatur für Wärmeleitfähigkeitsmessungen an bestrahltem Graphit

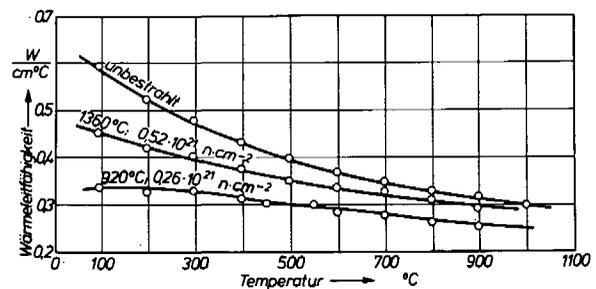


Abb. 4.19: Wärmeleitfähigkeit eines THTR-Brennelementgraphites vor und nach einer Neutronenbestrahlung bei 920 °C bzw. 1360 °C (Nickel 58-Fluenzwerte)

## Gaschromatographie und Feuchtemessungen

In Kreisläufen, besonders in den Spülkreisläufen von Brennstoffrigs spielt die Gasreinheit eine besonders große Rolle. Beimengungen unterhalb 1 ppm können sich schon sehr störend auswirken. Aus diesem Grund müssen die Gase eines Kreislaufs unter Betrieb laufend analysiert werden. Hierzu steht ein Gaschromatograph zur Verfügung, der auch zur Prüfung von Kühlfallen, Gasfiltern und Molekularsieben eingesetzt werden kann. An die Empfindlichkeit des Geräts werden dabei sehr hohe Anforderungen gestellt.

Die laufende Bestimmung von H<sub>2</sub>O erfolgt mit kommerziellen Feuchtefühlern. Sie müssen im ppm-Bereich laufend nachkalibriert werden. Dazu wurde die Apparatur Abb. 4.20 entwickelt, bei der definierte Gasfeuchten zwischen 0,5 und 23000 ppm in einem Thermostaten mit einer Einstellgenauigkeit von 0,1 °C im Bereich zwischen +20 und -85 °C erzeugt werden können. Abb. 4.21 zeigt die Eichung eines visuellen Hygrometers bis herab zu einer Temperatur von -70 °C.<sup>(L.7)</sup>

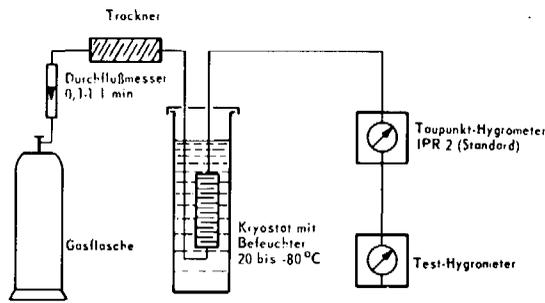


Abb. 4.20:  
Kalibriereinrichtung für Hygrometer

### Tiefemperatur-Eichstände

Entwicklung und Betrieb der Kalten Neutronenquelle, Probenkryostaten und Kühlfallen verlangen die Messung tiefer Temperaturen. (L.8,9,10) Sie erfordern entsprechende Eichstände. Diese werden auch sehr stark von Auftraggebern außerhalb des Instituts in Anspruch genommen.

Der Metallkryostat (Abb. 4.22) dient zur kontinuierlichen Eichung von Temperaturfühlern, wobei eine beliebige Temperatur zwischen 4 K und 300 K eingestellt und auf  $\pm 0,01$  K konstant gehalten werden kann. Die Temperaturmessung erfolgt oberhalb 90 K mit einem Platin-Widerstandsthermometer, unterhalb mit einem He-Gasthermometer und zur Kontrolle mit Dampfdruckthermometern. Der Meßblock kann gleichzeitig 3 Platinthermometer, 4 Ge-Thermometer und 12 Thermoelemente aufnehmen. Widerstände und Thermo-spannungen werden auf 0,01 % genau gemessen.

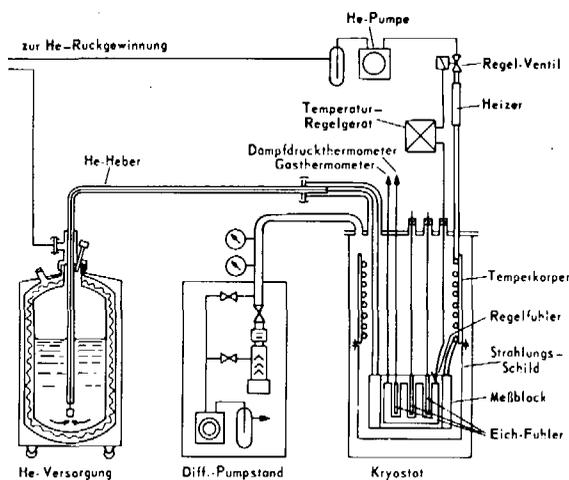


Abb. 4.22:  
Apparatur zur Kalibrierung von Tieftemperaturfühlern im Temperaturbereich von 4 K bis 300 K

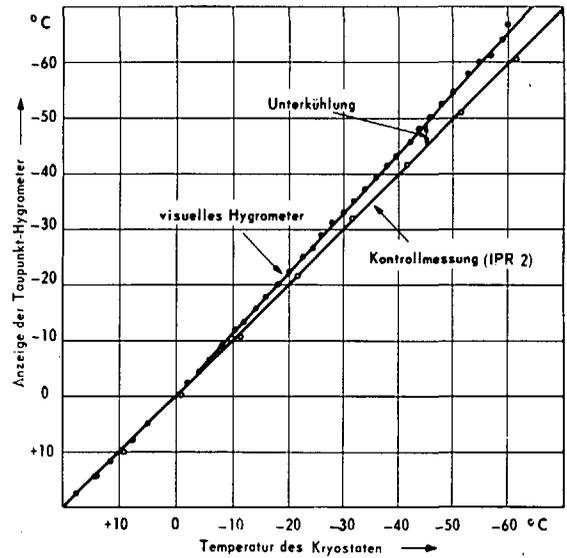


Abb. 4.21:  
Kalibrierkurve für ein visuelles Taupunkt-Hygrometer

Der Badkryostat (Abb. 4.23) dient zur Kalibrierung in den Siedebereichen von Argon, Stickstoff, Wasserstoff und Helium und reicht bis herab zu unterhalb 1,5 K. Zur Temperaturmessung dient ein geschlossenes Dampfdruckthermometer. Widerstände (maximal 9) und Spannungen von Thermo-elementen (maximal 10) werden wie beim Metallkryostaten gemessen.

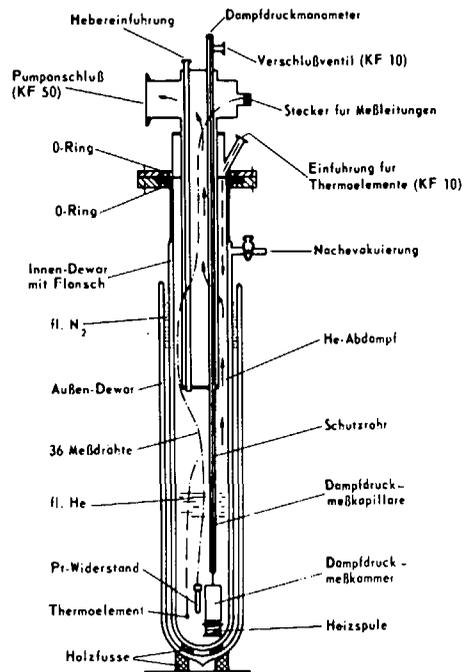


Abb. 4.23:  
Badkryostat zur Kalibrierung von Tieftemperaturfühlern (fl. He, fl. H<sub>2</sub>, fl. N<sub>2</sub>, fl. Ar)

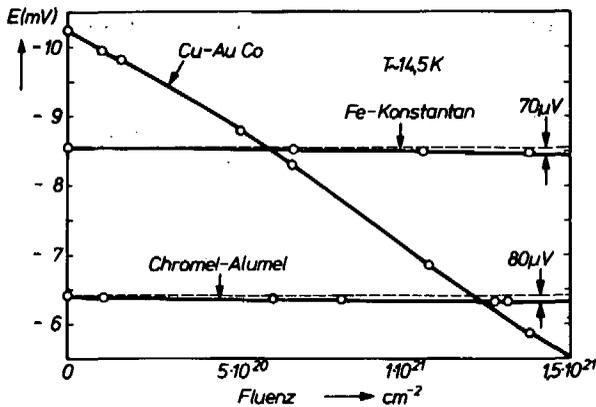


Abb. 4.24: Thermospannungen E einiger Thermoelemente bei 14,5 K als Funktion der thermischen Fluenz (Referenztemperatur 0 °C)

Die Beeinflussung von Thermoelementen<sup>(L.11,12)</sup> bei tiefen Temperaturen durch die Reaktorstrahlung wurde unter Ausnutzung der Kalten Quelle als Tieftemperaturbestrahlungsanlage untersucht. Abb. 4.24 zeigt den Einfluß der Fluenz auf verschiedene Thermopaare.

### Kälteanlagen

Die Arbeitsgruppe 'Kälteanlagen' des ZIR versorgt die Institute der KFA mit Flüssiggasen, betreibt die **Produktionseinrichtungen** und die **Kalte Neutronenquelle**. (L.13) Abb. 4.26 zeigt eine Übersicht über die Anlagen. Sie umfassen zwei Luftverflüssiger mit je 7 l/h, einen N<sub>2</sub>-Verflüssiger mit 27 l/h, die Helium-Kälteanlagen JÜL I mit der Kälteleistung von 2000 W bei 15 K (und 350 W bei 4,5 K) für die Kalte Neutronenquelle und JÜL II für die Bestrahlungskryostaten des Elektronenbeschleunigers im IFF bis 4,5 K und zur Helium-Verflüssigung für die KFA-Institute. Alle He-Anlagen sind an eine gemeinsame He-Rückgewinnungsanlage angeschlossen.

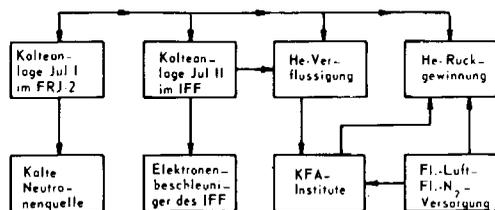


Abb. 4.26: Kältemittelversorgung für Großexperimente und KFA-Institute

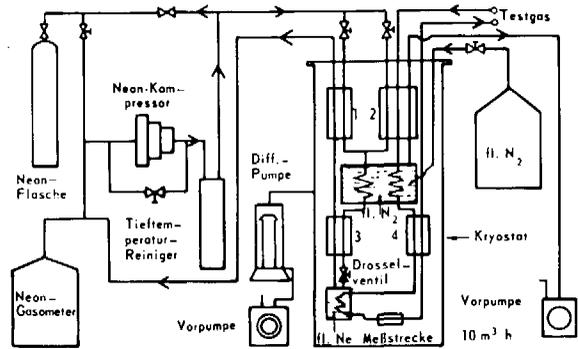


Abb. 4.25: Neon-Refrigerator mit Testkreislauf für thermodynamische Untersuchungen

Die Entwicklung eines Neon-Refrigerators erfolgte, um im Bereich von 27 K ein **Sicherheitskältemittel** zur Verfügung zu haben, da für die Benutzung von flüssigem Wasserstoff starke Beschränkungen gelten. Die Anlage Abb. 4.25 dient neben der Untersuchung der Betriebsbedingungen der Vorkühlung eines Testgas-Kreislaufs für thermodynamische Untersuchungen.

Abb. 4.27 zeigt die Aufteilung der Anlagen auf das Kompressorenhaus des ZIR, das Institut für Festkörperforschung und das Reaktorgebäude DIDO. Die Verbindungsleitungen sind auf Rohrbrücken verlegt und dienen gleichzeitig als Pufferbehälter.

Abb. 4.28 zeigt das Schema der Helium-Kälteanlage JÜL II. Der Kompressor-Turbinenkreislauf erzeugt über die Expansion des Heliums in den hochtourigen, ölgelagerten und ölgebremsten Turbinen 1 und 2 die Kälteleistung zur Vorkühlung des Heliums im Kompressor-Drosselkreislauf in den Wärme-

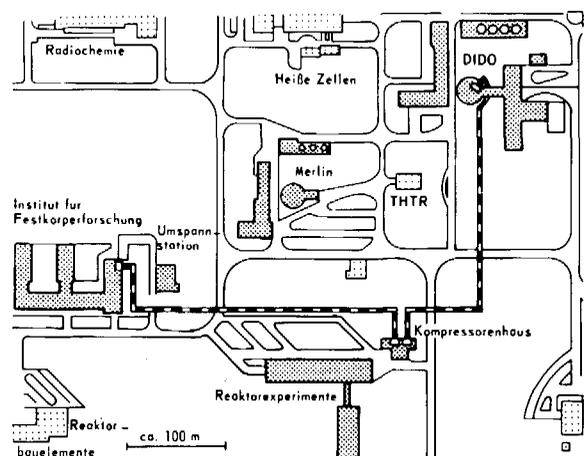


Abb. 4.27: Lageplan der He-Kälteanlagen

tauschern 3 und 4. Dieser liefert durch Entspannung in Drosselventilen das Flüssighelium mit einer Leistung von 200 W bei 4,5 K für den Bestrahlungskryostaten oder 35 l flüssiges Helium pro Stunde für die Flüssig-Helium-Versorgung der übrigen KFA-Verbraucher. Der Turbinenkreislauf kann alternativ über die Wärmetauscher 9 und 10 auch zur Verflüssigung von Parawasserstoff und Neon und in Verbindung mit

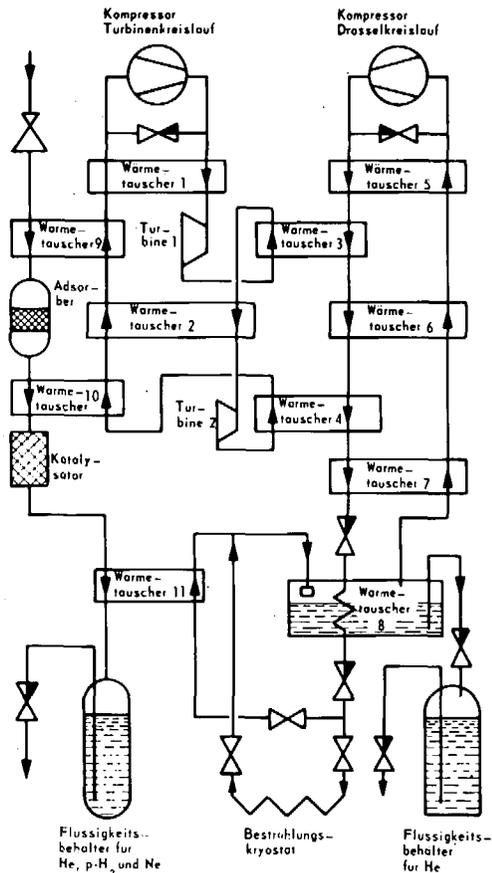


Abb. 4.28: Prinzipschema der Mehrzweckkälteanlage „Jülich II“

dem Wärmetauscher 11 von Helium mit einer Leistung von rd. 25 l Flüssiggas pro Stunde (Helium, Neon, Wasserstoff) herangezogen werden.

Die Abb. 4.29 und 4.30 zeigen die Entwicklung des Verbrauchs an Flüssiggasen in der KFA. Er wird bei fl. N<sub>2</sub> seit 1967 durch Zukauf gedeckt.

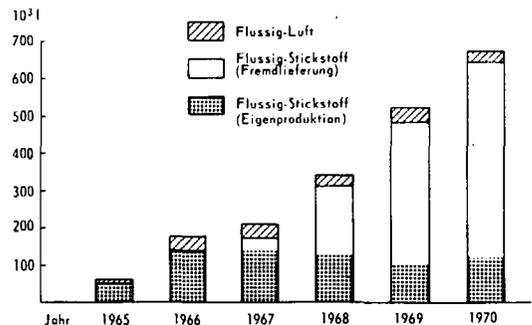


Abb. 4.29: Flüssig-Luft- und Stickstoffverbrauch in der KFA

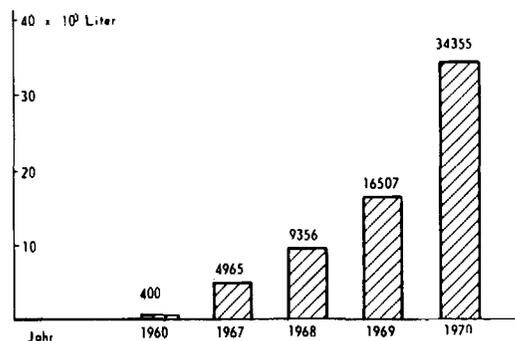


Abb. 4.30: Flüssig-Heliumverbrauch in der KFA

#### Literaturverzeichnis zu Kapitel 4

- (L.1) Stelzer, F.: Kerntechnik 10 (1968) 315
- (L.2) Stelzer, F.: Kerntechnik 10 (1968) 156
- (L.3) Stelzer, F.: Wärmeübertragung und Strömung: Thiemig-Taschenbuch Bd. 18, München 1971
- (L.4) Doose, C.; Preussner, A.; Stelzer, F.; Stillier, H.; Tholen, A.: Cryogenics 11 (1971) 107
- (L.5) Leyers, H.J.: Nukleonik 7 (1965) 300
- (L.6) Leyers, H.J.; Binkele, L.; Beuth, J.: JÜL-511-RX, Jan. 1968
- (L.7) Binkele, L.: angew. Phys. 30 (1970) 230

- (L.8) Koeppe, W.: Kältetechnik 22 (1970) H.1
- (L.9) Koeppe, W.: Kältetechnik 22 (1970) 14
- (L.10) Koeppe, W.: Proc. 2. Intern. Cryog. Eng. Conf. Brighton (1968) 213
- (L.11) Koeppe, W.: Proc. 3. Intern. Cryog. Eng. Conf. Berlin (1970) 220
- (L.12) Koeppe, W.; Leyers, H.J.: Kerntechnik (erscheint demnächst)
- (L.13) Doose, W.; Stillier, H.; Tholen, A.: Proc. 3. Intern. Cryog. Conf. Berlin (1970) 303
- (L.14) Stelzer, F.: JÜL-717-RX, Dez. 1970

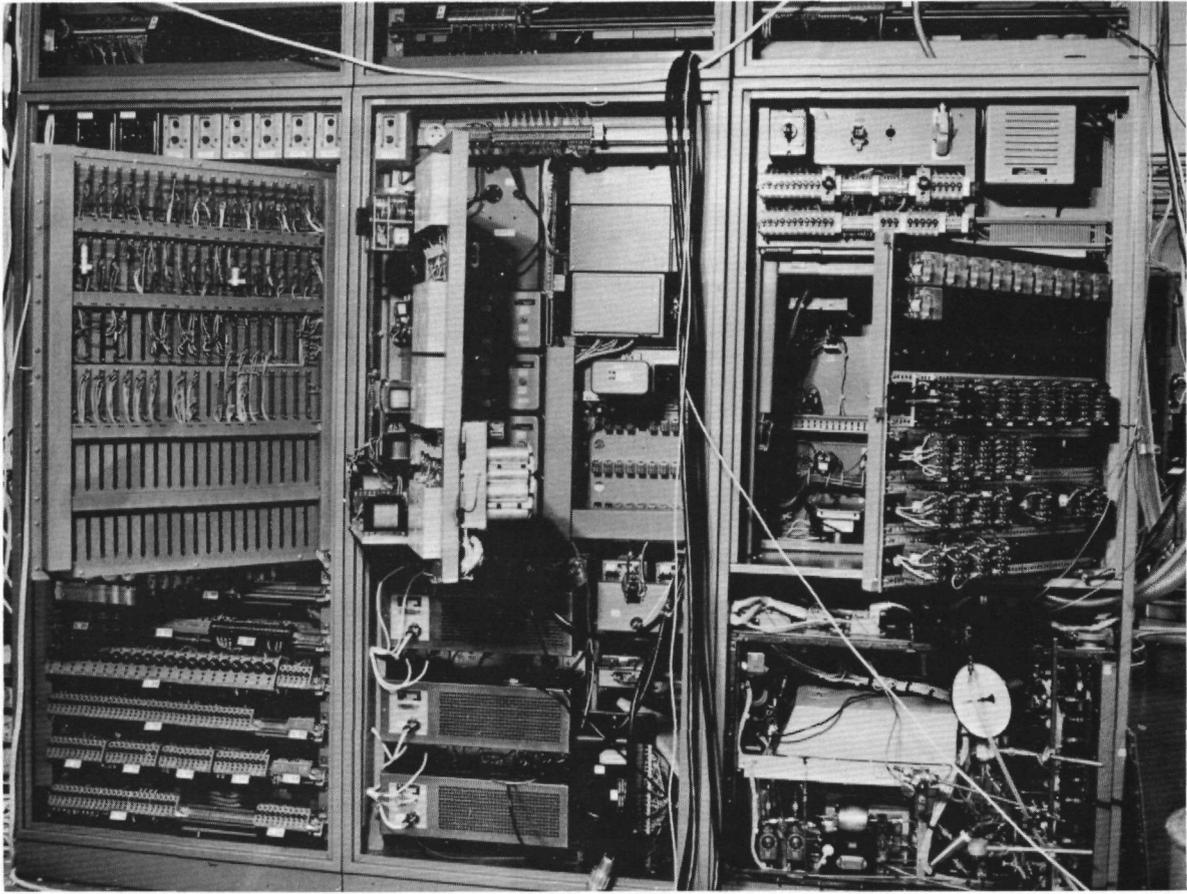


Abb. 5.0: Aufbau des Kontrollschrankes für das Experiment LV 32

## 5. Meß-, Steuer-, Regel- und Sicherheitssysteme

Jede moderne Versuchsanordnung muß instrumentiert werden, d.h., sie muß mit einem Signalsystem ausgestattet werden, das Informationen aus dem Physikalischen Raum über den Signalraum in den Informationsraum überträgt und umgekehrt Befehle aus dem Informationsraum in den Physikalischen Raum leitet. Es ermöglicht so das Steuern, Regeln, Messen und die Sicherung von Geräten und Personen. (L.1)

Diesen Aufgaben entsprechend läßt sich die Instrumentierung einer Versuchsanordnung nur in unmittelbarem Kontakt mit dem Projektgenieur entwickeln, der das Funktionsdia-

gramm und die Störfallanalyse der Anlage erstellt. Aus diesen Grundlagen und der genauen Kenntnis aller Komponenten leitet der Instrumentierungsingenieur sein Blockdiagramm ab.

Die Instrumentierungsgruppe des ZIR hat im Laufe der Zeit eine Methodik entwickelt, nach der diese Aufgabe planmäßig gelöst werden kann: Sie führt systematisch vom Übersichtsschaltplan, Geräteliste, Stromlaufplan, Einbauplan zum Verdrahtungsplan. Die entscheidende Phase liegt in der Aufstellung des Übersichtsschaltplans. Sie ist im folgenden am Beispiel einer Sicherheitsschaltung dargestellt. (L.2)

Störfall	Ursache	Auswirkung	Erkennung (Sicherheitsparameter)	Maßnahme
Temperatur des Stahlmantels zu hoch	zuviel N <sub>2</sub> im Gasspalt	Berstgefahr	Temperaturfühler 3T13	Reaktorwarnung, Heliumeinfüllung über Ventil 1MV1
Leck im äußeren Al-Behälter	undichte Schweißstelle oder Materialfehler	Verunreinigung des He-Kreises des Reaktors mit Regelgasgemisch	Leckfühler (über Temperatur) 3T16	Reaktorwarnung
Aktivitätsanstieg des Regelgases	Leck im Stahlmantel oder Aktivierung im Gasspalt	Kontamination	Monitor mit Szintillationsfühler 4X1	Reaktorwarnung, Schließen der Bestrahlungskapsel
Erschöpfung des He-Vorrates	Versäumnis, He-Flasche auszuwechseln	kann zu Temperaturanstieg führen	Druckfühler 1P1	Pultwarnung, He-Flasche auswechseln

Tabelle 1: Störfallanalyse

### Sicherheitssysteme

Die Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt aus der Störfallanalyse eines Brennstoff-Bestrahlungsexperimentes. Aus dieser Analyse ergibt sich einerseits, wie ein bestimmter Störfall erkannt wird, d.h., welche Meßfühler sein Eintreten in den Informationsraum signalisieren können, andererseits, welche Maßnahmen ergriffen werden müssen, um Gefahren aus diesem Störfall entgegenzuwirken, d.h., welche Stellglieder vom Informationsraum aus betätigt werden müssen.

Abb. 5.1 zeigt nun, wie diese Ergebnisse auf dem Übersichtsschaltplan übertragen werden. Der Übersichtlichkeit halber wird dabei die Schleife Physikalischer Raum → Informationsraum → Physikalischer Raum zu einem Kanal auseinandergelassen, der sich vom Meßfühler bis zum Stellglied erstreckt. Auf diese Weise lassen sich auch die Verknüpfungen zwischen verschiedenen Kanälen einzeichnen, die der Erhöhung der Zuverlässigkeit dienen.

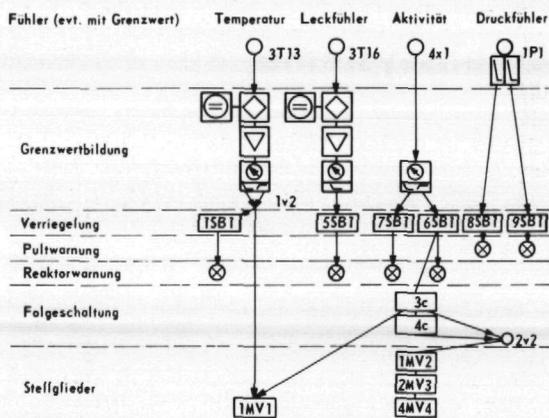


Abb. 5.1: Übersichtsschaltplan der Sicherheitsschaltung

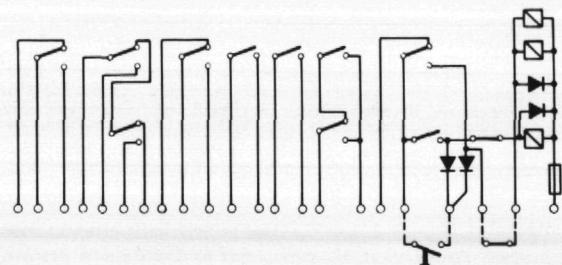


Abb. 5.2: Signalbaustein SB I der Sicherheitsschaltung

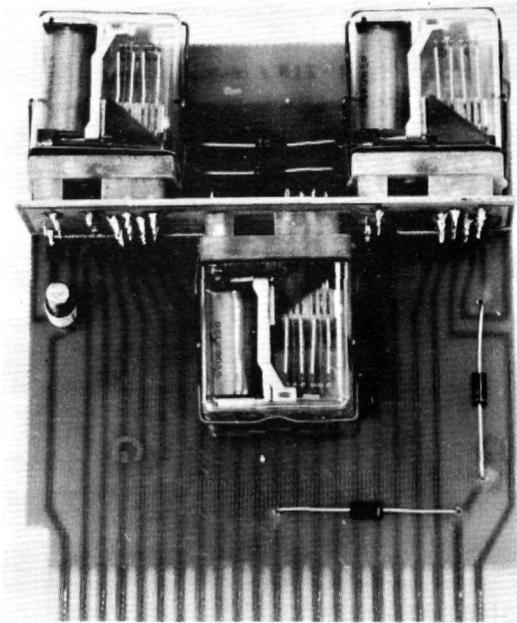


Abb. 5.3:  
Signalbaustein SB I der Sicherheitsschaltung

Abb. 5.3 und 5.2 zeigen den Sicherheitsbaustein SB I und sein Schaltschema, der einen von einem kommerziellen Gerät gebildeten Grenzwert annimmt, ihn bis zu Rückstellung festhält und zur Folgeschaltung und zum Signallampenfeld weiterleitet. Drei dieser Bausteine ergeben mit dem Baustein SB II zusammen eine 2 von 3-Schaltung, die für Reaktoreingriffe vorgeschrieben ist. Diese Sicherheitsbausteine wurden

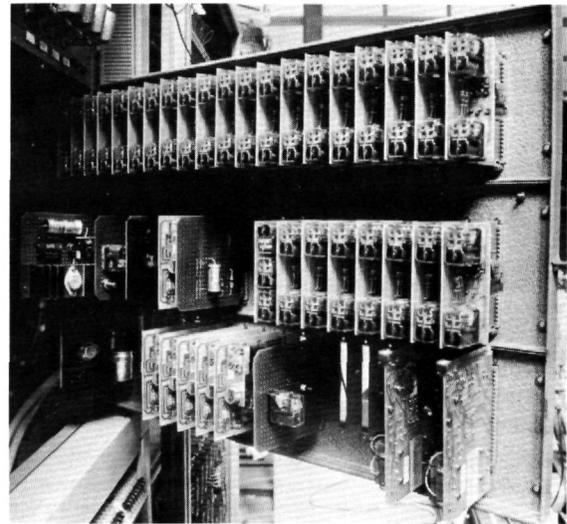


Abb. 5.4:  
Die Sicherheitsschaltung eines Experimentes

vom ZIR entwickelt, und in größeren Stückzahlen von Industriefirmen gefertigt.

Die Bausteine werden in einem Geräteschrank zum Sicherheitssystem (Abb. 5.4) zusammengefaßt. Auf der Frontplatte ist das Signalfeld dieses Systems angeordnet, das Auskunft über das Eintreten von Störfällen und die erfolgten Schaltmaßnahmen gibt (Abb. 5.5).



Abb. 5.5: Das Signalfeld der Sicherheitsschaltung

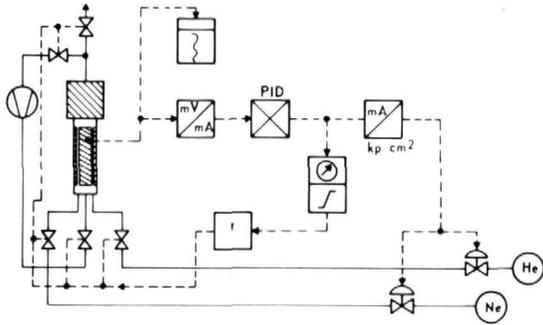


Abb. 5.6:  
Temperaturregelung von Brennstoffen  
mittels Veränderung der Wärmeleitfähigkeit eines  
He-Ne-Gemisches

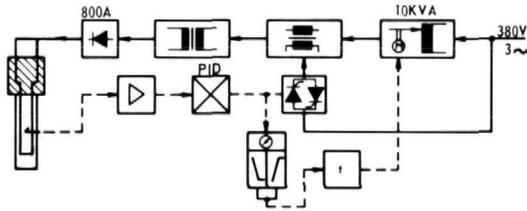


Abb. 5.8:  
Hochtemperaturregelung durch Direktheizung

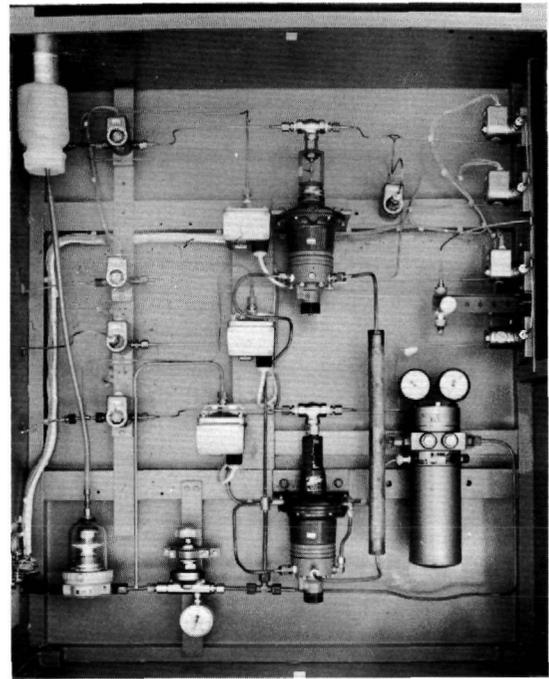


Abb. 5.7:  
Ventilkasten zur Dosierung eines Helium-Neon-Gemisches  
zwecks Temperaturregelung von Brennstoffpartikel

## Regelsysteme

Meßergebnisse liefern nur dann eine Aussage, wenn die sie beeinflussenden Betriebsparameter konstant gehalten werden können. Diese Aufgabe übernehmen Regelsysteme. Eine besonders große Rolle bei Bestrahlungsexperimenten spielt die Regelung der Temperatur. Sie wird z.B. durch Abbrand von Brennstoffen oder Giften, durch Regelstabverstellung oder Schwankungen der Reaktorleistung und durch Störungen in der Kühlung in weiten Grenzen verändert, muß aber den Forderungen der Auftraggeber entsprechend, in engen Grenzen gehalten werden. An die Regeleinrichtungen werden teilweise extreme Anforderungen gestellt, da sie z.B. bei hohen Temperaturen und im Strahlungsfeld zuverlässig arbeiten müssen. Aus diesen Gründen braucht man mehrere Regelverfahren für die verschiedenen Anwendungen. Neben elektrotechnisch-elektronischen Methoden werden deshalb auch Versuche mit fluidischen Regel- und Steuersystemen vorgenommen. (L.6)

Abb. 5.6 zeigt eine Schaltung, mit der die Temperatur geregelt wird, indem man bei einem He-Ne-Gemisch im Regelgas-

spalt eines Rigs das Mischungsverhältnis ändert. Dazu wird das Signal aus der Regelabweichung in einem PID-Regler zur Bildung einer elektrischen Stellgröße verarbeitet. Diese wird in einem elektropneumatischen Signalumformer in Druckgrößen umgewandelt, die über druckluftgesteuerte Membranventile den Zustrom von He und Ne zum Regelgasspalt steuern. Bei Überschreitung des kritischen Grenzwertes wird aus Sicherheitsgründen sofort auf Reihelium umgeschaltet. Abb. 5.7 zeigt den Ventilkasten dieses Systems. (L.3)

Zur Erzielung hoher Temperaturen oder um einen großen Regelbereich zu gewährleisten, müssen manche Einschübe zusätzlich elektrisch beheizt werden (Abb. 5.8). Als Istwertgeber dienen W-WRe-Thermoelemente und bei deren Ausfall auf niedrigerer Temperatur liegende periphere NiCr-Ni-Thermoelemente. Die vom PID-Regler gebildete Stellgröße steuert über Thyristoren eine Drossel auf der Netzseite, mit der sich 3 kW aussteuern lassen. Bei Überschreitung dieses Regelbereichs wird ein Stelltrafo nachgefahren, der bis zu 10 kW überstreicht.

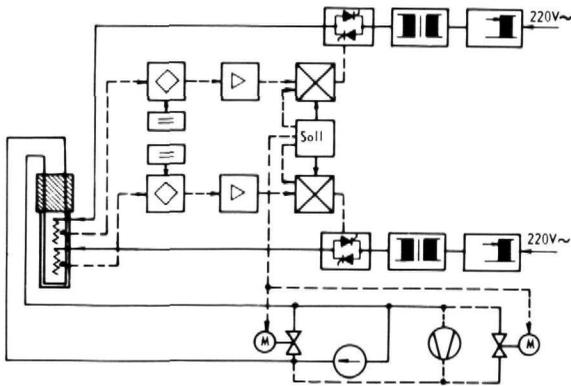


Abb. 5.9:  
Temperaturregelung mittels Impulspaketsteuerung der elektrischen Heizleistung sowie einem Gas- und Wasserkühlkreislauf

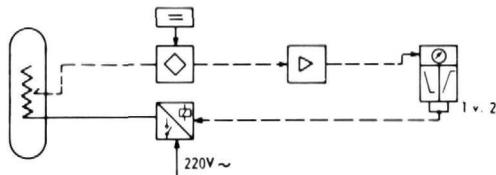


Abb. 5.10:  
2 Punkt-Temperaturregelung eines Filters mit Funktionsüberwachung

Bei den Experimenten LV 16 und LV 17 reicht eine einfache Regelung nicht aus. Hier müssen sowohl die elektrische Heizleistung als auch Gas- und Wasserkühlung gesteuert werden. Die Regelung erfolgt mittels Impulspaketsteuerung der elektrischen Heizung. Gleichzeitig wird sollwertabhängig jeweils die Wasser- und Gaskühlleistung verändert (Abb. 5.9).

Für die Ausheizung von Filtern reicht eine funktionsüberwachte 2-Punkt-Regelung aus (Abb. 5.10).

Neben der Temperaturregelung werden bei den Experimenten LV 21, LV 17 und LV 5 auch **Druckregelungen** gefordert. Sie erfolgen für gewöhnlich durch das Öffnen bzw. Schließen von Zustrom- bzw. Abstromventilen mit einer 2-Punkt- bzw. 3-Punktregelung (Abb. 5.11).<sup>(L.4)</sup>

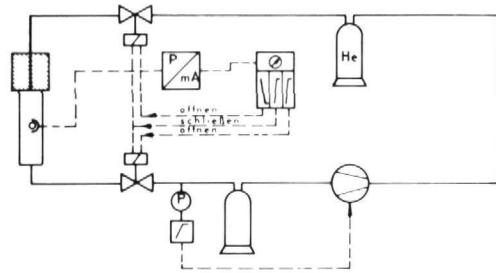


Abb. 5.11: Gasdruckregelung



Abb. 5.12:  
Fließschaltbild und Steuerung

**Niveauregelungen** wurden bei LV 21 für Wasserbehälter, bei LV 32 zu einer automatischen Nachfüllanlage für flüssigen Stickstoff gebaut.

### Steuersysteme

Um das Anfahren der umfangreichen Versuchsanordnungen zu erleichtern, werden die Frontplatten der Instrumentierung mit einem Fließschaltbild (Abb. 5.12) ausgerüstet. Es zeigt, wie üblich, ein Schema der zu steuernden Anlage, in dem die Schaltzeichen der Komponenten mit Signalleuchten bestückt sind. Diese quittieren die Schaltvorgänge und kennzeichnen den Betriebszustand des Systems.

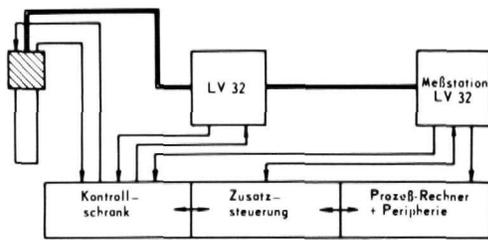


Abb. 5.13:  
Prozeßrechner zur Führung und Auswertung von  
Reaktorexperimenten

### Meßsysteme und Prozeßrechner

Die konventionellen Meßsysteme waren für Anzeige und Registrierung der Meßwerte mit Kompensationsschreibern ausgerüstet. Die Auswertung der Papierbänder war sehr langwierig und unergiebig. Der Prozeßrechner liefert demgegenüber ein mehrfaches an Informationen, reduziert die Daten und übernimmt teilweise auch die Auswertung. Er kann im Prinzip eine große Zahl von Daten laufend registrieren und in kurzen Fristen überflüssige Daten löschen, falls nicht irgend-ein Vorfall oder Unfall ihre Aufzeichnung verlangt.

Die Brennstoffbestrahlungseinrichtung LV 31 mit dem Spülkreislauf LV 32 wurde mit dem Prozeßrechner Siemens 301 ausgerüstet (Abb. 5.13). Er steuert in erster Linie die Meßstation des Spülkreislaufs und verarbeitet die Daten, die bei Bestrahlung und Messung anfallen. Die Steuerung umfaßt 150 Magnetventile für die Umschaltung der Spülgasproben, die Ausheizung der Kühlfallen für Anreicherung und Verzögerung und den mechanischen Antrieb der Kühlfallen. Die Daten umfassen z.B. Leistung des Reaktors, Temperatur in den Brennstoffbestrahlungskapseln, Parameter aus dem Kreislauf, wie Gasgemischverhältnis, Gesamtaktivität, Durchfluß, Niveau, Druck, die Daten aus der Meßstation, wie Gasdruck, Temperatur und Intensität der verschiedenen Linien des Spaltstoffspektrums bei verschiedenen Abklingzeiten. (Die Sicherheitsparameter werden konventionell verarbeitet.) (L.5)

Zur Signalübergabe an den Rechner sind häufig Hardwarelösungen günstig. Abb. 5.14 zeigt eine solche Kodierschaltung, Abb. 5.15 ihre Realisierung durch eine Kodierkarte.

Dekodier- und Kodierschaltungen werden auch in konventionalen Steuerungen gebraucht. Abb. 5.16 zeigt als Beispiel die Dekodierschaltung für eine Positionsanzeige für das Experiment SV 11, Abb. 5.17 die entsprechende Steckkarte.

Ein Prozeßrechner kann gleichzeitig mehrere Experimente versorgen, wenn man eine sinnvolle Auswahl der zu verarbeitenden Daten trifft. Besonders wirtschaftlich ist der Einsatz für umfangreiche Routinemeßverfahren, wie sie beim Meßrig MV 4 (s.S. 11) vorliegen.

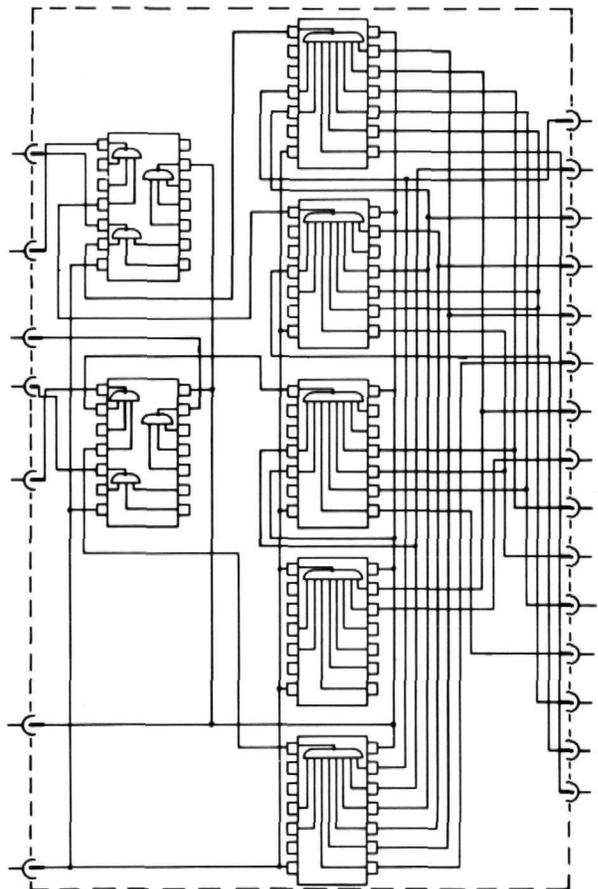


Abb. 5.14:  
Kodierschaltung für eine Meßwertübergabe an den  
Prozeßrechner

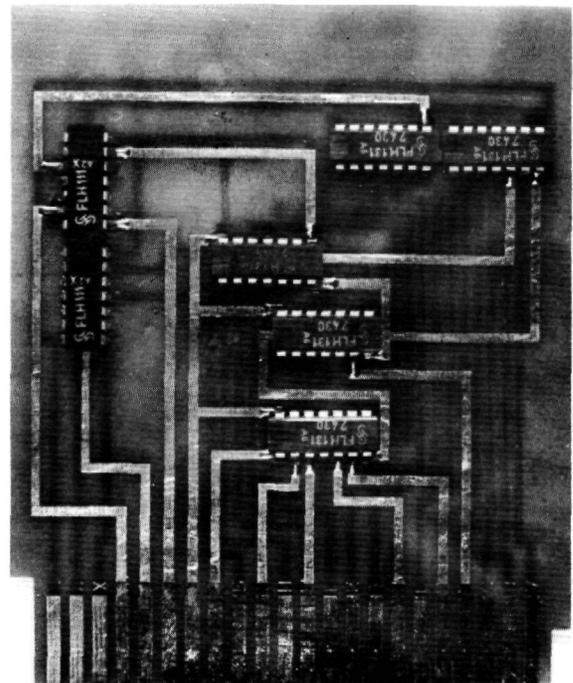


Abb. 5.15:  
Kodierkarte für eine Meßwertübergabe an den Prozeßrechner

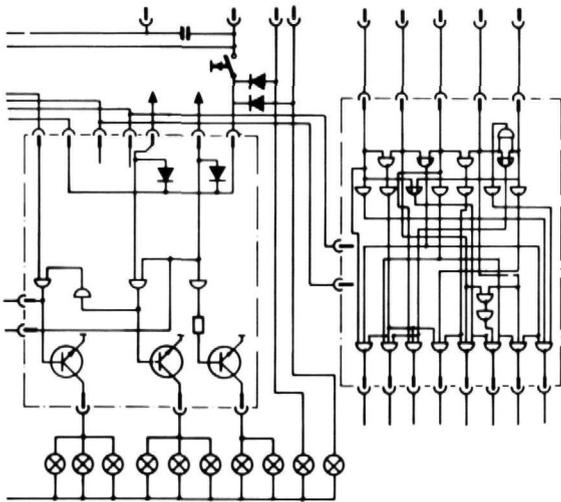


Abb. 5.16:  
Dekodierschaltung für eine Positionsanzeige

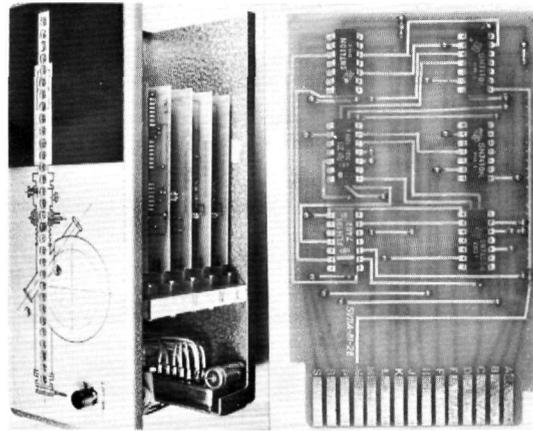


Abb. 5.17:  
Dekodiereinheit für eine Positionsanzeige

### Bau von Instrumentierungen

Alle von der Instrumentierungsgruppe ausgelegten Instrumentierungen werden in der Elektrowerkstatt des ZIR in einer nahezu industriellen Fertigung gebaut. Diese Werkstatt mußte entgegen den ursprünglichen Planungen eingerichtet

werden, da es nicht möglich war, Industriefirmen für die Übernahme so aufwendiger Einzelfertigungen zu gewinnen. Des weiteren hat sich immer wieder gezeigt, daß beim Bau solcher Anlagen auf den täglichen Kontakt zwischen Planungsingenieur und Fertigung nicht verzichtet werden kann.

### Literaturverzeichnis zu Kapitel 5

- (L.1) Preussner, A.: Kerntechnik 10 (1968) H. 8/9, S. 484
- (L.2) Dehe, P.: Interne Berichte ZIR-66-8 und ZIR-66-9
- (L.3) Stechemesser, H.: ZIR-Arbeitsbericht LV 31/1 vom 2.10.1968

- (L.4) Sicherheitsbericht LV 17.1, Jülich, März 1969, W. Krug
- (L.5) Sicherheitsbericht LV 32.0, Jülich, Januar 1971, H. Stechemesser, W. Bertram
- (L.6) Stelzer, F.: Kerntechnik 13 (1971) 339

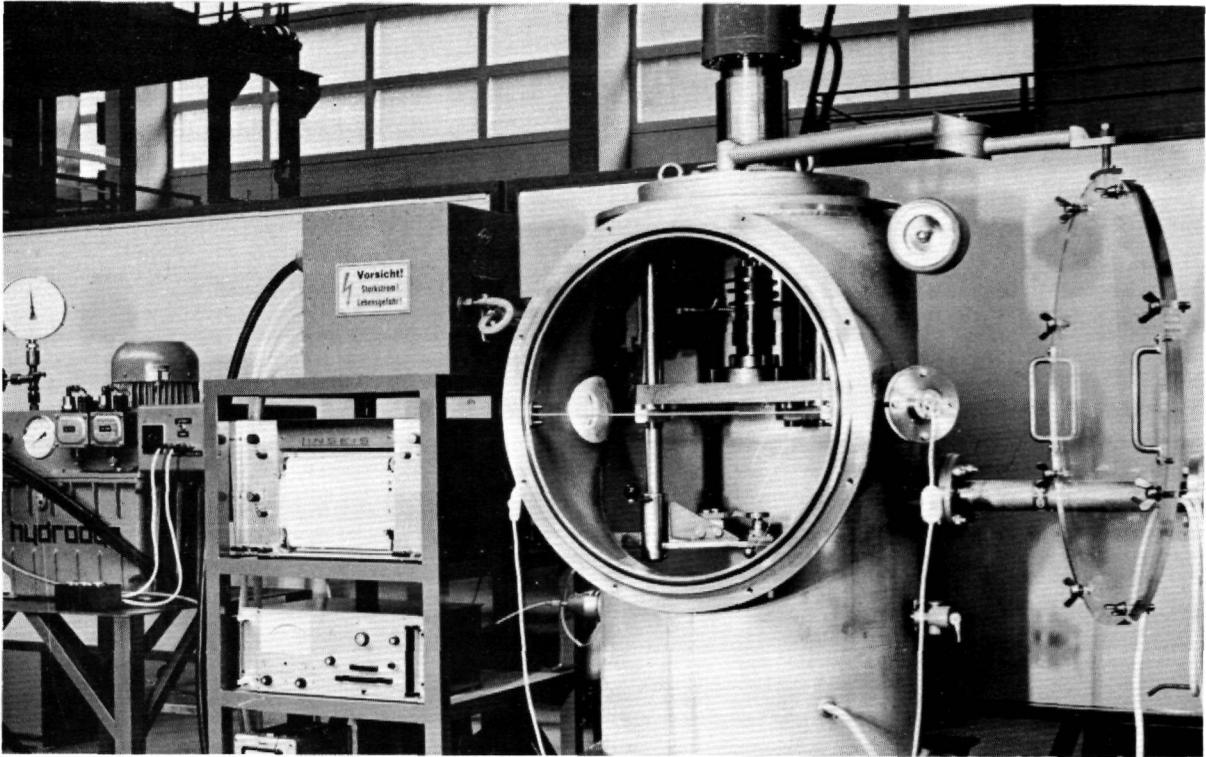


Abb. 6.0: Diffusionsschweißanlage

## 6. Technologie und Prüfwesen

Der Bau von Reaktoreinschüben stellt extreme Anforderungen an Technologie und Prüfwesen. Da viele Fertigungsaufgaben nicht von Industriefirmen ausgeführt werden können, mußten eigene Einrichtungen und Verfahren entwickelt werden. Die Entwicklungen wurden von den Anforderungen bestimmt, die der Bau von Versuchseinrichtungen stellte. Weiterentwicklungen erfolgen im Erfahrungsaustausch mit Fachleuten aus anderen Forschungseinrichtungen und der Industrie. So besteht auf dem Sektor der Schweiß- und Löttechnik eine gute Zusammenarbeit mit dem Deutschen Verband für Schweißtechnik, die ihren Ausdruck in der Mitarbeit von Fachleuten des Instituts in verschiedenen Arbeitsgruppen dieses Verbandes findet. Zu den für besondere Anforderungen auf dem Sektor der Verbindungstechnologie eingesetzten Verfahren zählen das Diffusionsschweißverfahren, das Hochtemperaturlöten unter Vakuum, das Elektronenstrahlschweißen, das Schutzgas- und das Plasmaschweißen.

### Das Diffusionsschweißen (L.1,2,3)

Das Diffusionsschweißverfahren gibt die Möglichkeit, Werk-

stoffpaarungen herzustellen, die wegen ihrer metallurgischen Eigenarten mit anderen Schweißverfahren nur mit erheblichem Aufwand eine brauchbare Verbindung zulassen. Eine solche Verbindung ist die Paarung Aluminium-Edelstahl.

Das Verfahren besteht darin, die zu verbindenden Werkstücke bei einer konstanten Temperatur im festen Zustand über eine bestimmte Zeit unter einem bestimmten Druck zusammenzupressen (Abb. 6.1). An der Verbindungsstelle bildet sich dann eine sehr dünne Legierungsschicht beider Verbindungspartner, die andere Eigenschaften hat als eine nach den üblichen Verfahren hergestellte breite Schweißnaht. Für die Herstellung von Diffusionsverbindungen wurde eine Anlage nach Abb. 6.2 entwickelt. Sie ist so ausgelegt, daß in ihr auch Hochtemperaturlötungen, Schmelzen von Metallen, Kaltpressschweißungen und Wärmebehandlungen von Metallen durchführbar sind. Sie enthält einen Druckzylinder für maximale Druckkräfte von 490 kN, eine Induktionsspule, die an einen 355 kHz, 15 kW Generator angeschlossen ist und einen Vakuum-Pumpstand. Die Anlage kann unter Vakuum oder Schutzgas arbeiten. Die Temperatur wird mit einem Mantelthermoelement im Werkstück gemessen.

## Diffusionsschweißen

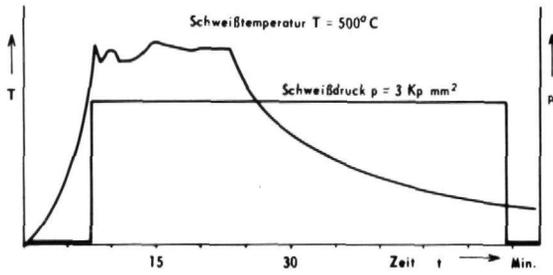


Abb. 6.1: Druck- und Temperaturverlauf beim Diffusionsschweißen von X 10 CrNiTi 189 mit AlMg3

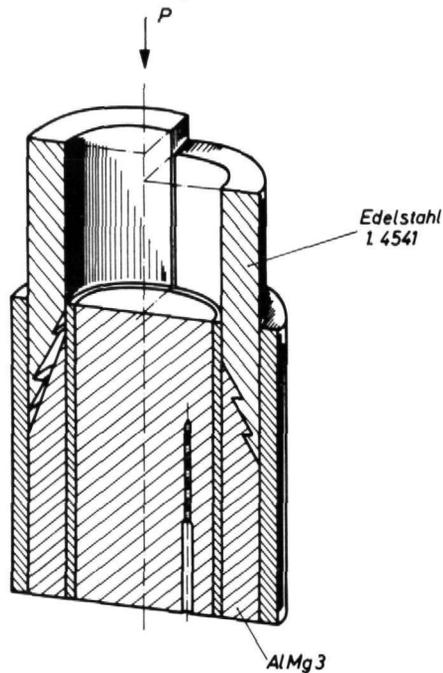


Abb. 6.3: Formschlüssig gesicherte Diffusionsschweißverbindung von Edelstahl und AlMg3. Die Rohrstücke sind durch Stützrohre geführt. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem Thermoelement über einen geschlossenen Kern.

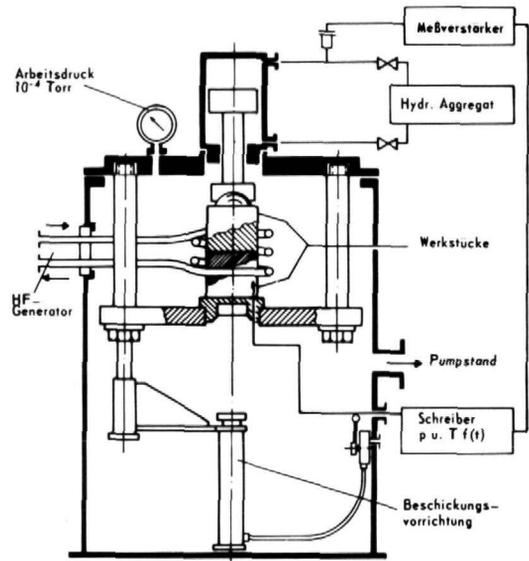


Abb. 6.2: Anordnung beim Diffusionsschweißen

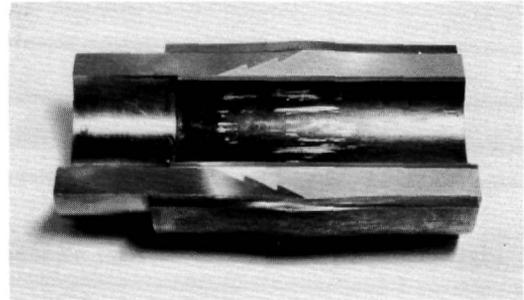


Abb. 6.4: In der Fachgruppe Fertigungstechnologie entwickelte form-schlüssig gesicherte Diffusionsverbindung (zum Patent angemeldet) (L.8)

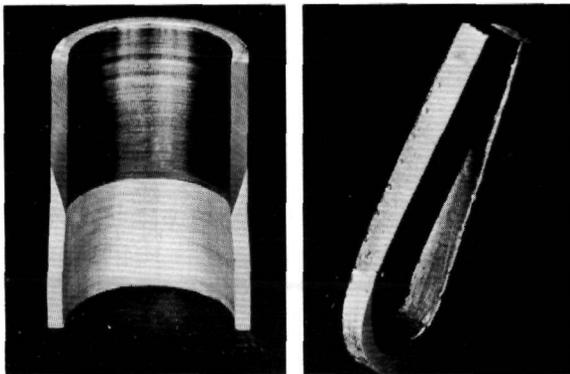


Abb. 6.5: Kegelige Diffusionsverbindung Edelstahl - AlMg3

Abb. 6.6: Biegeprobe der Diffusionsverbindung



Abb. 6.7: Diffusionsverbindungen Edelstahl - AlMg3 nach der Berstprobe

Abb. 6.3 zeigt die Anordnung der Werkstücke bei der Herstellung einer formschlüssig gesicherten Diffusionsverbindung, die Abb. 6.4 zeigt einen Schnitt durch eine so gefertigte Verbindung. In der Abb. 6.5 ist eine kegelige Diffusionsverbindung Edelstahl- $\text{AlMg}_3$  zu sehen und in der Abb. 6.6 eine aus einer solchen Verbindung entnommene Biegeprobe. Mit dieser Probe wurde eine  $180^\circ$  Biegung durchgeführt, ohne die Verbindung zu zerstören. Berstproben an Diffusionsverbindungen (Abb. 6.7) zeigen, daß der  $\text{AlMg}_3$ -Mantel durch die vom Innendruck erzeugte Tangentialspannung aufreißt, ohne die Verbindung zu zerstören. Die Abb. 6.8 zeigt das Schlibbild einer Diffusionsverbindung mit Eindrücken einer Mikrohärtmessung. Man sieht in dieser Aufnahme, daß die Diffusionszone sehr spröde intermetallische Phasen enthält.

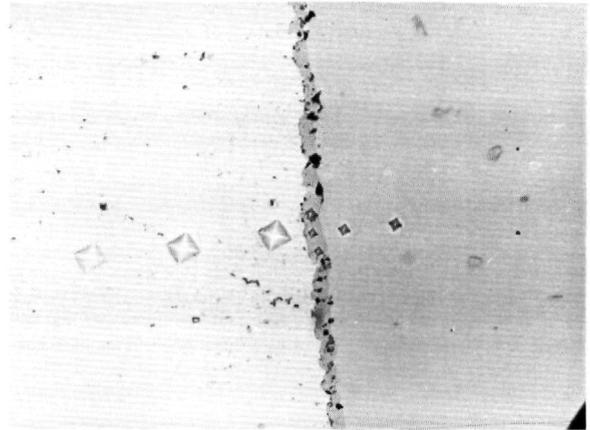


Abb. 6.8:  
Diffusionsverbindung  $\text{AlMg}_3$  - 1.4541 V 500 : 1  
Wiedergabe etwa 0,6 : 1

### Das Hochtemperatur-Vakuumlöten (L.2,4)

Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, flußmittelfreie Hochtemperaturlötungen höchster Präzision unter Vakuum durchzuführen. Für die Lötung von Kleinstteilen wurde ein Sichtofen entwickelt. Die Abb. 6.9 zeigt die Anordnung beim Lötprozeß. Die Induktionsspule dieser Einrichtung ist an einem 10 kHz, 30 kW Generator angeschlossen. Der Deckel einer Bestrahlungskapsel, in den in einem einzigen Arbeitsgang 12 Mantelthermoelemente und eine Spülgasleitung eingelötet wurden, ist in Abb. 6.10 dargestellt. Das Schlibbild einer Hochtemperaturlötung von Edelstahl mit einem Nickel-

basislot zeigt die Abb. 6.11. Nach einer Wärmebehandlung ist der Lötspalt kaum vom Grundwerkstoff zu unterscheiden. Die Verbindung ist bei Löttemperatur nicht mehr aufzuschmelzen. Die Abb. 6.12 zeigt eine Edelstahl-Niob-Lötverbindung, die in vielen Bestrahlungseinrichtungen eingesetzt wird. Für den Bau gasgekühlter Hochtemperaturreaktoren sind Zircaloy2-Edelstahlverbindungen erforderlich. An einer solchen Verbindung wird bei uns gearbeitet. Die Abb. 6.13 zeigt eine Rohrverbindung dieser Werkstoffe und das Schlibbild des Gefüges an der Verbindungsstelle.

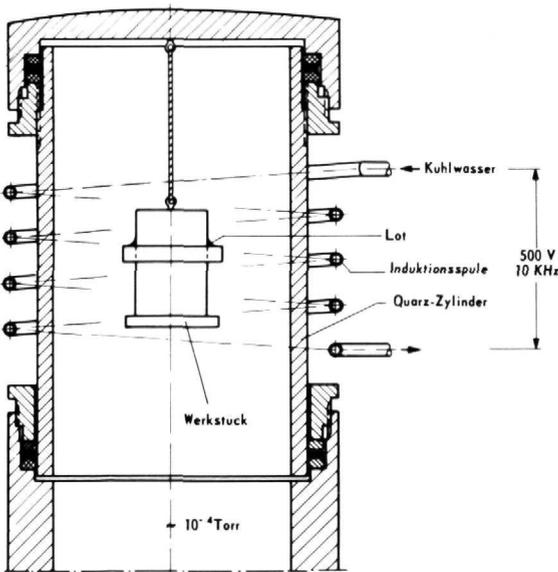


Abb. 6.9:  
Anordnung beim Hochtemperaturlöten unter Vakuum mit induktiver Beheizung

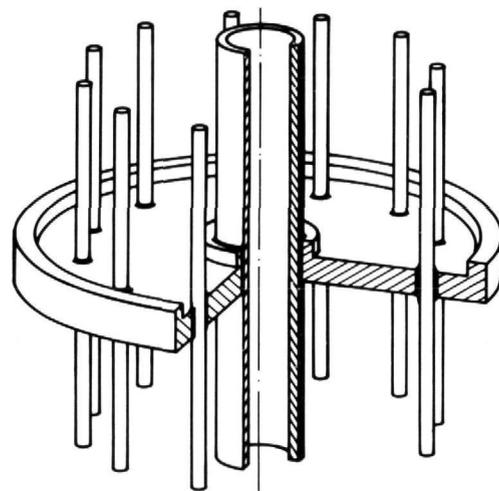


Abb. 6.10:  
Deckel einer Bestrahlungskapsel mit eingelöteten Thermo-  
elementen und Spülgasleitung

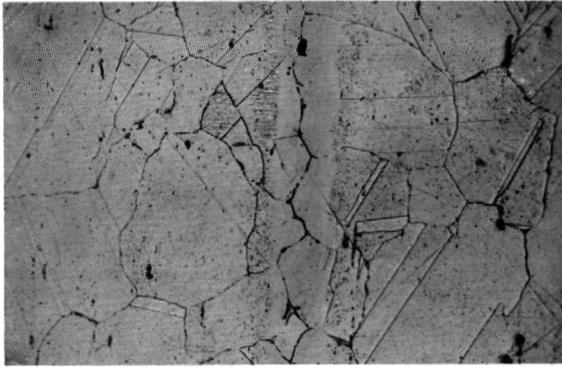


Abb. 6.11:  
Hochtemperatlötung an Edelstahl 1.4541  
Lot: BNi-5 (nach AWS)  $V = 200 \times$   
Wiedergabe etwa 0,5 : 1

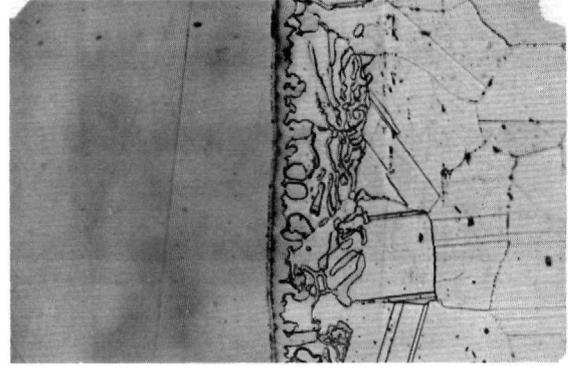


Abb. 6.12:  
Hochtemperatlötung. Werkstoffe: Edelstahl 1.4541, Niob  
Lot: BNi-5 (nach AWS)  $V = 200 \times$   
Wiedergabe etwa 0,5 : 1

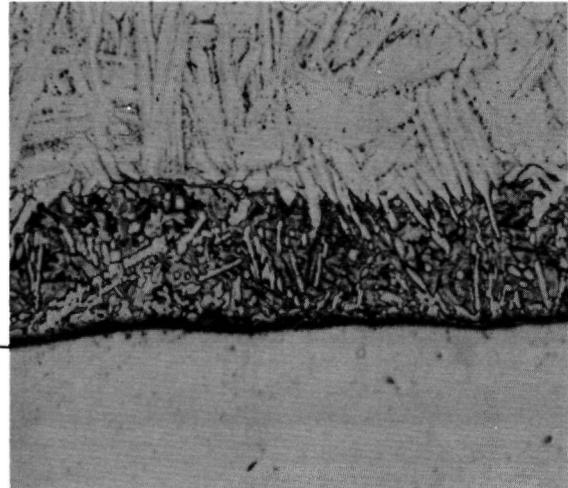
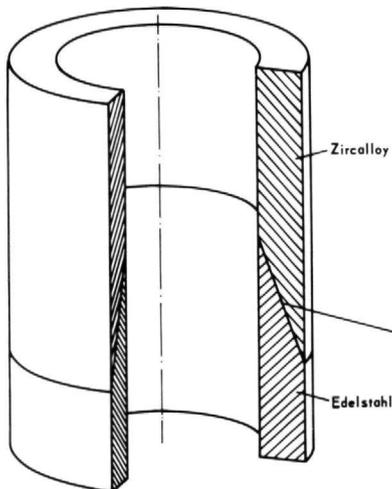


Abb. 6.13: Hochtemperatlötung Edelstahl 1.4541 - Zircalloy 2, Lot: ZrBe5

### Das Elektronenstrahlschweißen (L.2)

Das Elektronenstrahlschweißverfahren bietet über andere Schweißverfahren hinausgehende Lösungen metallurgischer wie auch konstruktiver Verbindungsprobleme. Dies gilt besonders für Hochtemperaturwerkstoffe sowie extreme Forderungen an die Güte der Schweißnaht. Der Einsatz dieses Verfahrens erfordert Kenntnisse auf dem Gebiet der Werkstoffkunde sowie umfangreiche Erfahrungen bei der Konstruktion und Ausführung dieser Nähte. Das ZIR verfügt über zwei An-

lagen, die sich in Bezug auf Anwendungsmöglichkeiten ergänzen. Ein Schema der neuen Anlage zeigt Abb. 6.14. Sie arbeitet mit einer maximalen Strahlleistung von 7,5 kW, die sich aus der Beschleunigungsspannung von 150 kV und der Stromstärke von 50 mA ergibt. Die Schweißkammer hat 0,7 m<sup>3</sup> Inhalt. In ihr ist ein x-y Tisch untergebracht, auf den bei Bedarf eine Drehvorrichtung aufgebaut werden kann. Die Drehvorrichtung kann das Werkstück um eine beliebig einstellbare Achse drehen.

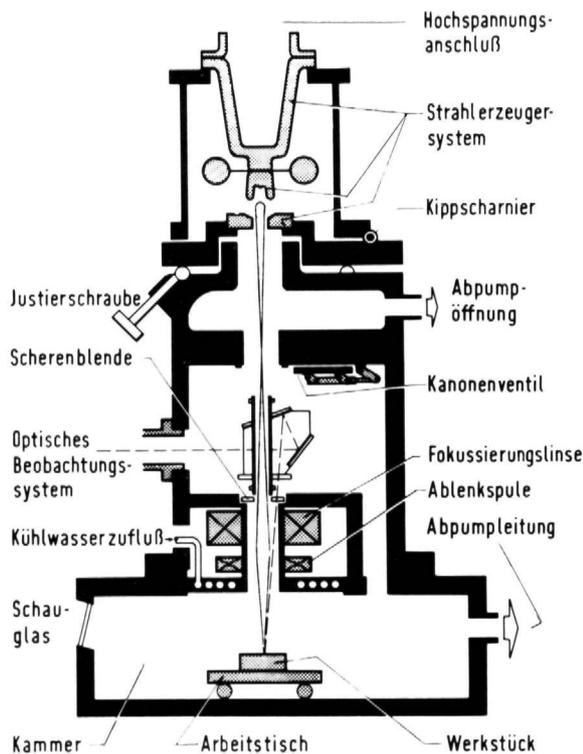


Abb. 6.14:  
Schema einer Elektronenstrahlschweißanlage

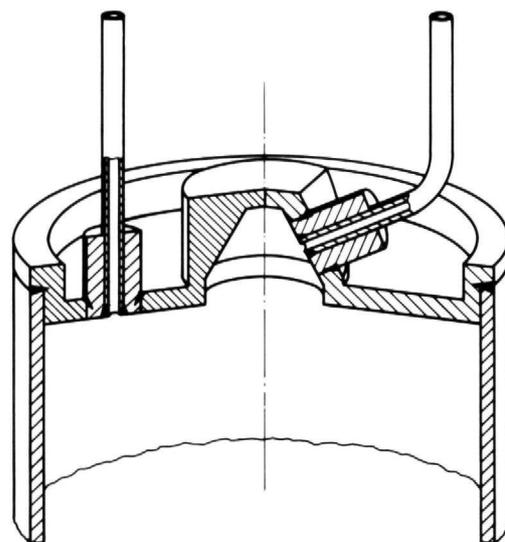
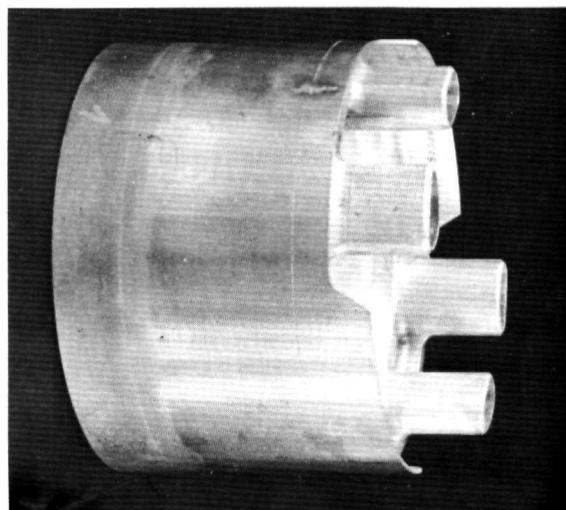
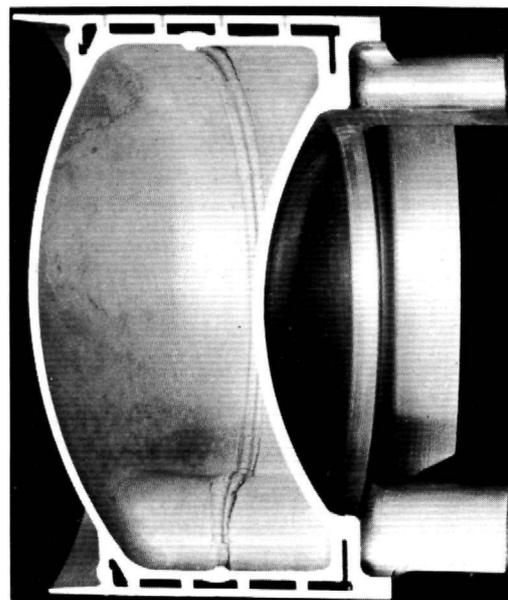


Abb. 6.15:  
Kapseldeckel mit elektronenstrahlgeschweißten  
Spülgasrohren



a



b

Abb. 6.16: Moderatortopf für die Versuchseinrichtung SV5  
elektronenstrahlgeschweißt  
a) nach der Bearbeitung b) Schnitt durch den Topf

Arbeitsbeispiele sind in den Abb. 6.15 und 6.16 dargestellt. Der Kapseldeckel aus Edelstahl (Abb. 6.15) hat einen Durchmesser von 35 mm. Unter räumlich ungünstigen Bedingungen wurden hier zwei Spülgasrohre eingeschweißt. Die Abb. 6.16a zeigt einen Moderatortopf für die Kalte Neutronenquelle. Die Konstruktion dieses Werkstückes erfordert die im Schnitt

(Abb.6.16b) zu sehenden verdeckten Schweißnähte. Diese Nähte lassen sich nur mit dem Elektronenstrahl schweißen. Das Werkstück muß extremen Prüfbedingungen standhalten. Für die bei uns durchgeführten Elektronenstrahlschweißungen wurde eine TÜV-Verfahrensprüfung durchgeführt.

### Schutzgasschweißen (L.2)

Werkstücke aus reaktiven Werkstoffen müssen unter einem Inertgas geschweißt werden. Für Schweißungen mit extremen Anforderungen sowie für den Verschluß von Kapseln mit einem definierten Gasinhalt wurde eine Schutzgas-Schweißkammer (Abb. 6.17) entwickelt. In dieser Kammer können Schweißungen von Hand oder automatisch durchgeführt werden. Für den Nachbau dieser Kammer wurde von der KFA eine Lizenz vergeben.

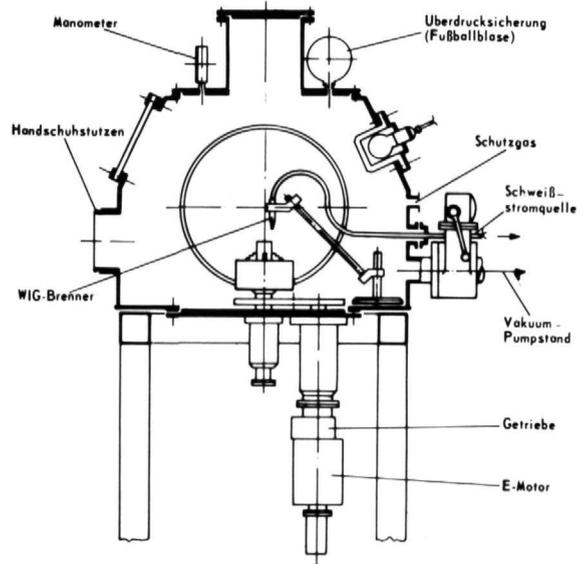


Abb. 6.17: Anordnung für das Schutzgasschweißen

### Reinraummontage (L.2,5)

Reaktoreinschübe müssen infolge der an sie gestellten Anforderungen in einem Reinraum zusammengebaut werden. Die verwendeten Bauteile werden vorgereinigt und gebeizt in verschlossenen Beuteln angeliefert. Der präzise und räumlich beengte Aufbau der Einschübe erfordert sehr umfangreiche Arbeitsvorbereitungen, einen genauen Prüf- und Montageplan und ein in Zusammenarbeit mit der Reinraummontage gut funktionierendes Prüfsystem. Die Fertigung selbst stellt höchste Ansprüche an den Vorrichtungs- und Montagebau und erfordert den Einsatz hochentwickelter Schweiß- und Lötverfahren. Die Abb. 6.18 zeigt die bei der Fertigung eines Bestrahlungseinschubes für Brennstoffpartikel eingesetzten Verbindungsverfahren. In der Reinraumwerkstatt wurden bisher insgesamt etwa 130 Reaktoreinschübe gefertigt.

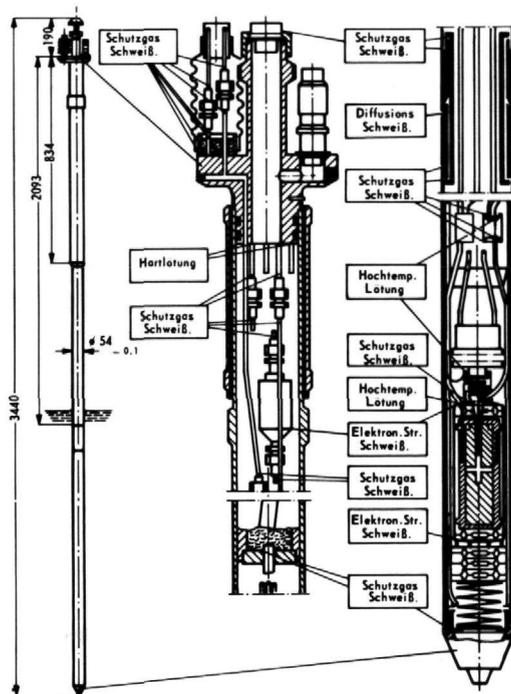


Abb. 6.18: Bei der Fertigung eines Strahlrohreinschubes eingesetzte Verbindungsverfahren

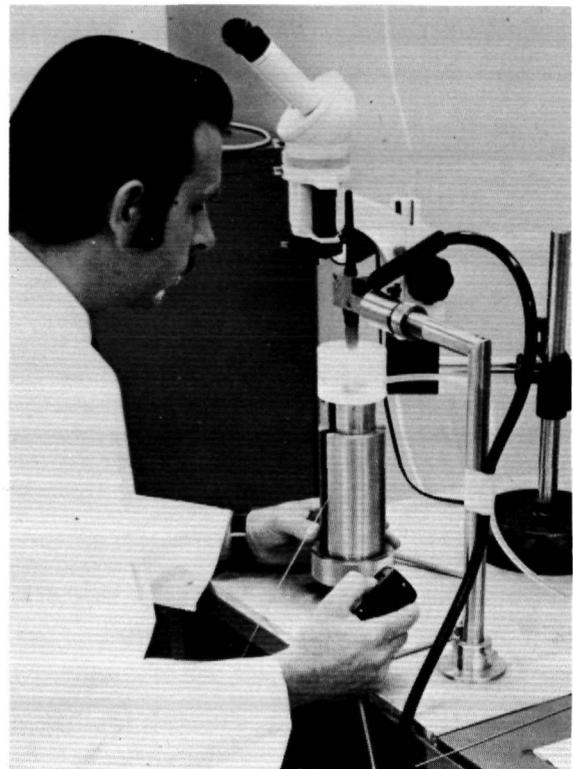


Abb. 6.19: Einrichtung für die Fertigung von Meßköpfen an ummantelten Thermoelementen

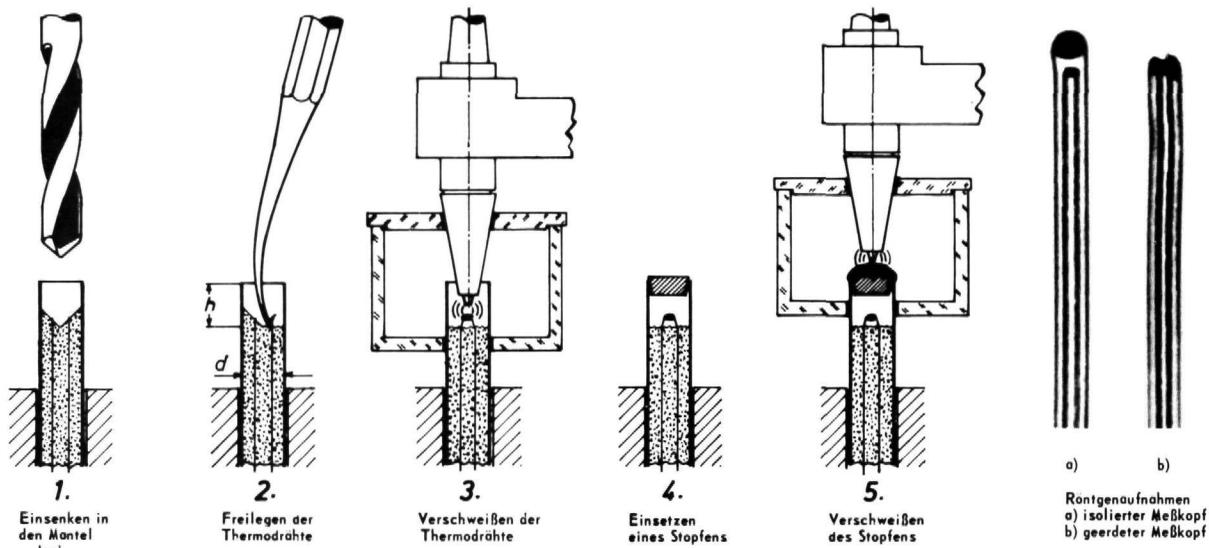


Abb. 6.20: Arbeitsgänge bei der Herstellung eines isolierten Meßkopfes an einem ummantelten Thermoelement

Besondere Probleme treten bei der Herstellung von Meßköpfen an ummantelten Thermoelementen auf. Für die Fertigung von Meßköpfen wurde im ZIR eine Einrichtung gebaut. Auf der Abb. 6.19 ist diese Einrichtung zu sehen, die Abb. 6.20 zeigt die Arbeitsgänge bei der Herstellung eines isolierten Meßkopfes sowie die Röntgenaufnahmen eines geerdeten und eines isolierten Meßkopfes. Nach einem anderen, im ZIR entwickelten Verfahren, das zum Patent(L.6) angemeldet wurde, lassen sich die Mäntel ummantelter Thermoelemente nach einem Reib- oder Preßschweißverfahren, wie in Abb.

6.21 zu sehen, verschließen. Dabei wird entweder das feststehende Thermoelement durch Hineinpressen in einen rotierenden Formkörper geschlossen, oder man läßt das Thermoelement rotieren und formt den Mantel mit einem polierten Stahl zu einer Halbkugel.

Der Einbau von Thermoelementen erfordert sehr tiefe Bohrungen. Nach einem im ZIR entwickelten, zum Patent angemeldeten Verfahren, lassen sich z.B. Bohrungen von 0,5 mm Durchmesser 100 mm tief (Abb. 6.22) geradlinig bohren.(L.7) Eine fertig montierte, nachträglich aufgeschnittene Bestrahlungskapsel für beschichtete Uranpartikel zeigt die Abb. 6.23, die entsprechende Röntgenaufnahme die Abb. 6.24.

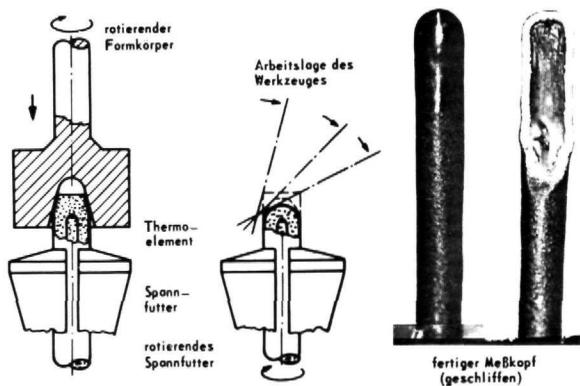


Abb. 6.21: Herstellung von Meßköpfen an Thermoelementen

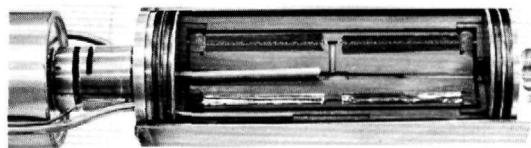


Abb. 6.23: Bestrahlungskapsel für Brennstoffpartikel

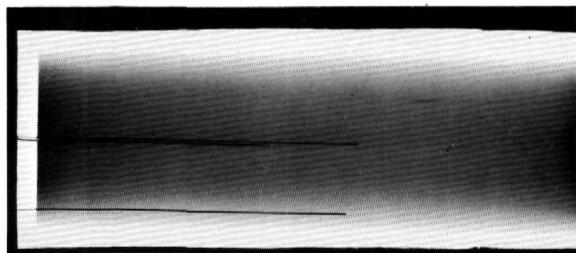


Abb. 6.22: Tiefe Bohrung (Röntgenbild)

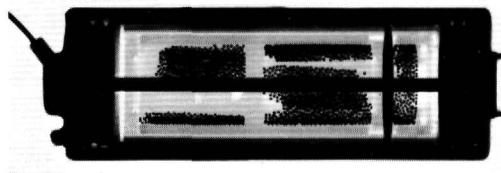


Abb. 6.24: Röntgenbild einer Bestrahlungskapsel

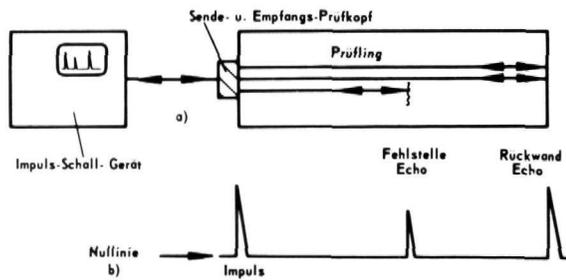


Abb. 6.25:  
a) Impuls-Echo-Verfahren für Wanddickenbestimmung und Fehlerortung  
b) Schematische Darstellung des Leuchtschirmbildes

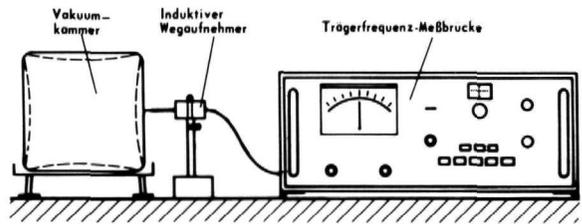


Abb. 6.26:  
Messung der Wanddurchbiegung bei einer Vakuumkammer mit quadratischem Querschnitt

## Prüfungen und Abnahmen

Den Prüfprogrammen des Reaktorsicherheitsausschusses (RSA) entsprechend müssen alle Versuchsanordnungen für Reaktoren abgenommen werden. Die Abnahmen umfassen die für ein Experiment spezifischen Prüfungen, Maßkontrollen, Verformungsmessungen, Leckprüfungen, Durchflußmessungen, Druckprüfungen und Röntgenuntersuchungen. Den für die Sicherheit vorgeschriebenen Prüfungen gehen Funktionsprüfungen voraus, so z.B. an Pumpen, Ventilen und Filtern, aus denen man Schlüsse auf die Zuverlässigkeit der erstellten Anlage ziehen kann und die Vorprüfungen bzw. Abnahmen für gelieferte und gefertigte Bauelemente.

Die Abnahmen für die Prüfstelle des RSA werden zum großen Teil im ZIR durchgeführt. Es verfügt über die dazu notwendigen Einrichtungen.

## Maßkontrollen und Verformungsmessungen

werden außer mit den üblichen mechanischen Meßgeräten mit Ultraschall-Meßverfahren (Abb. 6.25) und mit einer Trägerfrequenzbrücke angeschlossenen Aufnehmern (Abb. 6.26) durchgeführt. Beim Impuls-Echo-Verfahren mit Ultraschall werden Wanddicken in verschweißten Behältern be-

stimmt oder Fehler z.B. Risse geortet. Es beruht auf der Messung der Zeit, die zwischen der Emission eines Impulses und der Ankunft des ersten reflektierten Impulses vergeht, die man auf dem Bildschirm ablesen kann.

Mit der Trägerfrequenz-Meßbrücke können mit den vorhandenen Aufnehmern Drücke von 0 - 0,01 kp/cm<sup>2</sup> bis 0 - 200 kp/cm<sup>2</sup> gemessen werden, mit einem induktiven Wegaufnehmer Durchbiegungen z.B. an einer Vakuumkammer (Abb. 6.26) bis herab zu  $1 \cdot 10^{-2}$  mm und mit Dehnungsmeßstreifen Verformungen und Verspannungen an belasteten Systemen.

## Leckprüfungen

sollen die sichere Auffindung von Undichtigkeiten garantieren und die Gesamtleckrate eines Systems, z.B. eines Reaktoreinschubs ergeben. Dazu wird der Reaktoreinschub in einer Plastikhülle unter eine Testgasatmosphäre, meist He, gesetzt und evakuiert (Abb. 6.27). Das Lecksuchgerät, ein einfaches Massenspektrometer, zeigt dann die je Zeiteinheit eindringende Testgasmenge und damit die Gesamtleckrate an. Zur Beseitigung des Lecks muß es geortet werden. Dies geschieht in einem Verfahren nach Abb. 6.28. Hier wird das Rig mit Testgas abgesprüht. Trifft man dabei das Leck, so wird es durch einen Ausschlag im Lecksuchgerät angezeigt.

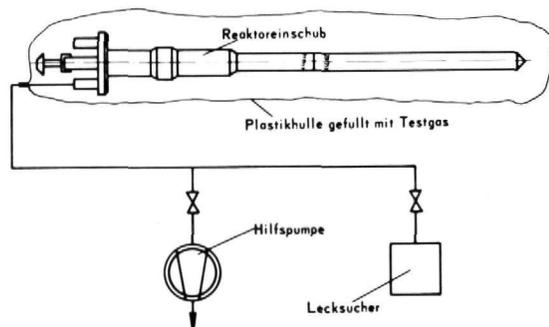


Abb. 6.27:  
Bestimmung der Gesamtleckrate bei einem Reaktoreinschub

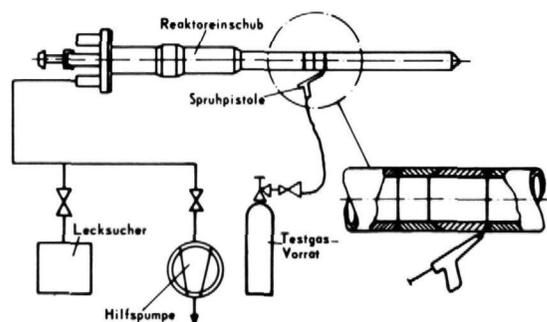


Abb. 6.28:  
Ortung und Bestimmung der Größe einer Leckrate

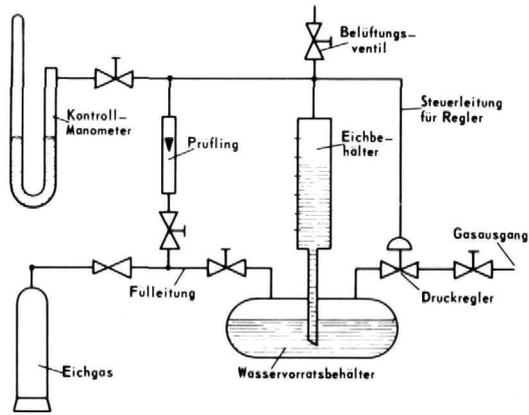


Abb. 6.29:  
Prüfstand zum Eichn von Durchflußmessern  
bei verschiedenen Gasen

### Durchflußmessereichungen

erfolgen volumetrisch (Abb. 6.29). Der Prüfling wird an eine Meßgasquelle angeschlossen und das in einer bestimmten Zeit hindurchtretende Volumen im Eichbehälter gemessen. Dabei wird der Druck im Gasraum des Behälters konstant gehalten. Der Fehler liegt unter 1%. Ein anderes Kalibriergerät (Abb. 6.30) arbeitet nach der Druckanstiegsmethode und ist transportabel. Seine Meßgenauigkeit ist besser als 1% absolut.

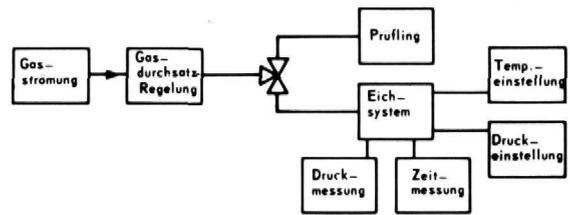


Abb. 6.30:  
Eichgerät zur Bestimmung von Gasdurchsätzen

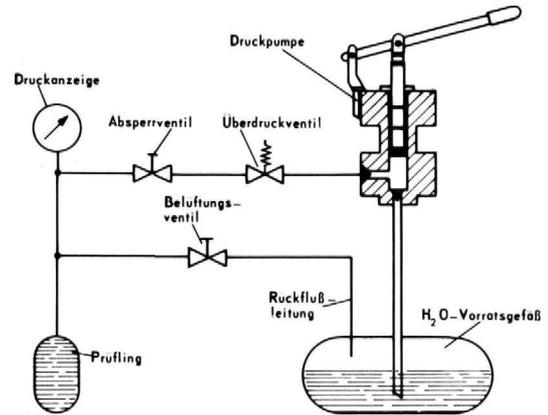


Abb. 6.31:  
Druckprüfeinrichtung bis maximal 600 atü

### Die Druckprüfung

erfolgt wie üblich mit Wasser. Die Anordnung (Abb. 6.31) wurde aus Edelstahl gebaut um Reinstbedingungen einhalten zu können. Der Arbeitsbereich liegt zwischen 0 und 600 atü.

### Im Filterprüfstand (Abb. 6.32)

werden Belade- und Regenierzeit bezüglich der Wasseraufnahme für Filterpatronen mit verschiedenen Füllungen z.B. Mole-

kularsieb 13X, CuO und Aktivkohle bestimmt. Bei Kreisläufen muß man vor allem den Einfluß der Feuchtigkeit im System auf tiefgekühlten Fällen kennen. Die Abb. 6.33 zeigt, wie sich die Feuchtigkeit des Gasstroms hinter dem Filter beim Regenieren mit trockenem Gas ändert.

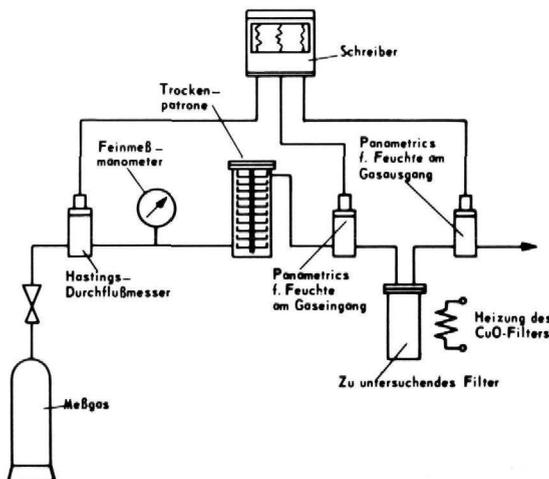


Abb. 6.32:  
Aufbau zur Bestimmung der Feuchtigkeit eines Filters  
als Zeitfunktion

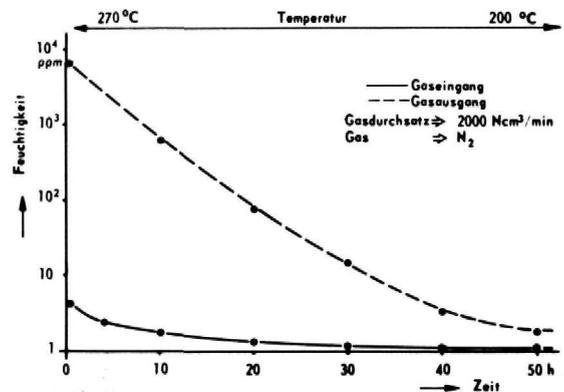


Abb. 6.33:  
Zeitlicher Verlauf der Feuchtigkeit

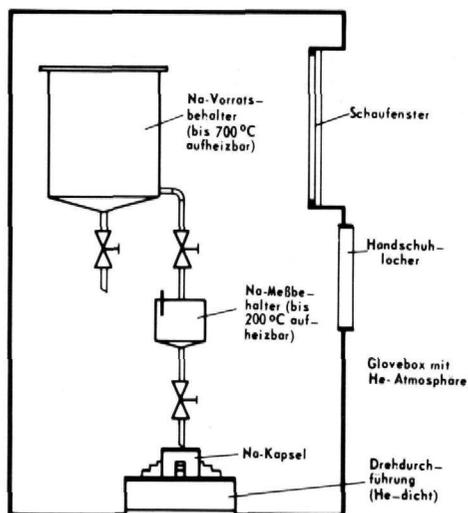


Abb. 6.34:  
Abfüllvorrichtung für Natrium in Schutzgasatmosphäre

#### Die Natrium-Abfüllanlage (Abb.6.34)

ist zum Füllen von Bestrahlungskapseln mit reinem Natrium bestimmt. Im Vorratsbehälter wird das Na über Zirkonspänen erhitzt um Sauerstoffreste zu beseitigen. Dann wird es direkt oder, falls der Füllstand in der Na-Kapsel nicht erkennbar ist, über einen Meßbehälter eingefüllt.

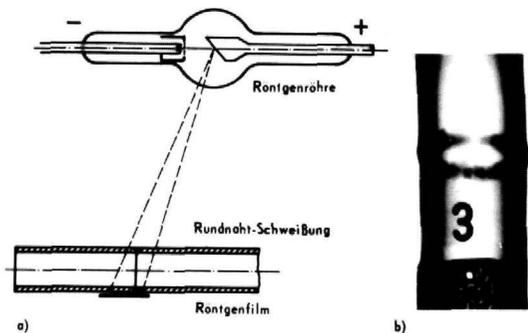


Abb. 6.35:  
Herstellung der Röntgenaufnahme einer Rund-Schweißnaht

#### Die Röntgenprüfungen

Viele Schweißstellen müssen den Forderungen des Sicherheitsausschusses entsprechend vor oder nach dem Einbau geröntgt werden. Im Durchschnitt wurden in der vergangenen Zeit über 1000 Röntgenprüfungen pro Jahr durchgeführt. Einen besonders großen Anteil haben dabei die Rohrverschweißungen. Sie werden nach dem Prinzip Abb. 6.35a überprüft. Das Rohr wird unter einer solchen Richtung zur Verschweißungsebene durchstrahlt, daß die Schweißnaht im Röntgenbild (Abb. 6.35b) als Ellipse erscheint.

#### Literaturverzeichnis zu Kapitel 6

- (L.1) Lehrheuer, W.: Kerntechnik 10 (1968) 208
- (L.2) Lehrheuer, W.; Lison, R.: DVS-Bericht 15 (1970) 169
- (L.3) Lison, R.: Schweißen und Schneiden 23 (1971) 304
- (L.4) Lehrheuer, W.; Lison, R.: JÜL-681-RX, Juli 1970
- (L.5) Lehrheuer, W.: Kerntechnik 10 (1968) 321

- (L.6) Groß, B.; Beuth, J.: Deutsche Patentanmeldung P 20 49 139.8
- (L.7) Groß, B.: Deutsche Patentanmeldung P 15 52 361.2
- (L.8) Lehrheuer, W.; Lison, R.: Deutsche Patentanmeldung P 20 60 728.7

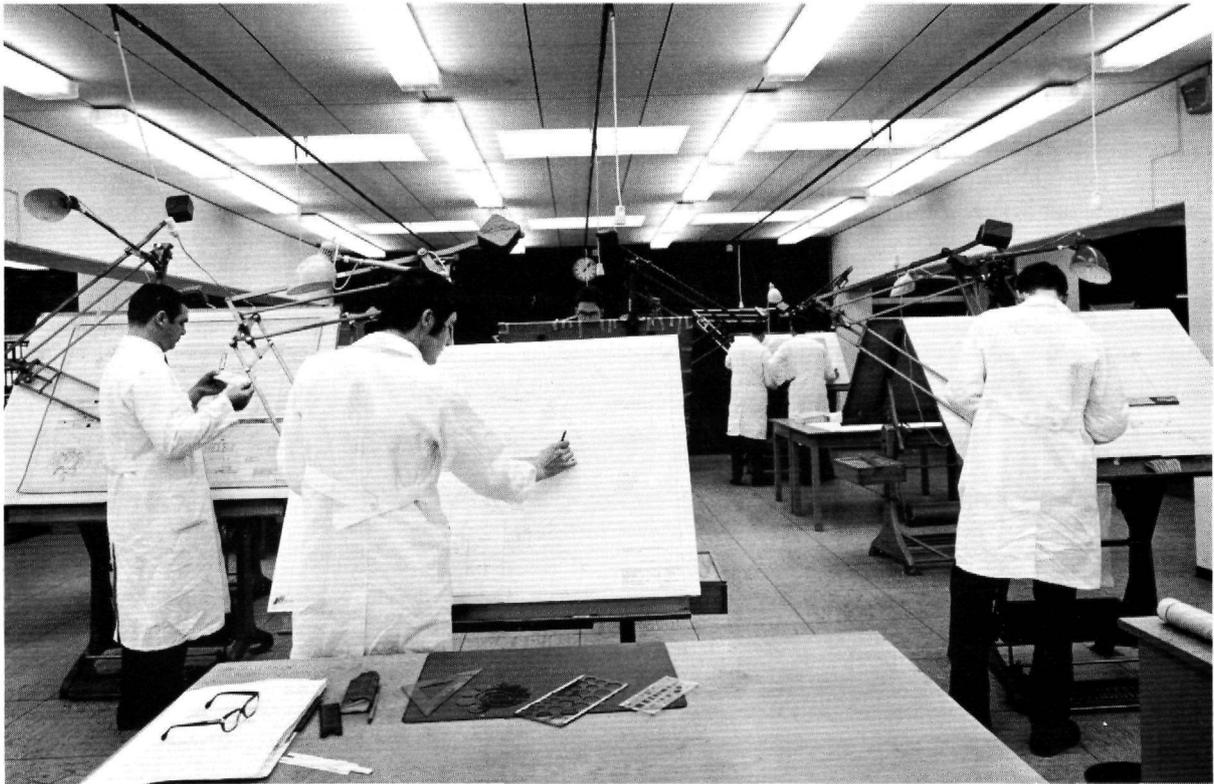


Abb. 7.0: Blick in das Konstruktionsbüro des ZIR

## 7. Planung, Entwicklung und Konstruktion

Die Bearbeitung von Projekten durchläuft die in Abb. 7.1 dargestellten Phasen. Das gesamte Projekt steht von der Auftragsannahme bis zur Inbetriebnahme unter der verantwortlichen Leitung eines Projektingenieurs, dem bei größeren Projekten ein Mitarbeiterstab zugeordnet ist.

Bei den Arbeiten am Projekt werden die verschiedenen Fachgruppen, wie z.B. Strahlentechnik, Wärme- und Strömungstechnik, Instrumentierung, Konstruktion, Technologie und Prüfwesen, eingeschaltet, um spezifische Aufgaben zu lösen.

1) Auftragsannahme	Aufstellung der Spezifikationen nach Merkliste
2) Projektstudie	Lösungsvorschlag mit Schema, Kosten und Terminabschätzung
3) Entwicklung	Entwurf, Entwurfsprüfung Auslegung, Zuverlässigkeitsanalyse Kostenberechnung, Optimierung
4) Erstellung	Konstruktion, Konstruktionsprüfung Fertigung, Montagen
5) Abnahmen	Werkstoffabnahmen, Komponententests, Sicherheitsbericht
6) Inbetriebnahme	Einbau am Versuchsort Versuchsbetrieb, Betrieb

Abb. 7.1: Phasen der Projektbearbeitung

Dabei veranlaßt, koordiniert und kontrolliert der Projekt-Ingenieur alle anfallenden Tätigkeiten, wobei die Beeinflussung durch andere gleichzeitig ablaufende Projekte berücksichtigt wird. Er vergibt auch Aufträge an Werkstätten und Firmen. Dem Projektingenieur obliegt es außerdem, die Genehmigungsverfahren einzuleiten und den Nachweis für die Betriebssicherheit und -Zuverlässigkeit der Apparatur zu erbringen.

Zur Steuerung des Arbeitsablaufes wurde ein auf der Netzplantechnik basierendes, geschlossenes Planungssystem entwickelt, das die Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanung sowie eine Nachkalkulation umfaßt.

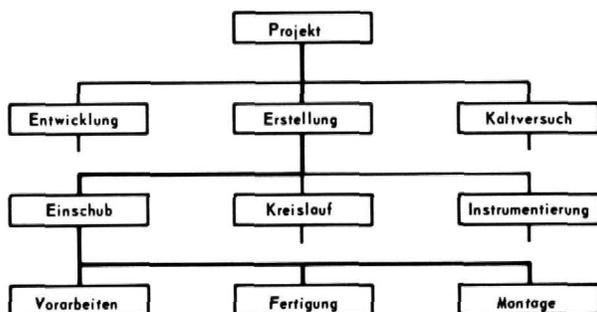
Für Entwicklung und Konstruktion sind Verfahren ausgewählt worden, die durch systematisches Vorgehen zufällige, fehlerhafte und unbefriedigende Lösungen vermeiden helfen. Es sind dies: ein Geräteinformationssystem, eine Konstruktionsmethodik und eine bestimmte Form der Zuverlässigkeitsanalyse, also Verfahren, die man heute unter der Bezeichnung „Systemtechnik“ zusammenfaßt.

### Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanung, Nachkalkulation

Die Termin-, Kapazitäts- und Kostenplanung wird in integrierter Weise auf der Basis der Netzplantechnik durchgeführt. Die Netzplantechnik umfaßt zum einen eine exakte

Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den zu erledigenden Tätigkeiten und zum anderen die Möglichkeit, Zwischen- und Endtermine aus der Dauer der Einzeltätigkeiten zu ermitteln. Darüber hinaus bietet sie Entscheidungshilfen für den Fall, daß Termine verschoben oder verkürzt werden sollen. An die Zeitplanung können Ermittlungen über die Höhe und den zeitlichen Anfall des Kapazitätsbedarfes und der Kosten angegliedert werden, wobei die Gegenüberstellung des Bedarfes und des Angebotes an Kapazität und Kosten wiederum Rückwirkungen auf die Zeitplanung haben können. Die Erstellung eines Netzplanes erfolgt so, daß das Vorhaben in Baugruppen oder Teilaufgaben aufgegliedert wird (Projektstrukturplan Abb. 7.2a), deren Bearbeitung wiederum in einzelne überschaubare Tätigkeiten zerlegt wird (Vorgangsliste

Abb. 7.2b). Diese Tätigkeiten werden dann entsprechend den Abhängigkeiten, die sich aus dem Arbeitsfortschritt ergeben, als Netzwerk graphisch aufgezeichnet (Abb. 7.3). Überlegungen über die Art und den Umfang der im ZIR anfallenden Projekte führten zum Aufbau eines geschlossenen Planungssystems, das für Projekte von kleinem und mittlerem Umfang aus dem Entwicklungs- und Forschungsbereich geeignet ist und seit 1969 innerhalb der KFA angewendet wird.<sup>(L.1)</sup> Es umfaßt Terminplanungen auf der Basis der C.P.-Methode für mehrere gleichzeitig ablaufende Projekte, eine weitgehend rationalisierte und straffe Terminverfolgung, Kapazitätsbedarfs-Rechnungen über alle Projekte hinweg sowie Kostenrechnungen. Ferner können mehrere Stellen gezielt informiert werden.



**Vorgangsliste**

- Vorarbeiten:**
  - Lieferung Thermoelemente
  - Montageplan
  - CP-Daten bekanntgeben
  - Lieferung der Partikel
- Fertigung:**
  - Teilefertigung
  - Nacharbeiten
- Montage:**
  - Vormontage
  - Beladen und Hauptmontage
  - Abnahme
  - Abnahme-Unterlagen

Abb. 7.2 a:  
Aufgliederung des Projektes in Teilaufgaben oder Baugruppen im Projektstrukturplan

Abb. 7.2 b:  
Zerlegung von Teilaufgaben oder Baugruppen in überschaubare Vorgänge in Form einer Vorgangsliste

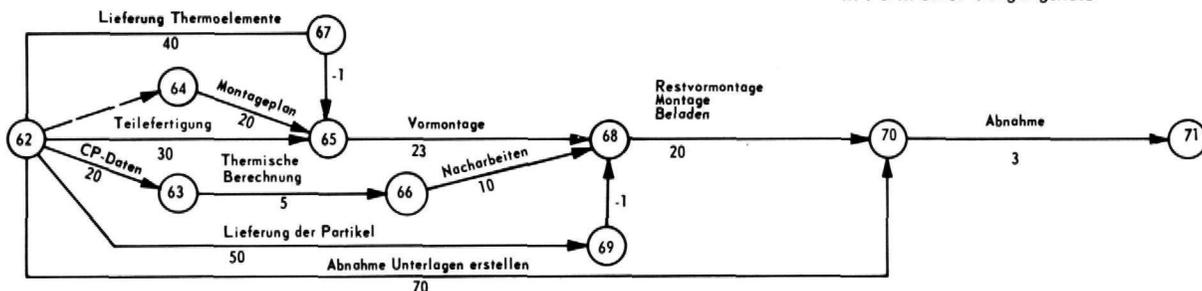


Abb. 7.3:  
Netzplan, der sich aus der Vorgangsliste und den Abhängigkeiten des Arbeitsablaufes ergibt

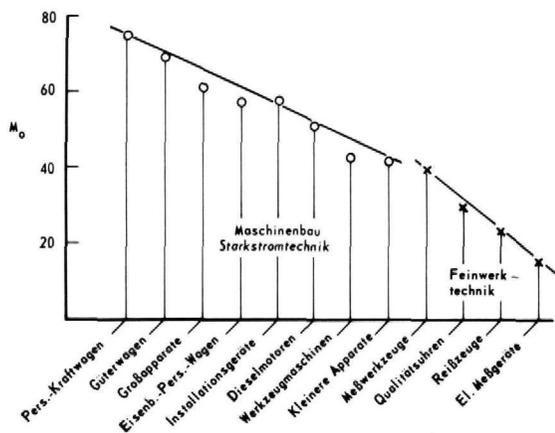


Abb. 7.4:  
Prozentualer Anteil der Materialkosten an den Herstellungskosten in verschiedenen Industriezweigen

Zur integrierten Datenverarbeitung sind leicht zu handhabende Programme erstellt worden, nach denen der Rechner z.B. alle 14 Tage die neu berechneten Daten und Fragebogen zu Terminen und Kapazitäten ausgibt.<sup>(L.2)</sup> Ferner wurde ein Verfahren ausgearbeitet, mit dem die Fehlerhäufigkeit beim Übertragen der Daten in den Rechner und die Zeit für das Zeichnen des Netzplans beträchtlich herabgesetzt wird.<sup>(L.3)</sup>

Die Nachkalkulation beruht auf der Erfassung der Lohnkosten mit Hilfe von Arbeitsstammbüchern, in die täglich die auf ein Projekt verwendete Stundenzahl eingetragen wird, und auf der Addition der Geräte- und Verbrauchsmaterialkosten. Diese Kosten sind aufgeschlüsselt nach Baugruppen, so daß die Ergebnisse sich zum Zwecke der Kostenabschätzung auf neue Projekte übertragen lassen.

Wenn solche Erfahrungswerte nicht vorliegen, greift man auf statistische Erhebungen zurück. Abb. 7.4 zeigt, daß in den

verschiedenen Branchen ein ganz bestimmtes Verhältnis zwischen den Kosten für Material (Werkstoff plus Geräte) und den Herstellungskosten besteht. Z.B. betragen bei Meßwerkzeugen die Materialkosten etwa 40 % der Herstellungskosten.

Die Nachkalkulationen im ZIR zeigen, daß man ungefähr mit einem Materialkostenanteil von 33 % rechnen muß, daß also im Schnitt die Lohnkosten nach dem von der Finanzabteilung festgelegten Satz doppelt so hoch als die Sachkosten sind.

Für die Errechnung der Materialkosten stehen Tabellenwerke des VDI zur Verfügung. Ein großer Teil der Gerätekosten läßt sich Datenblättern entnehmen. Abschätzungen der genannten Art wurden erfolgreich für die Vergabe von Fertigungsaufträgen eingesetzt.

### Geräte-Informationssystem

An Geräte für Versuchsanordnungen werden häufig spezielle Anforderungen gestellt. Die Ermittlung geeigneter Typen und ihrer Bezugsquellen kann viel Zeit und Kosten verursachen. Die Ausnutzung bereits vorliegender Geräte verlangt genaue Kenntnis der Daten, insbesondere in bezug auf Zuverlässigkeit. Zeichnungen von früher durchgeführten Konstruktionen lassen sich oft nur schwer auffinden. Angaben über Geräte in der Literatur sind meist in wissenschaftlichen Veröffentlichungen versteckt. Aus diesen Gründen ist es für den einzelnen oft sehr schwierig, die optimale Auswahl für ein benötigtes Gerät zu treffen. Diese Aufgabe kann durch ein Geräteinformationssystem wesentlich erleichtert werden.

Abb. 7.5 zeigt ein System, mit dem die entsprechenden Informationen gespeichert und rasch abgefragt werden können. Es enthält sowohl ein systematisches Verzeichnis als auch einen alphabetischen Thesaurus. Im systematischen Verzeichnis sind die Geräte in den horizontalen Spalten ihrer Energieform entsprechend (z.B. mechanisch M, hydraulisch H, pneumatisch P, elektrisch E, optisch O), in den verti-

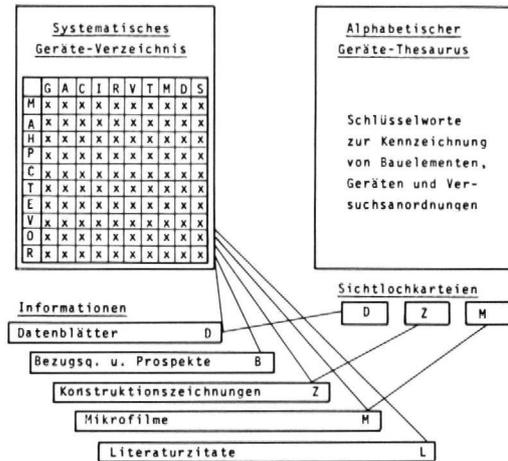


Abb. 7.5: System zum Speichern und Abfragen von Informationen über Geräte

kalen Spalten ihrer Funktion entsprechend geordnet (z.B. Generatoren G, Variatoren V, Detektoren D). Die dadurch festgelegten Funktionstypen liefern zugleich die Oberbegriffe für die Wortfamilien der Schlüsselworte des alphabetischen Thesaurus.

Das systematische Verzeichnis liefert für die vorliegenden Geräte die Nummer des Datenblattes mit den Betriebs- und Zuverlässigkeitsdaten, Bezugsquellen und zugehörigen Prospekten, Konstruktionszeichnungen auf DIN A 4, Aufnahmen auf Mikrofilmen sowie Literaturzitate.

Der alphabetische Thesaurus liefert Stichworte, mit denen man ein Gerät kennzeichnen kann. Mit Hilfe von Sichtlochkarteien oder elektronischer Datenverarbeitung kann man direkt oder über das systematische Verzeichnis die gewünschten Informationen finden.

### Konstruktionsmethodik

Beim Entwurf und bei der Konstruktion von Forschungsapparaturen kann man sich selten auf Vorbilder stützen, da die lokalen Voraussetzungen meist neue Lösungen bedingen. Bei der Erarbeitung einer neuen Lösung bleibt es nun oft dem Zufall überlassen, welchen Weg man einschlägt und ob man eine wirklich brauchbare Variante findet. Diese Zufällig-

keiten werden bei Anwendung der Konstruktionsmethodik ausgeschaltet.

Ausgehend vom derzeitigen Stand des methodischen Konstruierens, sind im ZIR Ansätze gemacht worden, die Konstruktionsmethodik an die Aufgaben des ZIR anzupassen und in die Praxis einzuführen. Ein Anwendungsbeispiel ist in den Abbildungen 7.6 bis 7.9 erläutert.

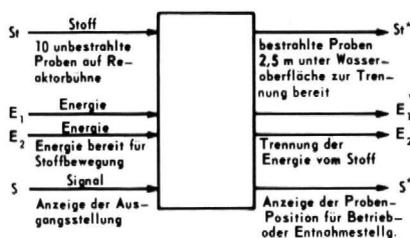


Abb. 7.6: Beschreibung der Anfangs- und Endzustände von Stoff, Energie und Signal in Form einer „black box“

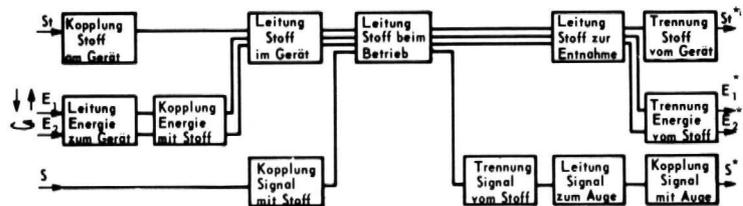


Abb. 7.7: Funktionsverknüpfung des Stoff-, Energie- und Signalflusses, dargestellt durch die Elemente Kopplung, Leitung und Trennung

	Lösungselemente für den Stoff- u. Energiefluß		
	mech.	elektr.	hydr.
Energie- Formen oder -Effekte	Speicherung Anziehung Lage-Energie Beweg.-Energie	elektromagn. Feld	Änderung des Aggregatzustands Auftrieb Druck Drall Fluten u. Leeren Strömung
Energie- Wandler	Federmotor Gewichtsmotor freier Fall Getriebe Hebel	dreh. Elektro- Motor Linear-Motor Elektromagnet	Hydraul.-Motor Freistrahlturbine Propellerturbine Seynersches Wasserrad
Energie- Quellen	Mensch Schwefelfeld mech. Maschine	Stromnetz	Wassernetz Druck-Gefälle geod. Gefälle
Energie- Leitungen	Seil Kette Harfe Welle Teleskop	Leitung (elektr.) magn. Feld drahtlos Schleifring mit Bürste	Flüssigkeits- strahl Rohr Schlauch
Stoff- Leitungen	Seil Halterung Kette endloses Band Teleskop Stange	magn. Bahn	Träger-Strömung

Abb. 7.8: Umsetzung der Elemente Kopplung, Leitung und Trennung in realisierbare Prinzipien in Form eines Morphologischen Kastens

Die Bearbeitung einer Konstruktionsaufgabe beginnt mit der Zusammenstellung der wesentlichen Forderungen in Form einer „black box“ (Abb. 7.6). Am Eingang schreibt man die vorgegebenen Formen von Stoffen, Energien und Signalen an, am Ausgang die gewünschten Endzustände, die durch das zu erstellende System erzeugt werden sollen. Im Beispiel Abb. 7.6 stehen am Eingang 10 unbestrahlte Proben, je 15 mm Ø und 3 mm dick, am Ausgang dieselben Proben in bestrahltem Zustand. Bei der Bestrahlung im FRJ-1 sollen alle Proben genau die gleiche Neutronenfluenz erhalten, was durch Einsatz in ein rotierendes System erreicht werden kann. Die Flußdichte soll durch Änderung des Bestrahlungs-ortes variiert werden. Die Proben sollen 2,5 m unter der Wasseroberfläche in einen Bleibehälter umgeladen werden. Die Bestrahlungszeit variiert zwischen 1 min und 5 h.

### Zuverlässigkeitsanalyse

Die hohen Reaktorkosten bringen es mit sich, daß ein Ausfall der Apparaturen und noch mehr eine durch sie bewirkte Reaktorabschaltung oder eine Kontamination sehr hohe Kosten verursachen (einige tausend DM pro Stunde). Deshalb wird schon der Entwurf einer Experimentiereinrichtung nach Gesichtspunkten der Zuverlässigkeit und Sicherheit untersucht.

Die Zuverlässigkeitsanalyse ergibt Aussagen über die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Anlage und ihre wahrscheinlichsten Ausfallursachen. Die Analyse wird besonders anschaulich durch die Aufstellung eines Fehlerbaumes, der eine graphische Übersicht über die Ausfallkombination der Bauteile gibt, die zu einem unerwünschten Ereignis, z.B. einem Unfall oder einem Ausfall, führen. Man verwendet dazu die in Abb. 7.10 gezeigten Symbole, mit denen Ausfälle oder zu Ausfällen führende Verknüpfungen dargestellt werden. Der Vorzug der Fehlerbaumanalyse gegenüber der üblichen Störfallanalyse liegt darin, daß sie zu einer vollständigen und systema-

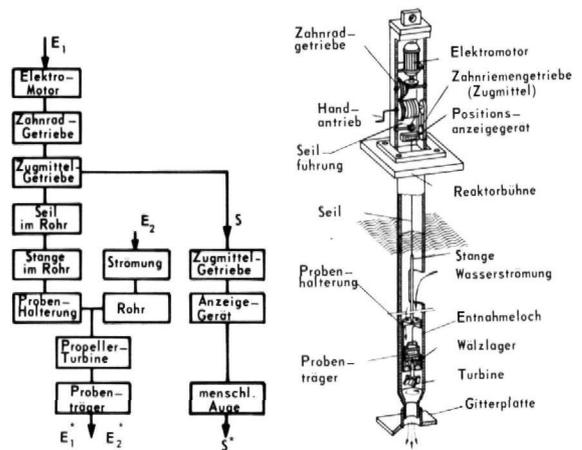


Abb. 7.9: Aussichtsreichste Lösungs-Variante, hervorgegangen durch Kombination der Elemente des Morphologischen Kastens

Diese Aufgaben lassen sich durch Funktionsketten als Stoff-, Energie- und Signalfluß darstellen (Abb. 7.7). Für den ersten groben Entwurf dieser Ketten eignen sich die von Rodenacker eingeführten Elemente Kopplung, Leitung und Trennung. Der nächste Schritt besteht im Zusammenstellen der Prinzipien, nach denen diese Funktionen realisiert werden können. Sie werden nach dem Vorschlag von Kesselring u.a. in einen „morphologischen Kasten“ eingeordnet (Abb. 7.8).

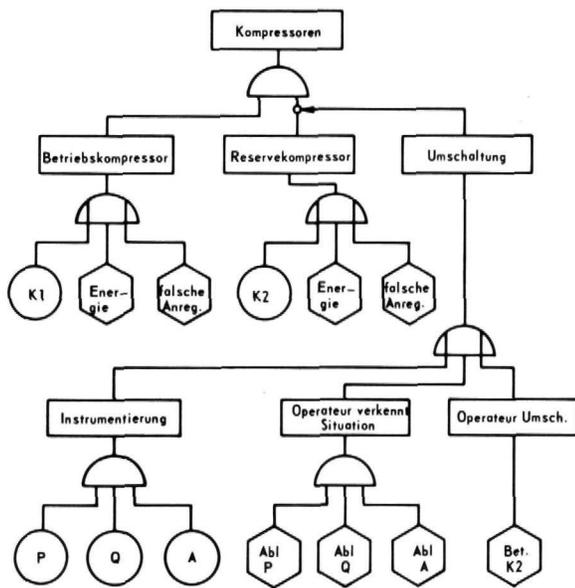
Mit dem morphologischen Kasten kann man alle Kombinationen zusammenstellen, die der Aufgabenstellung genügen. Man erhält so mehrere Lösungsvarianten. Mit Kriterien, die sich aus zusätzlichen Bedingungen ergeben, wird die aussichtsreichste Variante ausgewählt (Abb. 7.9) und über Auslegung und Optimierung fertigungsreif ausgebildet.

tischen Erfassung aller der Fehlerquellen führt, die ein definiertes unerwünschtes Ereignis verursachen.

Beispiel für eine Zuverlässigkeitsanalyse nach der Fehlerbaummethode sind die Untersuchungen des Instituts für Reaktorsicherheit e.V. in Köln an der vom ZIR errichteten Bestrahlungsanlage LV 32 in Mol, die in Zusammenarbeit mit dem ZIR durchgeführt worden sind. (L.4) Zweck dieser Analyse ist weniger die genaue Errechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit, wobei als unerwünschtes Ereignis die radioaktive Verseuchung der Reaktorhalle angegeben ist, sondern die Aufdeckung der kritischen Stellen.



Abb. 7.10: Fehlerbaum-Symbole



Dabei sind alle Komponenten Stück für Stück erfasst, sowie Ausfälle, Ausfallursachen, Ausfallraten und deren Verknüpfung zu Folgeschäden aufgelistet und im Fehlerbaumdiagramm dargestellt worden. Als Beispiel für die Fehlerbaumdarstellung zeigt Abb. 7.11 eine Kompressor-Reserveschaltung.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit, die sich nach einem vom Institut für Reaktorsicherheit gelieferten Programm errechnet, beträgt etwa  $10^{-4}$  für einen 3 monatigen Betrieb. Unter Berücksichtigung des durch den Störfall bedingten Schadenumfanges ist dieser Wert vertretbar.

Abb. 7.11:  
Zweig eines Fehlerbaumdiagramms  
(Kompressor-Reserveschaltung)

### Literaturverzeichnis zu Kapitel 7

(L.1) Haas, H.: JÜL-692-RX, Aug. 1970  
(L.2) Haas, H.: ZIR-Arbeitsbericht, Mai 1970

(L.3) Gray, R.: ZIR-Arbeitsbericht, Okt. 1970  
(L.4) Balfanz, H.P.: IRS-Bericht, Köln, Febr. 1971

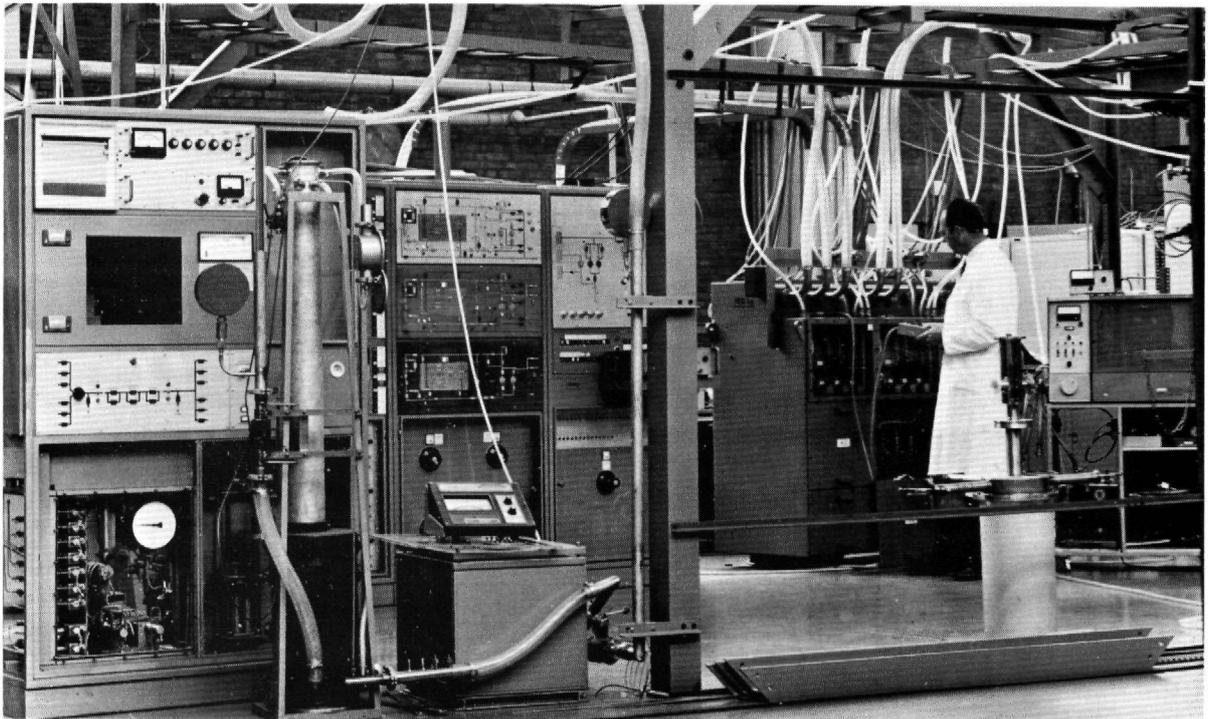


Abb. 8.0: Aufbau zum Kaltversuch der Spülkreisläufe LV 32.0 für MoI in der Technikumhalle des ZIR

## 8. Übersicht über wichtige Projekte des ZIR

Die Projekte des ZIR betreffen festinstallierte Anlagen und die für Experimente eingesetzten Versuchseinrichtungen (Abb. 8.1). Mehrere Projekte wurden im Laufe der Zeit erweitert oder mit neuen Reaktoreinschüben versehen. Der Aufwand für das Gesamtvolumen solcher Projekte erstreckt sich bis zu einigen Millionen DM. Er liegt bei mittleren Projekten bei einigen 100.000 DM.

Die Projekte lassen sich in drei Gruppen einteilen: Probenbestrahlungseinrichtungen, Rig- und Loopsysteme, Strahlrohranordnungen.

Die **Probenbestrahlungseinrichtungen (BE)** sind in der Regel festinstallierte Anordnungen mit denen Kleinproben (s. Kap. 3) bestrahlt werden können. Sie werden vor allem von der Chemie und von den Lebenswissenschaften ausgenutzt, können aber auch in der Verfahrenstechnik von großem Nutzen sein. Die meisten Anlagen wurden im ZIR entwickelt. Einige Anlagen wurden unter Ausnutzung der Erfahrungen aus Harwell von der engl. Firma Vickers-Armstrong nach den Anforderungen des ZIR gebaut und vom ZIR zur Betriebsreife gebracht. Mehrere Anlagen wurden im Laufe der Zeit auf Grund der Betriebserfahrungen erheblich verbessert.

Die **Rigs und Loops (LV)** sind Einrichtungen bei denen der Reaktoreinschub instrumentiert ist, so daß die Bestrahlungsparameter gemessen und überwacht werden können. Bei Loops schließen sich an die Einschübe aktive Kreisläufe an, die spezielle Untersuchungen ermöglichen. Besondere Bedeutung haben dabei die Kreislaufsysteme mit Meßeinrichtungen für die Bestimmung der Spaltgasemission aus pyrolytisch beschichteten Spaltstoffen (Coated Particles). Diese Versuchsanordnungen werden vor allem im Rahmen der Reaktorentwicklung eingesetzt. Mehrere Anlagen dieser Art wurden für das Institut für Reaktorwerkstoffe entwickelt und gebaut.

**Strahlrohranordnungen** sind Einrichtungen mit denen in der Regel horizontale Experimentierkanäle des Reaktors für physikalische Versuche ausgenutzt werden.

In Jülich werden vor allem Verfahren der Neutronenbeugung und der Kleinwinkelstreuung eingesetzt. Andere Versuche dienen der Kernphysik, vor allem der Untersuchung der Kernspaltung. Die Anlagen bestehen meist aus einem ausgedehnten Strahlensystem außerhalb des Reaktors mit mehreren fein verstellbaren Komponenten und schweren Abschirmungen.

### Übersicht über wichtige Projekte des ZIR

Nr.	Bezeichnung	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
<b>Bestahlungseinrichtungen</b>										
BE 1	Rohrpostanlage	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 2	Verteilerstation	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 3	Einsatzbestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 4	Trommelmagazin-Bestrahlg.	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 8	Isotopen-Bestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 9	Stahlbestrahlungsrig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 10	Kapselrig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 11	Schnelle Rohrpost	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 12	Standard-Rohrpost	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 13	Vakuumbestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 14	Tieftemperatur-Bestrahlg.	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 15	Käfigbestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 16	Flußmeßrohr-Bestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 20	Hydr. Rohrpost	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 21	Baustahlbestr.-Rig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 22	Rohrbestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 24	Kapselbestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 25	Schnelle Rohrpost	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 26	Drehtrommel-Bestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 27	Verteilerstation	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 28	Neutronen-Sonden-Rig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
BE 31	Schmierfettbestrahlung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
<b>Rigs und Loops</b>										
LV 1	Kalorimeterrig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 4	Kugel-Rig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 5	CO <sub>2</sub> -Brennstoffloop	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 6	Widerstandsmessg. an Al	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV7+8	Chemieloops	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 9	Siedewasserloop	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 10	Hochtemp.-Brennstoffloop	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 16	Dosimeter-Testrig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 17	He-Brennstoffloop	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 21	Mat.-Bestrahl.-Rig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 22	Brennstoff-Rig (CP)	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 24	Filterstation (Spaltprod.)	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 25	Suspensions-Bestrahlg.	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 26	Siedewasser-Loop	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 27	Materialbestrahlg. GFK	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 28	Spaltgasanalysekreislauf	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 30	Baukastenrig	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 31	Brennstoffrig (CP, Mol)	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 32	Spaltgasanalysekreislauf	█	█	█	█	█	█	█	█	█
LV 37	Treiberstabbestrahlg. ITR	█	█	█	█	█	█	█	█	█
<b>Strahlrohranordnungen</b>										
SV 1	Kristall-Neutronenfilter	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 2	Nebelkammer	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 3	Neutr.-Diffraktometer	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 4	Neutr.-Spektrometer	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 5	Kalte Neutr.-Quelle	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 6	Strahlenfänger-Wagen	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 7	Neutr.-Doppeldiffraktometer	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 9	Mech. Neutronenfilter	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 10	Neutr.-opt. Anordnung	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 11	Massenseparator	█	█	█	█	█	█	█	█	█
SV 20	Kleinwinkelstreuepparat	█	█	█	█	█	█	█	█	█
MV1/4	γ+Neutr.-Flussmessung	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Entwicklung und Fertigung
  Betrieb und Wartung
  Weiterentwicklung

Abb. 8.1

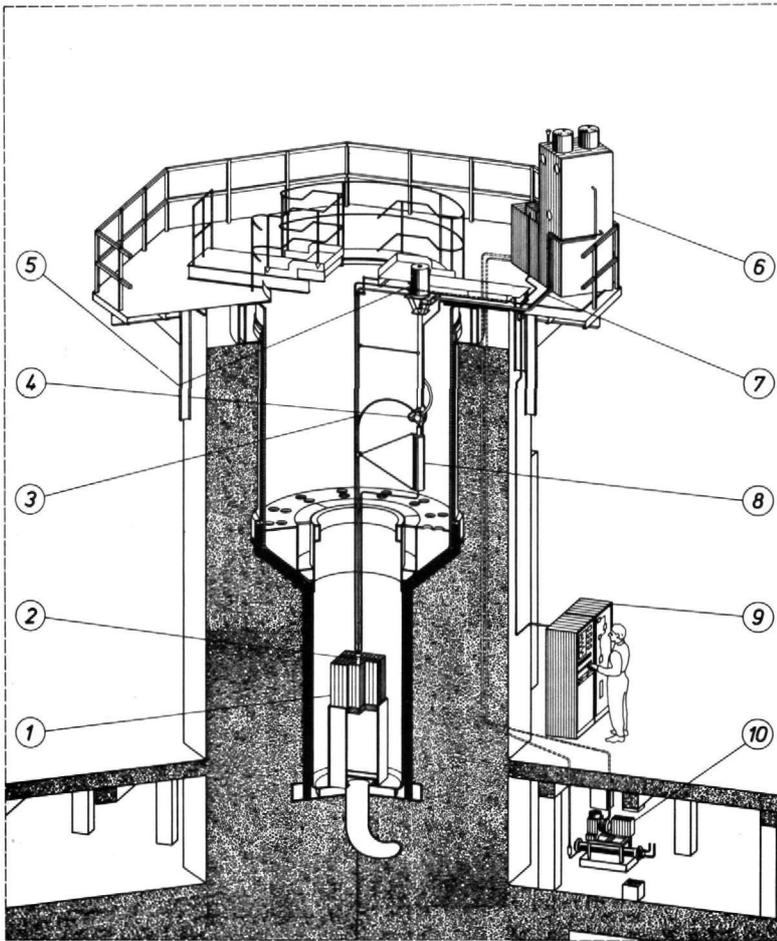


Abb. 8.2:  
 Dosimetertestrig LV 16 A mit Außenkreisläufen und Instrumentierung am FRJ-1  
 1) Reaktorkern 2) Bestrahlungseinsatz 3) Rohrpostsystem 4) Abklingschleuse  
 5) Transportbehälter 6) Kreislaufschrank 7) Kühl- und Heizleitung  
 8) Verzögerungsbehälter 9) Instrumentierung 10) Kälteaggregat

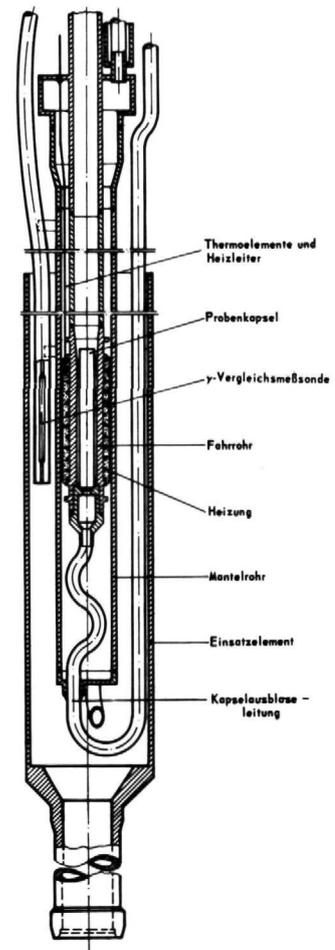


Abb. 8.3:  
 Corebereich des Reaktoreinschubs LV 16 A für die Bestrahlung von Dosimeter-sonden  
 (siehe Abb. 8.2, Pos. 2)

## Dosimetertestrig LV16A

Bei Gammadosismessungen in Kernreaktoren mit nicht nuklearen Sonden muß der Einfluß der Temperatur bekannt sein. Zu seiner Bestimmung war ein Testrig zu bauen, mit dem eine große Zahl von Einzelbestrahlungen am FRJ-1 bei Temperaturen zwischen 40 °C und 300 °C durchgeführt werden kann. Es sollte sich außerdem für allgemeine Probenbestrahlungen einsetzen lassen (Abb. 8.2). (L.1)

Bei der Entwicklung waren zwei Aufgaben zu lösen. 1. Der Transport der Probe zum Bestrahlungsort am Reaktorkern. 2. Die Einstellung einer bestimmten Probestemperatur während der Bestrahlung. Für den Transport erschien ein pneumatisches Rohrpostsystem besonders geeignet. Für die Temperierung, d.h. die Einstellung der Temperatur zwischen 40 °C und 100 °C mußte vorgekühltes Wasser verwendet

werden; für den Temperaturbereich von 100 bis 300 °C ist das Wasser durch CO<sub>2</sub>-Gas zu ersetzen. Das Rohrpostsystem transportiert mit einem Helium-Gasstrom die Probenkapsel in den im Corebereich befindlichen Reaktoreinschub (Abb. 8.3). Dieser enthält als unteres Ende des Kapsel-Fahrrohres die Bestrahlungsposition mit der Temperierung. Hierzu ist das Fahrrohr mit Heizleitern und Thermoelementen versehen, die durch Flamm-spritzen in Aluminium eingebettet sind. Mit dem Mantelrohr bildet dieser Heizkörper einen Ringspalt, der zur Einstellung der Bestrahlungstemperaturen wahlweise von Wasser oder CO<sub>2</sub> durchströmt wird. Die Einstellung der gewünschten Probestemperatur erfolgt durch die Instrumentierung, die über ihre Regelsysteme die elektrische Heizung und das entsprechende Temperiersystem für das Medium im Ringspalt ansteuert.

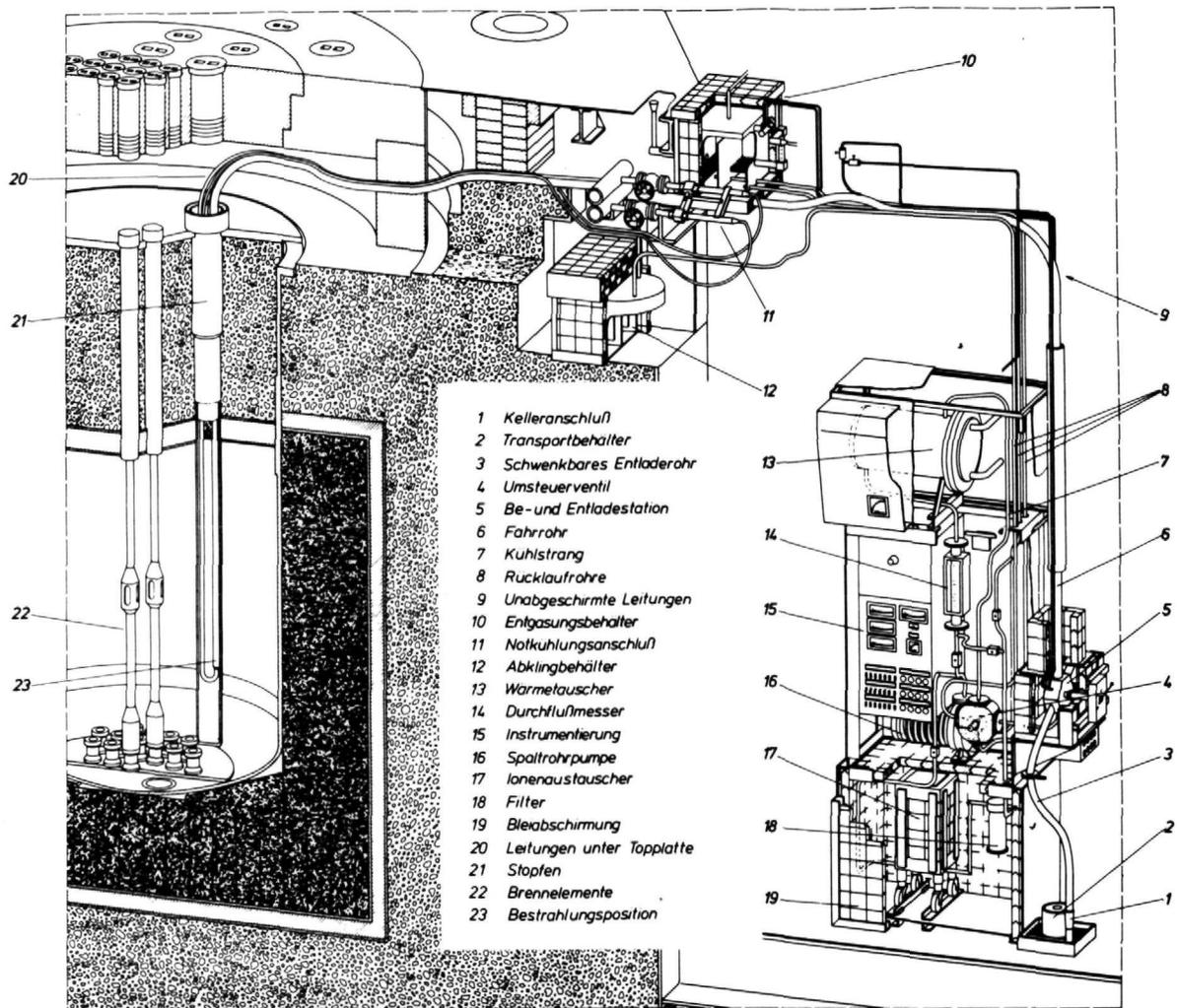


Abb. 8.4:  
Hydraulische Rohrpost zur Bestrahlung großer Probenvolumen  
bei niedrigen Temperaturen unter 20°C

## Hydraulische Rohrpost BE20

Bei Probenbestrahlungen für die medizinische Forschung werden Bestrahlungseinrichtungen benötigt, die folgende Bedingungen erfüllen:

- Hohe thermische Neutronenflußdichte (ca.  $10^{14} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ );
- niedrige Temperaturen während der Bestrahlung (unter 20 °C);
- kurze Transportzeiten zur Bestrahlungsposition und zurück zum Meßplatz (ca. 15 s);
- große Probenvolumen bis zu  $30 \text{ cm}^3$ .

Eine Einrichtung, die gleichzeitig alle vier Forderungen er-

füllt, war nicht bekannt. Alle bekannten Einrichtungen ergeben vor allem wesentlich höhere Bestrahlungstemperaturen. Die verlangte Temperatur läßt sich bei der hohen Flußdichte nur durch Kühlung mit einer strömenden Flüssigkeit erzielen. Das bedeutet, daß als Einrichtung nur eine hydraulische Rohrpostanlage geeignet ist.

Für den vorliegenden Zweck muß die Anlage in erster Linie den Transport und die Kühlung der Probe übernehmen. Ein sicherer Betrieb verlangt zusätzlich eine laufende Reinigung des Mediums, das Ein- und Ausschleusen der Probe und eine Notkühlung (Abb. 8.4). (L.2,3)

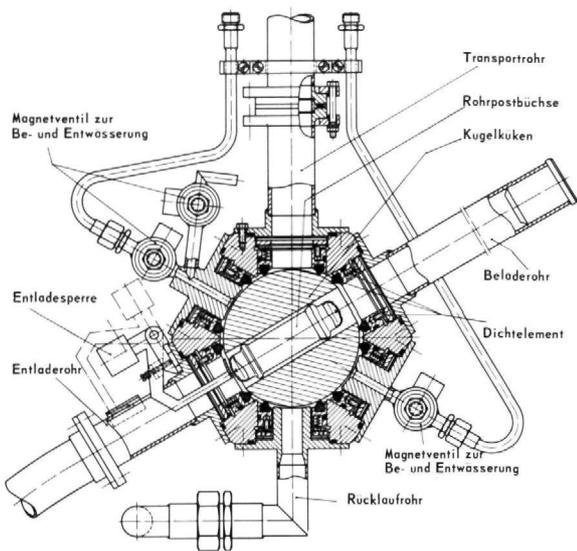


Abb. 8.5: Schnitt durch das Be- und Entladeventil. Die Bestrahlungskapsel wird in ca. 15 s im tropffreien Zustand aus dem Wasserkreislauf geschleust.

Der Transport der Rohrpostbüchse mit der darin enthaltenen Probe erfolgt in einem Leichtwasserkreislauf, der durch eine Kreiselpumpe in Gang gehalten wird. Die durch die nukleare Aufheizung des Bestrahlungseinschubes erzeugte Wärme wird in einem Wärmetauscher abgeführt, durch den der volle Kreislaufstrom kontinuierlich geleitet wird. Die Temperatur des Kreislaufwassers kann im Wärmetauscher auf jeden Wert zwischen 60 °C und 4 °C eingestellt werden. Der Wärmetauscher ist sekundärseitig an ein Kälteaggregat mit 10,7 kW Leistung angeschlossen. Die Rückkühlung erfolgt an das Reaktorkühlsystem. Zur Reinigung kann das Kreislaufwasser durch entsprechende Schaltung ganz oder teilweise über einen Ionentauscher und ein mechanisches Filter geleitet werden.

Beim Einschleusen der Rohrpostbüchse in den Kreislauf ist es erforderlich, sämtliche Hohlräume des Be- und Entladeventils einschließlich der darin liegenden Transportbüchse mit Wasser zu fluten, damit alle Luft aus diesen Räumen entweicht. Vor dem Ausschleusen müssen umgekehrt die Rohrpostbüchse und die Ventilräume entwässert und durch einen Stickstoffstrom tropfenfrei geblasen werden. Zu diesem Zweck mußte ein spezielles Kugelventil (Abb. 8.5) entwickelt werden, das inzwischen auch bei anderen Anlagen (z.B. LV16) verwendet wird.

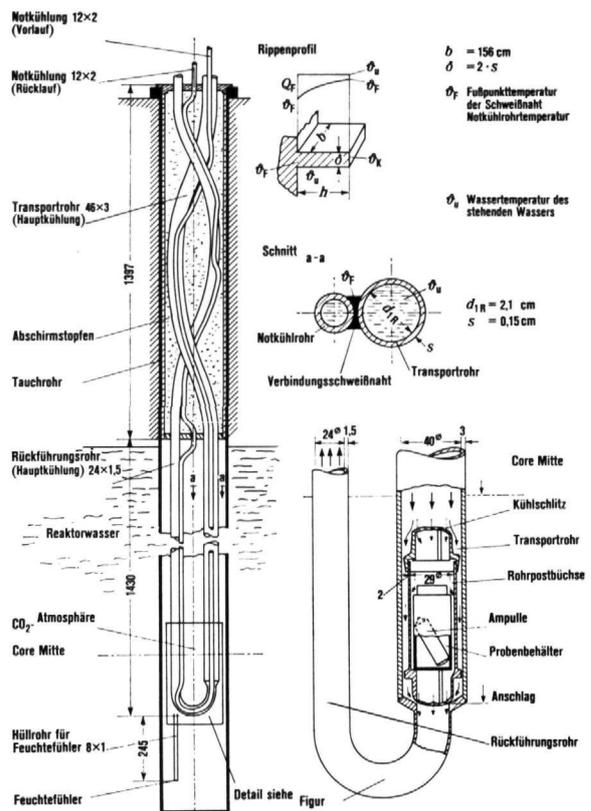


Abb. 8.6: Strahlrohrein Schub Hydraulische Rohrpost. Die im Detail dargestellte Rohrpostbüchse wird auch in Bestrahlungsposition von Kühlwasser durchströmt.

Bei Ausfall der Hauptkühlung schützt die Notkühlung den Strahlrohrein Schub vor der Zerstörung, ohne daß eine Abschaltung des Reaktors in Kauf genommen werden muß. Die Notkühlung besteht aus einer Rohrschlange, die auf das Rohrsystem des Transportrohres aufgeschweißt ist (Abb. 8.6) und vom Experimentierkühlkreislauf des Reaktors gespeist wird. Der Notkühlwasser-Durchsatz beträgt etwa  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Temperatur des Transportrohres bleibt unter 50 °C. Die Wärmeübertragung vom Transportrohr zum Notkühlrohr kann nach der Rippenformel berechnet werden.

Die Rohrpostbüchse wird vom Wasserstrom aus dem Be- und Entladeventil bis zur Bestrahlungsposition im Strahlrohrein Schub befördert und dort gegen einen Anschlag gepreßt. Dabei wird die perforierte Rohrpostbüchse laufend von Wasser durchströmt, so daß die Probe direkt gekühlt wird. Die Temperatur der Probe hängt vom Temperatursprung in der Kapsel und dieser vom Wärmekontakt zwischen Kapsel und Probe sowie der von der Probe aufgenommenen Wärmeleistung ab.

Aufgrund der räumlichen Voraussetzungen mußte das gesamte Kreislaufsystem einschließlich Instrumentierung auf kleinstem Raum untergebracht werden. Abb. 8.4 zeigt, daß dazu alle auf dem Weg liegenden freien Nischen und Luken in der Reaktorabschirmung ausgenutzt werden mußten.

## Rigs für verschiedene Bestrahlungsvorhaben

Die zu bestrahlenden Proben haben unterschiedliche Formen und Größen. Es können Particles von 0,6 mm oder Kugeln von 60 mm Durchmesser oder Stäbe von 200 mm Länge sein. Die Bestrahlung erfolgt in Kontakt mit bestimmten Medien wie Gasen, Graphit oder Natrium. Dabei müssen bestimmte Parameter, z.B. die Temperatur, gemessen und variiert werden können. Die Querschnitte, die für die konstruktive Ausführung des Einsatzes zur Verfügung stehen, variieren entsprechend den geforderten Flußdichten und ReaktorKanälen. Deshalb ist praktisch für jedes Bestrahlungsvorhaben ein spezielles Rig erforderlich. (L.4)

Für ähnliche Bestrahlungsproben oder Bestrahlungsprogramme wird der Einsatz von Rigtypen nach dem Baukastensystem angestrebt, wodurch sowohl die Zeit für Entwicklung und Bau als auch die Kosten verringert werden. Die Kombination der verschiedenen vorgefertigten Rig-Systemteile in Verbindung mit einigen speziellen Bauteilen ergibt eine große Variationsbreite für die Anwendung. Für die Bestrahlung wird die jeweilige Rigvariante an eine zu dem System gehörende Instrumentierung angeschlossen, die das entsprechende Meß-, Regel-, Steuer- und Sicherheitssystem enthält. Beispiele für Rigsysteme in Baukastentechnik sind LV30 für den FRJ-2 und LV37 für den FRJ-1.

Die Rigs müssen die volle, geforderte Bestrahlungszeit durchstehen, ohne daß, wie bei den out of pile-Komponenten, eine Reparatur oder Behebung von Schäden möglich ist. Dabei betragen die Bestrahlungsdauern oft über 12 Monate, während denen hohe Dosen an Schnellen Neutronen und Gammastrahlung, Temperaturschocks als Folge von Reaktor-An- und Abschaltungen und starke Angriffe auf die Konstruktionsmaterialien durch Gase und Flüssigkeiten ertragen werden müssen.

Abb. 8.7 zeigt drei Rigtypen:

- Rig für die Bestrahlung von 5 bis 7 Kugelbrennelementen im Rahmen des THTR-Programms. Die Kugeln sind von einer Graphitmatrix eingefast und von Spülgas umströmt, so daß freigesetzte Spaltgase abtransportiert werden. Sie sind mit Thermoelementen instrumentiert. Für die Temperaturregelung wurde die Gasmischregelung eingesetzt, die nur geringen Aufwand und Bauraum in der Bestrahlungskapsel erfordert. (L.5)
- Ein im Rahmen des THTR-Programms eingesetztes Rig für die Bestrahlung von Coated Particles (mit Pyrokohlenstoff beschichteten Spaltstoffpartikel) in Einschichtanordnung in einem Ringspalt. (L.6)
- Rig zur Untersuchung des Massentransportes von Graphit in einem  $\text{CO}_2$ -Gasstrom, der von einem Kreislauf auf 500 °C und 60 bar gehalten wird.

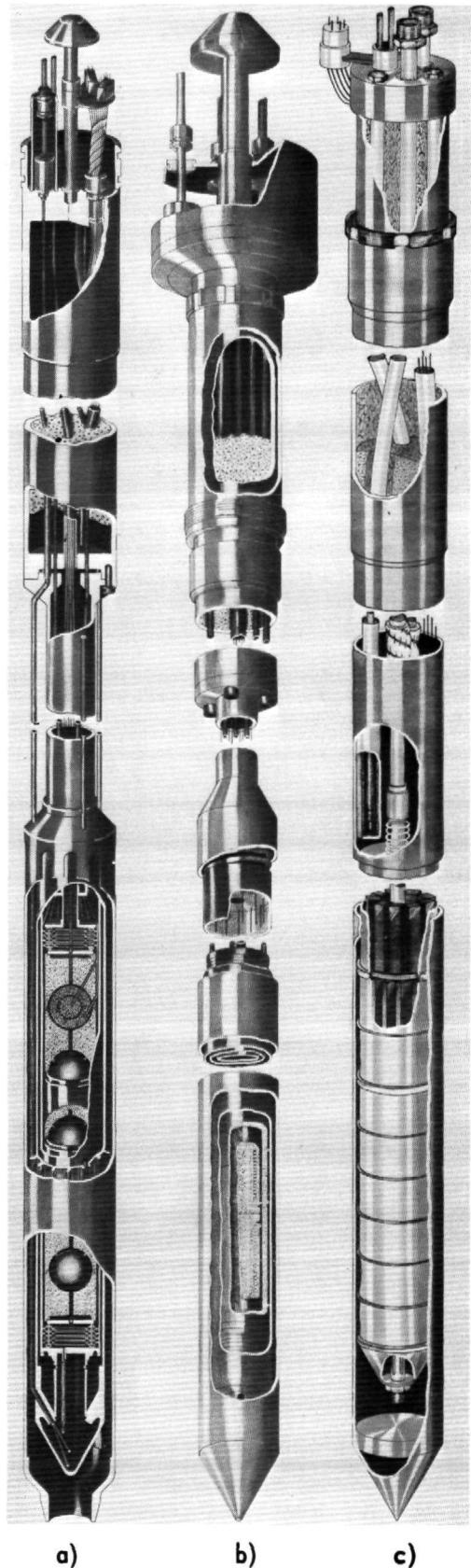


Abb. 8.7:  
Rigs für verschiedene Bestrahlungsvorhaben

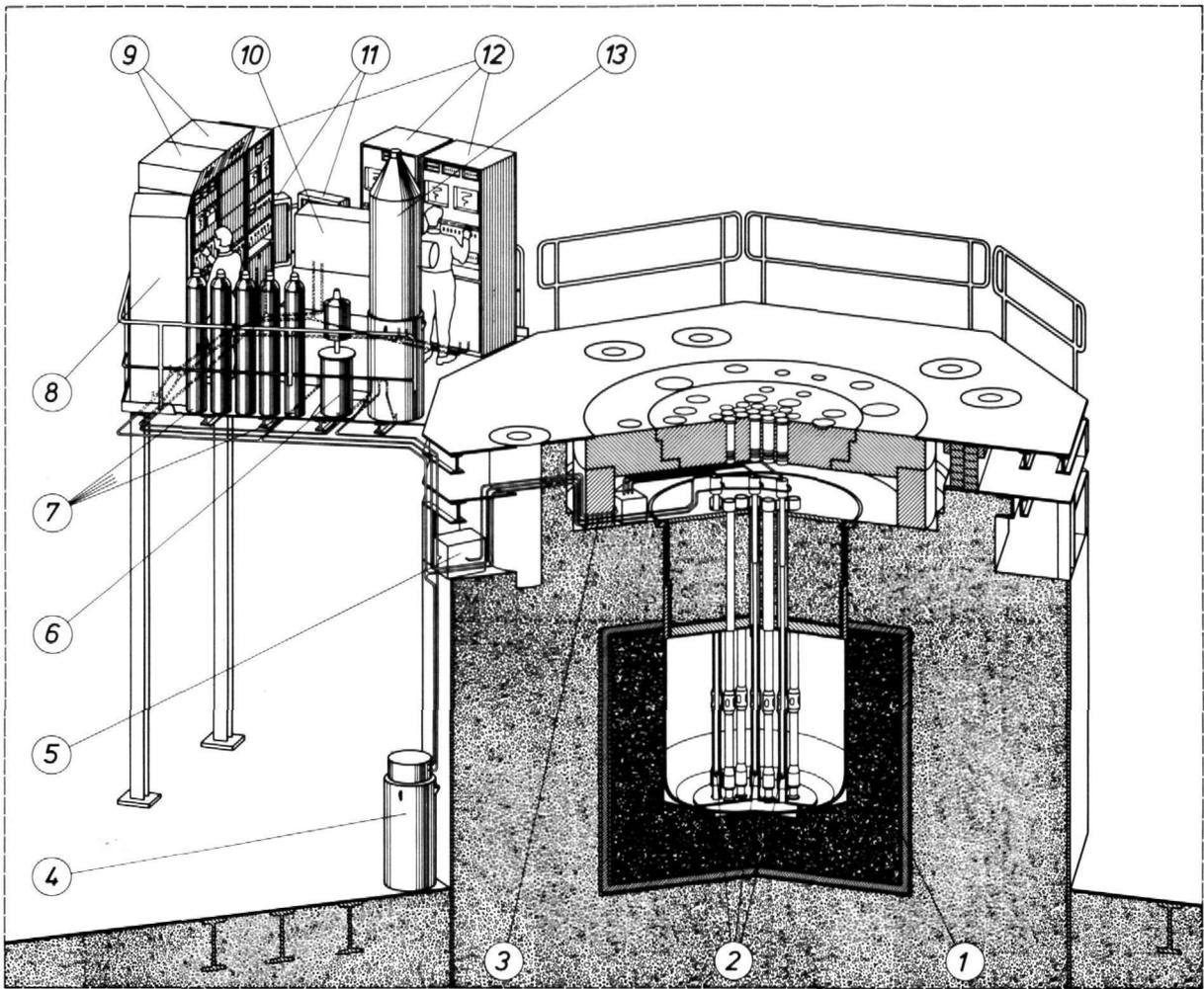


Abb. 8.8:  
 Bestrahlungseinsätze für beschichtete Teilchen mit Spülkreisläufen LV 28 und Instrumentierung am FRJ-2  
 1) FRJ-2 Tank 2) Brennstoff-Rigs 3) Rig-Leitungen 4) Abklingfalle 5) Leitungsverzweigung  
 6) Halbleiterdetektor 7) Gasversorgung 8) Gasanalyse 9) Instrumentierung  
 10) Handprobenentnahme und Kreislaufschränke 11) Temperaturregelsystem 12) Instrumentierung der Rigs  
 13) Spaltgaskühlfalle

## Rigs und Spülkreisläufe LV28

Für das THTR-Programm wurden komplette Bestrahlungseinrichtungen am FRJ-2 entwickelt, bestehend aus verschiedenen Rig-Typen LV4, LV22, LV30 mit Gasgemisch-Temperaturregelung und Spülkreisläufen LV28 mit Handprobenentnahmestation. (L.9,10) Abb. 8.8 zeigt diese Anlage am DIDO, wo sie zur Erzielung von kurzen Gas-Transportzeiten auf einer speziellen Bühne am Reaktortop aufgestellt ist. Die Anlage ist seit 4 Jahren in Betrieb.

Der prinzipielle Aufbau der Bestrahlungsanlage ist in Abb. 8.9 dargestellt. Der Kompressor fördert das als Spülgas verwendete Helium durch die Gasreinigung zu den angeschlossenen Bestrahlungskapseln in den Rigs. Es können 3 Rigs mit insgesamt 10 Kapseln gespült werden. Das Spülgas transpor-

tiert die Spaltgase aus den Bestrahlungskapseln in die Meßstation mit Handprobenentnahme. Über die Abklingfalle für kurzlebige Aktivitäten schließt sich der Gaskreislauf. Mit dem Bypass kann die Meßstation umgangen werden. Die Spülung aller Kapseln soll kontinuierlich erfolgen, um durch die ausgespülten gasförmigen Spaltprodukte die zeitliche Freisetzung der einzelnen Isotope messen zu können. Hieraus werden dann die Release/Birth-Werte (R/B-Wert), d.h. das Rückhaltevermögen für die gasförmigen Spaltprodukte in Abhängigkeit von bestrahlter Charge und Bestrahlungsprogramm bestimmt. Wesentlicher Bestrahlungsparameter ist die Probenentemperatur, die mittels der Gasgemisch-Temperaturregelung auf einem konstanten Sollwert gehalten oder im Rahmen des Bestrahlungsprogrammes z.B. für Thermoschockuntersuchungen zwischen zwei Werten zyklert wird.

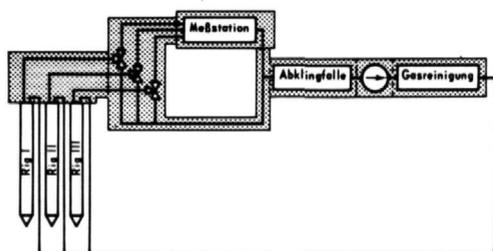


Abb. 8.9: Prinzipdarstellung des Spülkreislaufes LV 28

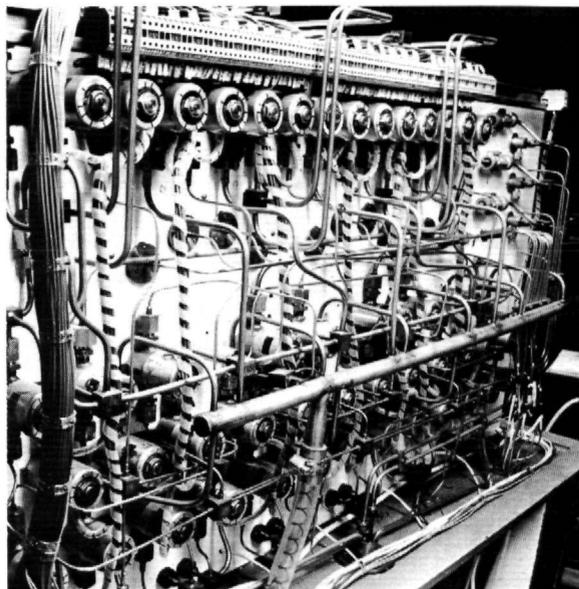


Abb. 8.10: Rückseite der Meßstation LV 28 für Handprobenentnahme bei geöffnetem Second Containment

Da die Spülkreisläuferadioaktive Gase aus dem Reaktor in die Experimentierhalle führen, ist für alle Spaltgas führenden Baugruppen ein Second Containment (überwachte doppelte Einschließung) und teilweise auch eine Abschirmung erforderlich. Zur Vermeidung von Abschirmungen an den Baugruppen Kompressor und Gasreinigung ist eine Abklingfalle installiert, die mit Aktivkohle bei Raumtemperatur den Weitertransport der Spaltgase für mehrere Stunden verzögert und damit die Aktivität der kurzlebigen reduziert.

Das Spülgas transportiert die gasförmigen Spaltprodukte aus der Bestrahlungskapsel in die Handprobenentnahmestation, wobei jede Kapsel eine separate Spülleitung hat. Aus dem Spülgasstrom werden spezifische Gasproben in Volumenbehältern oder Adsorbern entnommen, aus der Entnahmestation ausgeschleust und zur gammaspektrometrischen Analyse in ein Aktivlabor außerhalb der Reaktorhalle abtransportiert. Bis auf das im Handbetrieb ausgeführte Ein- und Auskuppeln der Volumenbehälter oder Adsorber im Handschuhkasten erfolgen die Steuerungen der verschiedenen Spülgasströme mittels Magnetventilen.

Abb. 8.10 zeigt die Rückseite der Handprobenentnahmestation bei geöffnetem Second Containment. Für die wirtschaftliche Fertigung derartiger vernetzter räumlicher Verrohrungen wurde eine spezielle Technik mit Rohrnetzplänen und Drahtmodellen entwickelt.

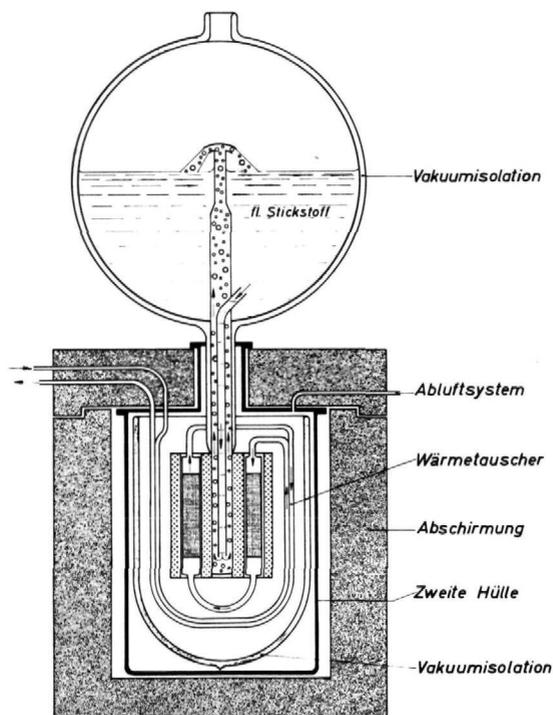


Abb. 8.11: Schematische Darstellung der durch flüssigen Stickstoff gekühlten Falle GF3

An die chemische Reinheit des Spül gases werden hohe Anforderungen gestellt; der Anteil der Verunreinigungen soll kleiner als 10 ppm betragen. Die Gasreinigung wurde entsprechend ausgelegt und dazu speziell mit einer Vielfachumwälzung ausgerüstet. Die Gasreinheit wird mit Gaschromatographen und Hygrometer überwacht.

Eine wesentliche Funktion der Spülkreislaufsysteme ist die Reinigung des Spül gases von radioaktiven und chemischen Verunreinigungen. Dieses geschieht mittels geheizter CuO-Betten, Molekularsiebkolonnen und tiefgekühlter Aktivkohle. Letztere soll besonders Xe und Kr, aber auch  $N_2$  und  $O_2$  adsorbieren.

Hierfür wurde die sehr kompakte und betriebssichere Falle GF3 entwickelt (Abb. 8.11), die inzwischen auch in großer Zahl an anderen Experimenten verwendet wird. Die Falle kombiniert Kühlung, Heizung zum Regenerieren, Wärmetauscher, Second Containment und Abschirmung. In einer Baugruppe können die Fallen für 3 Spülkreisläufe eingebaut werden. Ohne zusätzliche Regelung erfolgt über das nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren aufgebaute Fallrohr eine gleichmäßige Temperierung aller Fallen, solange noch flüssiger Stickstoff im Vorratsbehälter enthalten ist. Die Ausbildung dieser Stickstoffkühlung ermöglicht außerdem ein konsequentes Second Containment gegen Spaltgasaustritt im Störfall.

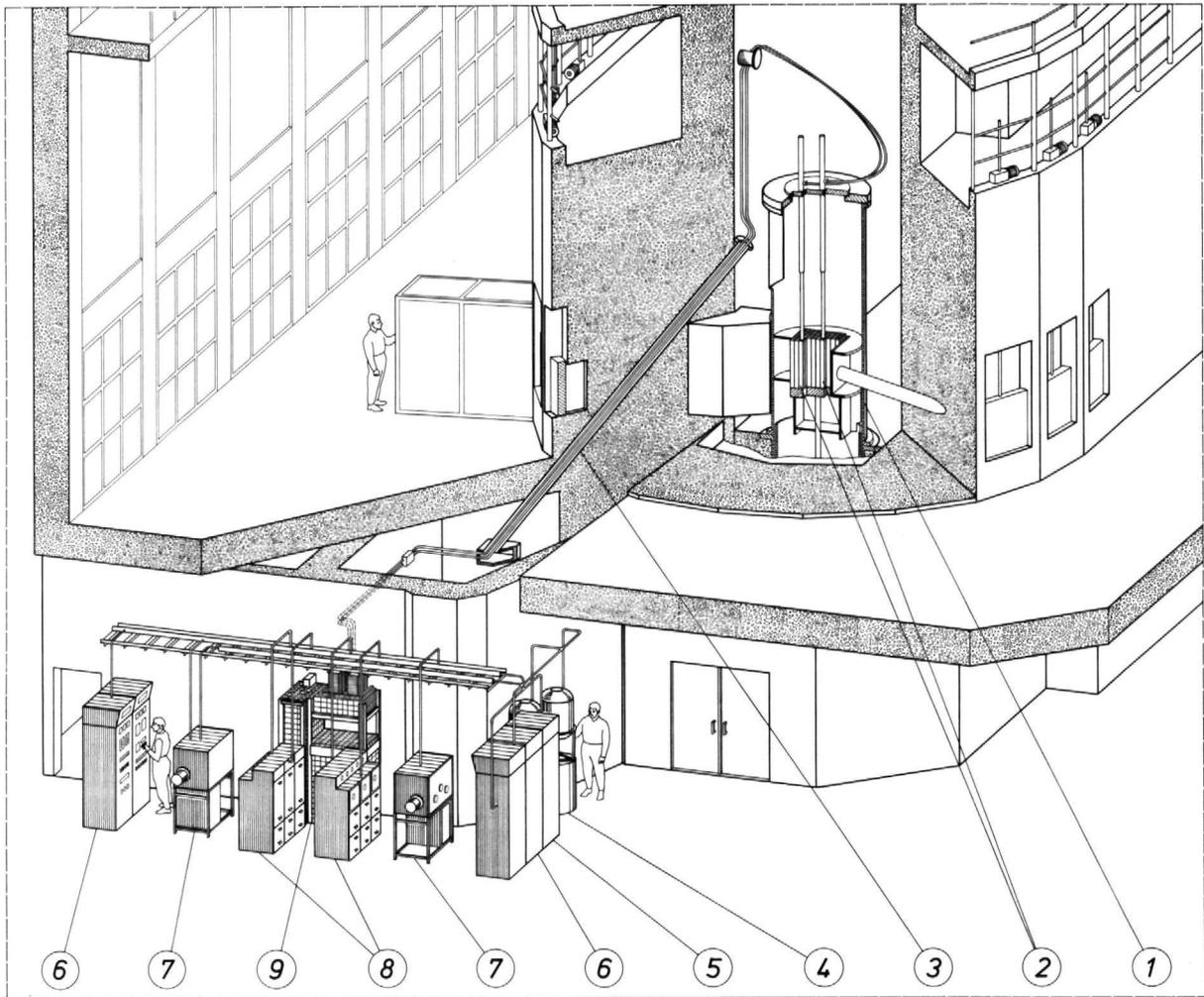


Abb. 8.12:  
 6 Spülkreisläufe LV 32.1 mit Instrumentierung und Handprobenentnahmestation  
 am Hochflußreaktor R2 in Studsvik  
 1) R2-Tank 2) Brennstoff-Rigs 3) Schwedenrohr mit Leitungen  
 4) Spaltgaskühlfallen 5) Gasanalyse 6) Instrumentierung Spülkreisläufe  
 7) Handprobenentnahme 8) Kreislaufschränke 9) Monitore,  
 Abklingfallen und Leitungsverzweigung

### Bestrahlungsanlage für Coated Particles LV32.1 für den Hochflußreaktor R2 in Studsvik/Schweden

Die Anlage besteht aus 6 Spülkreisläufsystemen, die in Verbindung mit 2 Rigs der Reaktorstation Studsvik betrieben werden. (L.11)

Die Anlage wurde in Jülich geplant, gefertigt, in 2 Ausbaustufen in Studsvik montiert und nach Einarbeitung an das schwedische Schichtpersonal übergeben (Abb. 8.12).

Die Spülkreisläufe LV32 stellen eine Weiterentwicklung auf der Grundlage des Spülkreisläufsystems LV28 dar. Sie sind im Hinblick auf die stets beengten Raumverhältnisse in den Reaktorhallen sehr kompakt konstruiert, ohne dabei die War-

tung zu erschweren. Die Konzeption der gesamten Anlage mit Second Containments und Abschirmung ermöglicht die freistehende Aufstellung im Reaktorgebäude.

Voraussetzung für die kompakte Bauweise, verbunden mit einer Steigerung der Betriebs-Verfügbarkeit der gesamten Anlage, war die Beschaffung eines neuen Gaskompressortyps. Allgemein üblich war bisher die Verwendung von langsamlaufenden Metallmembrankompressoren. Ein Reservekompressor konnte wegen der großen Abmessungen nicht vorgesehen werden.

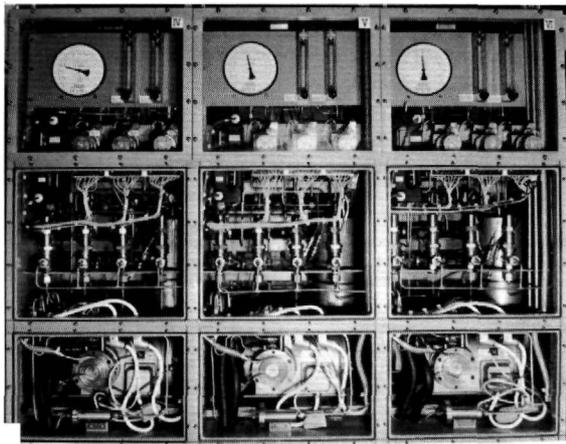


Abb. 8.13:  
Baugruppe von 3 Kreislaufschranken LV 32 (mit geöffnetem Second Containment). Im unteren Teil sind je 2 schnelllaufende Membrankompressoren hintereinander angeordnet. Darüber befinden sich diverse Armaturen zur Steuerung des Spülgasstromes.

In Zusammenarbeit mit der Industrie wurde ein schnelllaufender Kompressor mit Kunststoffmembran für diesen Anwendungsfall entwickelt. Dieser Kompressor bringt bei gleicher Leistung eine Platzersparnis von ca. 90 %, der Wartungsaufwand sank auf 10 %.

Die Armaturen von 3 Kreisläufen mit ihren Second Containments sind in einer Baueinheit (Abb.8.13) zusammengefaßt. Dabei verfügt jeder Kreis über zwei Kompressoren, wovon einer als Reserve die Verfügbarkeit der Anlage erhöht. Da die Kompressoren im abgeschlossenen Second Containment laufen, sind sie zur Abfuhr der entstehenden Betriebswärme mit einer Wasserkühlung ausgerüstet worden. Lecks in dem Wassersystem lösen über einen Leckfühler in der Sicherheitsinstrumentierung einen Alarm aus, sperren die weitere Wasserzufuhr und schalten bei Übertemperatur den Kompressorantrieb ab.

Einige Geräte für spezielle Aufgabenstellungen waren nicht am Markt zu beschaffen und mußten deshalb entwickelt werden. Hierzu zählt u.a. ein elektromotorisch angetriebenes Stellventil für kleine Durchflußraten, eine kontinuierliche Niveauanzeige für flüssigen Stickstoff in Vorratsbehältern mit engen Einfüllöffnungen, ein Leckfühler für Kühlwasserlecks, ein quasi-kontinuierlich arbeitender Helium-Neon-Gemischmessgerät für hohe Systemdrücke und ein Gaschromatograph mit indirektem Nachweis im ppm-Bereich. Die Bestrahlungsanlage LV32.1 in Studsvik ist noch mit einer Handprobenent-

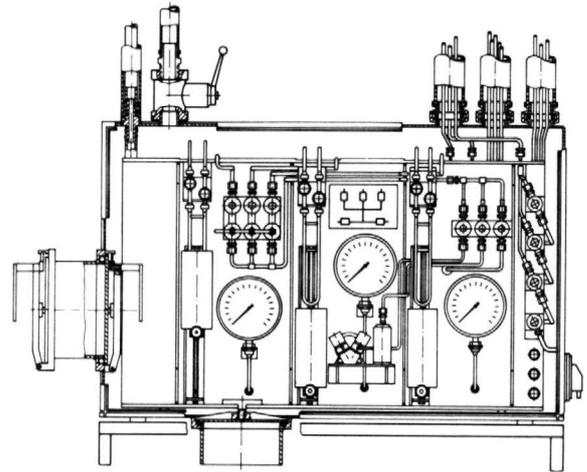


Abb. 8.14:  
Schnittbild durch die Glove-Box der Handprobenentnahmestation LV 32.1 für 3 gespülte Bestrahlungskapseln. Die Spaltgase werden in den U-förmigen Fallen bei tiefen Temperaturen adsorbiert, in einem Behälter (Mitte unten) überführt und zur Labormessung ausgeschleust.

nahmestation (Abb. 8.14) ausgerüstet. In einer Glove-Box sind die U-förmigen Adsorptionsfallen für 3 Spülkreise enthalten. Das in diesen Fallen durch Kühlung mit flüssigem Stickstoff adsorbierte Spaltgas wird in einen Volumenbehälter oder einen elektrostatischen Präzipitator übergeführt und dann aus dem Handschuhkasten zur Labormessung ausgeschleust. Dieses System stellt eine Weiterentwicklung der Probenentnahmestation LV28 in Zusammenarbeit mit ABA Studsvik dar.

Bei der Entwicklung der Anlage für Studsvik mußten der Transport über große Entfernung einschließlich Verschiffung und die Montage am Ort im voraus berücksichtigt werden. Die Anlage wurde konstruktiv so konzipiert, daß sie aus mehreren baulich getrennten Gruppen besteht, die untereinander durch Verkabelungen und Verrohrungen verbunden sind. Der Aufbau zum Kaltversuch im ZIR in Jülich wurde den lokalen Verhältnissen in Studsvik genau nachgebildet. Nach dem abgeschlossenen Kaltversuch wurden nur die Verkabelungen und Verrohrungen von den Baugruppen gelöst und das gesamte Material in einer Sonderverpackung mit einem luftgefederten Lastkraftwagen nach Schweden transportiert. Dort wurden nach der Aufstellung ohne irgendwelche Anpassungsarbeiten Kabel und Rohre wieder montiert. Anschluß, Überprüfung und Inbetriebnahme erfolgte durch Jülicher Personal innerhalb von vier Wochen.

Die Anlage ist seit Februar 1970 mit 3 Kreisläufen und seit September 1970 mit 6 Kreisläufen in Betrieb.

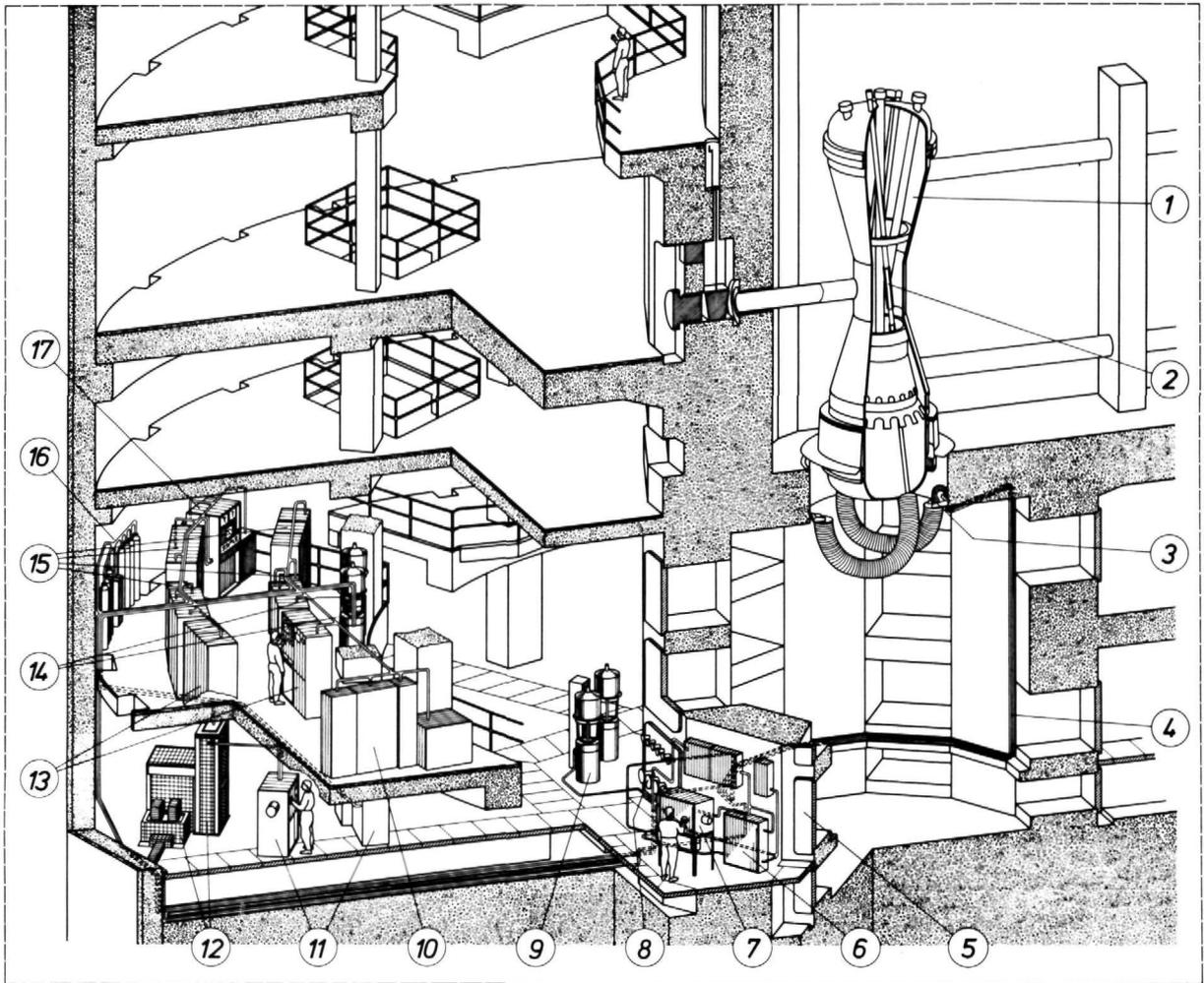


Abb. 8.15:  
 6 Spülkreisläufe LV 32.0 mit Instrumentierungen, automatischer Spaltgas-Meßstation mit Rechner und Mischgasapparatur LV 31 am Hochflußreaktor BR2 in Mol  
 1) BR2-Tank 2) Brennstoff-Rig 3) Rig-Anschlüsse 4) Leitungen 5) Sicherheitsabsperrung  
 6) Reglerkasten 7) Gaskontrolle 8) Schottdurchführungen 9) Spaltgaskühlfalle  
 10) Prozeßrechner 11) Meßstation 12) Monitore 13) Temperatur-Regelsystem  
 14) Spaltgaskühlfallen 15) Spülgaskreislauf und Instrumentierung 16) Gasversorgung 17) Gasanalyse

### Bestrahlungsanlage für Coated Particles LV32.0 am Hochflußreaktor BR2 in Mol/Belgien

Für den Reaktor BR2 wurde mit der Variante LV32.0 die fortschrittlichste Bestrahlungsanlage für Coated Particles entwickelt.<sup>(L.12)</sup> Sie umfaßt 2 Rigs mit je 3 gespülten und temperaturgeregelten Kapseln, 6 Spülkreisläufe und die automatische Meßstation für die Spaltgasspektrometrie (Abb. 8.15).

Das Fließschema mit Kreislaufeinheit K I-III, den Verzögerungsfallen GF1, tiefgekühlten Aktivkohlefallen GF3, Meßstation Me, Rohrverzweigung GV, chemische Gasanalyse G, Ver- und Entsorgung und den dazugehörigen Second Containers zeigt Abb. 8.16. Hierbei ist nur die erste Ausbaustufe dargestellt, in der die 3 Kreislaufeinheiten K IV-VI und

eine tiefgekühlte Aktivkohlefaller GFIII/IV-VI noch nicht enthalten sind. Die einzelnen Baugruppen sind weitgehend identisch mit den in Studsvik installierten. Den wesentlichen Unterschied stellt die Art des Spaltgassnachweises dar.<sup>(L.13)</sup>

Die Weiterentwicklung ging aus von einer Analyse der bisherigen Informationsdichte über die Spaltgasfreisetzung bei Handprobenentnahme mit Labormessung. Die damit erreichbare Meßfrequenz ist für die inzwischen erforderlich gewordene Beobachtung von Kurzeinflüssen nicht mehr ausreichend. Das ZIR schlug daher den Einsatz und die Entwicklung einer automatischen Meßstation mit elektronischer



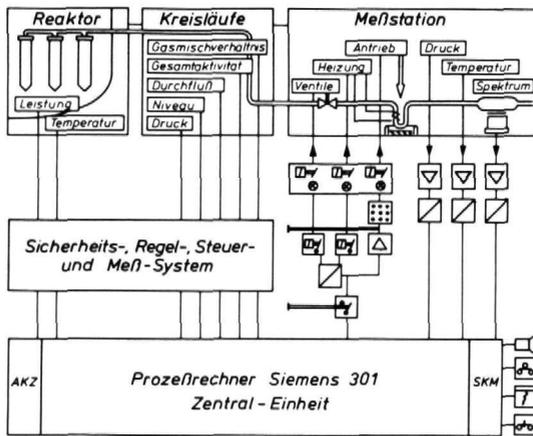


Abb. 8.17:  
Prinzipbild einer Meßstation mit Instrumentierung  
und Prozessorner zur Untersuchung der Spaltgasemission  
von beschichteten Teilchen

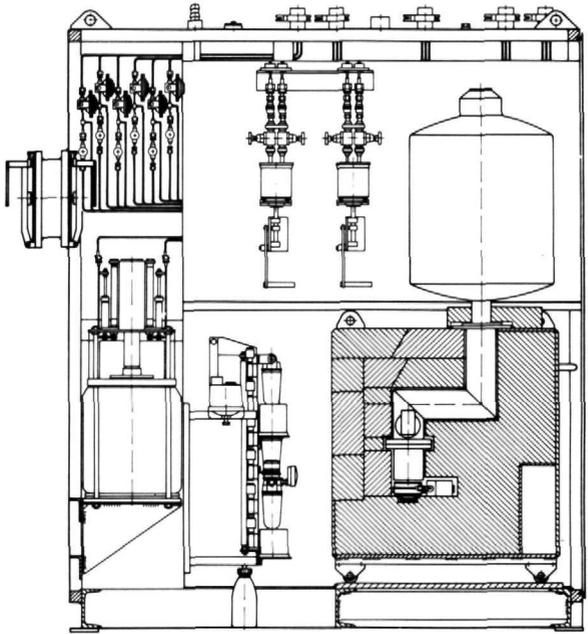


Abb. 8.18:  
Schnittbild durch das Containment der Meßstation LV 32.0.  
Von links oben: Durchflußregler, Handprobenentnahme  
für Vergleichsmessungen, Stickstoffbehälter.  
Von links unten: Spaltgas-Adsorptionsfallen, Steuereinheit,  
Halbleiterdetektor in Abschirmung.

Datenverarbeitung vor. Die Meßfrequenz steigt hierbei auf 2 pro Tag im Normalbetrieb und wird bei Anomalitäten in der Spaltgasfreisetzung automatisch erhöht. Dabei besteht eine 24-stündige Überwachung für alle 21 Tage der Reaktorperiode. Die elektronische Datenverarbeitungsanlage liefert außerdem die fertigen Bestrahlungsprotokolle in der gewünschten Form.

Die prinzipielle Funktion der automatischen Meßstation zeigt Abb. 8.17. Aus den Bestrahlungskapseln wird das Spaltgas von den Kreisläufen in die Meßstation gespült. Dort wird durch Ansteuerung vom Prozessorner eine Gasprobe entnommen, z.B. indem eine Aktivkohlefaller nach entsprechender Präparierung tiefgekühlt wird und Spaltgase in definierter Weise adsorbiert. Danach wird durch Aufheizung der Falle das Spaltgas wieder freigesetzt und zur Analyse der kurz-, mittel- und langlebigen Isotope (s. Abb. 2.23) zu einem hochauflösenden Germaniumdetektor geleitet. Die einzelnen Meßfühler in Reaktor, Kreisläufen und Meßstation werden zu der entnommenen Gasprobe von der EDV abgefragt. Über Sichtbildgerät, Plotter, Lochstreifen und Fernschreiber gibt die EDV die gewünschten Meß- und Bestrahlungsprotokolle aus.

In der technischen Ausbildung des mechanischen Teiles der Meßstation verfügt jeder der angeschlossenen 6 Spülkreisläufe über eine Probenentnahme, die aus einer tiefgekühlten Aktivkohlefaller und einem Probenbehälter besteht. Alle 6 Spülkreisläufe und ihre Probenentnahmen sind gemeinsam mit

dem Meßsystem eines Germaniumdetektors verbunden. Das Meßsystem enthält außerdem 2 Kuppelstellen für die bisherige Methode der Handprobenentnahme mit Laborausmessung, um Vergleichsmessungen durchführen zu können. Bei Störungen am Prozessorner und / oder des Germaniumdetektors kann ein verringerter Meßbetrieb aufrechterhalten werden.

Die konstruktive Gestaltung der Meßstation ist aus Abb. 8.18 zu ersehen, die die Vorderseite im Schnitt zeigt. Die Aktivkohlefaller für die 6 Kreisläufe sind über einem mit flüssigem Stickstoff gefüllten Dewar-Gefäß angeordnet, in das sie durch pneumatische Zylinder ein- und ausgefahren werden. Die Faller können im ausgefahrenen Zustand beheizt werden.

Der Germaniumdetektor ist über einem Meßbehälter in einer schweren Bleiabschirmung angeordnet. Das Nachfüllen des flüssigen Stickstoffes erfolgt automatisch.

Die an den Handprobenentnahmestellen angekuppelten Behälter werden über Handschuhe bedient und durch eine Gas-schleuse ausgebracht.

Die Meßstation wurde nach entsprechenden Kaltversuchen ausgeliefert und wird November 1971 in den aktiven Betrieb gehen.

Das für die Bestrahlungen eingesetzte Rig LV31 wurde in Zusammenarbeit mit CEN/GEX Mol entwickelt.

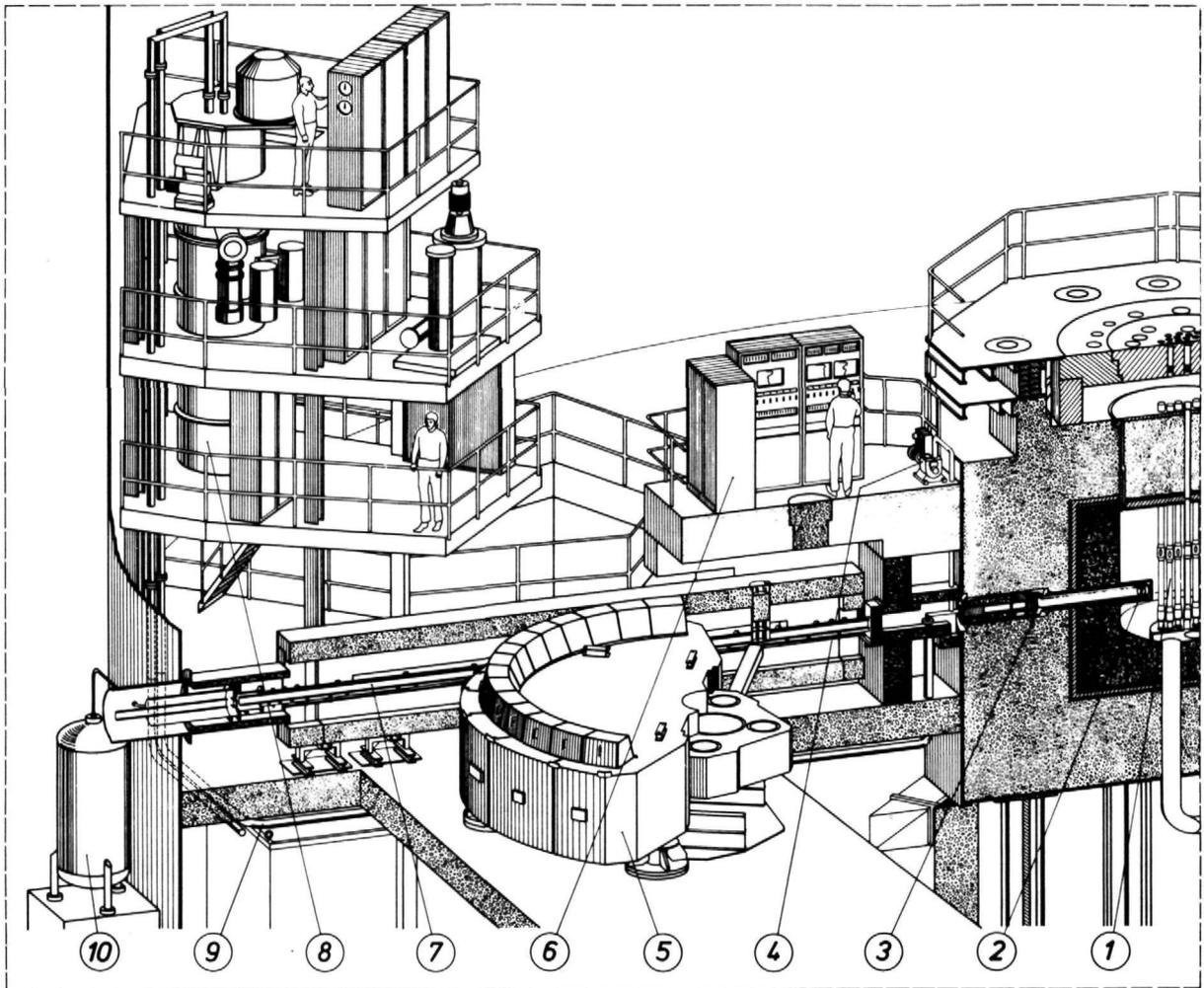


Abb. 8.19:  
 Gesamtbild der Kalten Neutronenquelle im FRJ-2 mit Neutronenleiter,  
 Flugzeitspektrometer und Kälteanlage  
 1) Reaktorcore 2) Moderatortopf 3) H<sub>2</sub>-Kondensator 4) Vakuumanlage  
 5) Flugzeitspektrometer 6) Versorgungs- und Steuerschränke  
 7) Neutronenleiter und Abschirmung 8) Tieftemperaturanlage  
 9) Kalte He-Leitung 10) H<sub>2</sub>-Versorgung

## Kalte Neutronenquelle am FRJ-2

Für Experimente aus dem Bereich der Festkörper- und Neutronenphysik wurde in Jülich eine Kalte Neutronenquelle entwickelt, die 1969 erfolgreich in Betrieb genommen und erprobt werden konnte (Abb. 8.19).<sup>(L.14,15)</sup> Der in den Forschungsreaktor DIDO (FRJ-2) eingebaute zylindrische Strahlrohrein Schub mit einem Durchmesser von 250 bis 400 mm und einer Länge von etwa 3 m enthält in einem Thermosiphonsystem ein unterkühltes Gemisch aus Flüssigwasserstoff und Flüssigdeuterium von etwa drei Litern bei einer mittleren Betriebstemperatur von 20 K (Abb. 8.20). Davon sind etwa 1000 cm<sup>3</sup> Flüssiggas in unmittelbarer Nähe

des Reaktor-Cores als Moderatorsubstanz für die Moderation (Abb. 8.21) der thermischen Neutronen des Reaktors wirksam. Das annähernd der Maxwell-Verteilung entsprechende Energiespektrum des thermischen Neutronenflusses wird durch Wechselwirkung mit der tiefkalten Moderatorsubstanz nach langen Wellenlängen hin verschoben.

Das Gemisch aus flüssigem Wasserstoff und Deuterium wird durch einen Helium-Gaskältekreislauf mit einer Leistung von 2000 W bei 15 K rückgekühlt (Abb. 8.22). Für die Kühlung der Strahlrohreinbauten ist bei einer Reaktorleistung von 15 MW eine Kälteleistung von 600 W bei 15 K erforderlich.

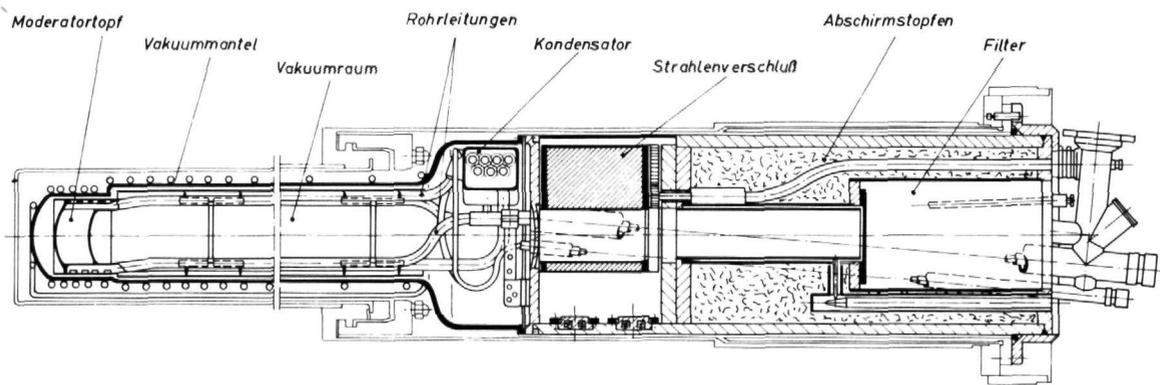


Abb. 8.20: Reaktoreinschub der Kalten Neutronenquelle

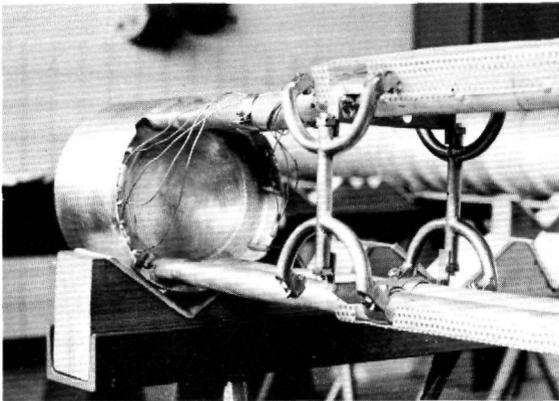


Abb. 8.21: Moderatortopf mit Kalhelium- und Wasserstoffleitungen

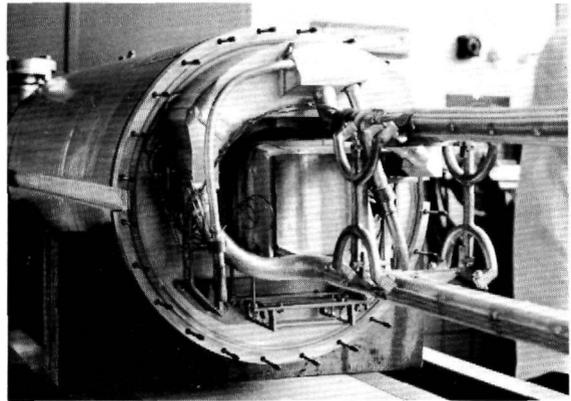


Abb. 8.22: Wasserstoffkondensator des Thermosiphonsystems mit Kalhelium- und Wasserstoffleitungen

Alle Wasserstoff führenden Leitungen sind mit einem Second Containment ausgerüstet. Es besteht am Strahlrohreinschub im Bereich des Isolationsvakuums aus einer Helium-Barriere und verhindert somit die Bildung von explosionsfähigen Gasgemischen.

Zur Kühlung des Vakuummantelrohres und zur Heliumspülung des Wasserstoffraumes und der Helium-Barriere sind externe Versorgungseinrichtungen installiert.

Eine Sicherheitsinstrumentierung überwacht die Strahlrohreinbauten und überführt sie bei Störfällen automatisch in einen sicheren Betriebszustand.

Der für physikalische Untersuchungen auf dem Gebiet der Festkörper- und Neutronenphysik benötigte subthermische Neutronenfluß mit Wellenlängen oberhalb 5 Å bis 10 Å

— entsprechend Energien von weniger als  $5 \times 10^{-3}$  eV — konnte mit der Kalten Neutronenquelle um das zehnfache bis zwanzigfache erhöht werden.

Die Kalte Neutronenquelle mit ihrem guten Wirkungsgrad und dem großen Strahlquerschnitt von  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  bietet in Verbindung mit dem hohen thermischen Fluß von  $10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$  am FRJ-2 und den installierten Versuchsaappareten besonders günstige Experimentiermöglichkeiten für Untersuchungen mit inelastischer Streuung und Kleinwinkelstreuung auf dem Gebiet der Festkörperforschung.

Die Entwicklung der Anlage wurde zunächst im ZIR begonnen und später unter der Federführung der Projektteilung der KFA zu Ende geführt und in der Zentralwerkstatt gefertigt. (L.14,16)

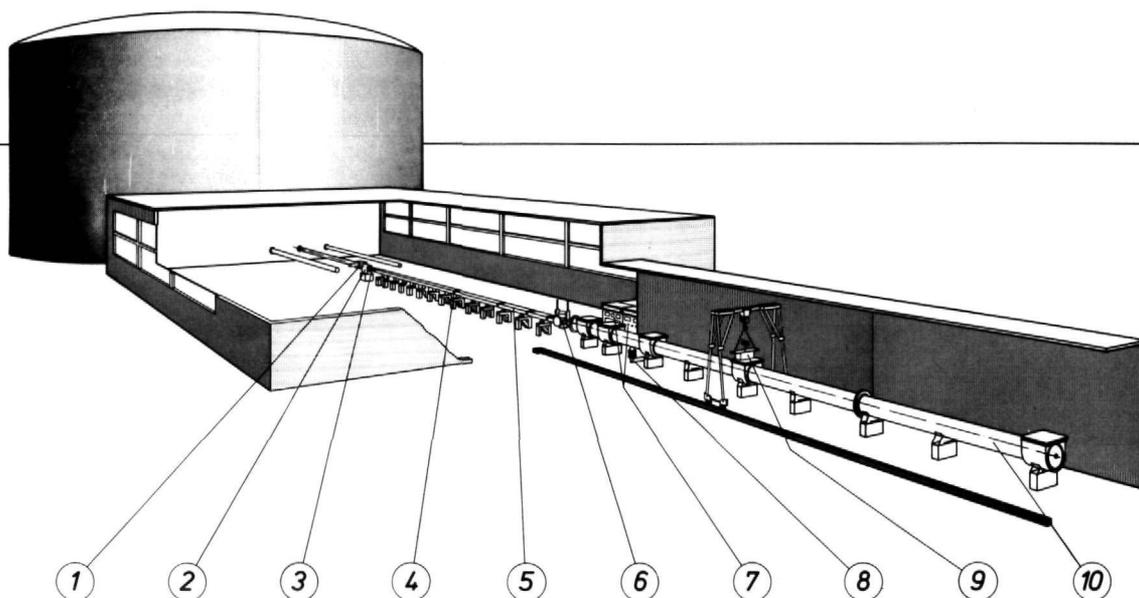


Abb. 8.23:  
 Kleinwinkelstreueexperiment mit einem 40m langen Neutronenleiter in Grenoble  
 1) Strahlenschieber 2) Mechan. Geschwindigkeitsselektor 3) Austauschbares Zwischenstück für Doppelmonochromator bzw. Chopper 4) Strahlenblenden 5) Selektionsstrecke mit Neutronenleitern 6) Probenkammer 7) Instrumentierung 8) Zur Vakuumanlage  
 9) Multidetektorbank 10) Analysatorstrecke

## Kleinwinkelstreueexperiment KWS Grenoble

Die Anlage Abb. 8.23 dient zur Durchführung von Neutronen-Kleinwinkel-Streueexperimenten. Untersucht werden soll die Streuung bei kleinen Impulsübertragern, wie sie beispielsweise an Ausscheidungen in Legierungen, an magnetischen Inhomogenitäten, an periodischen Strukturen größerer Ausdehnungen, an Versetzungen, an Makromolekülen sowie als kritische Streuung in der Nähe von Phasenübergängen, auftritt.

Die Neutronen durchlaufen nach ihrer Monochromatisierung mittels eines mechanischen Geschwindigkeitsselektors zunächst ein maximal 40 m langes Blendensystem („Selektionsstrecke“), bevor sie die Probe treffen. Die Messung des Streuwinkels erfolgt in einer Multidetektorbank, die ihrerseits von der Probe maximal 40 m entfernt sein kann („Analysatorstrecke“). Die wirksame Länge des Kollimationssystems kann verändert werden, indem zwischen die Blenden abschnittsweise Neutronenleiter eingefahren werden. So kann auf Kosten des Auflösungsvermögens der auf die Probe fallende Neutronenstrom erhöht werden.

Im Neutronenleiter muß ein Druck von  $1 \cdot 10^{-1}$  Torr bis 1 Torr herrschen. Die gesamte Neutronenleiter-Strecke ist in einem 40 m langen Vakuumbehälter angeordnet. Hierfür wurde eine Konstruktion entwickelt, die bei der geforderten Flexibilität eine wirtschaftliche Herstellung ermöglicht. Die Erfordernisse für spätere Ausbaustufen wurden berücksichtigt, indem der Einbau eines Doppelmonochromators und eines Choppers für Flugzeitspektroskopie vorgesehen wurde. Zu diesem Zweck ist die ganze Anlage auf ihrem Support parallel zu sich selbst mit hoher Genauigkeit verschiebbar.

Abb. 8.24 zeigt einen Schnitt durch den Vakuumbehälter mit den Borglas-Neutronenleiterpaketen. Die Neutronenleiter können ohne Beeinträchtigung ihrer Justierung durch einen äußeren Verschiebemechanismus unter Vakuum aus der Strahlachse herausgefahren werden. Dabei entfällt der bisher notwendige große Montage- und Justieraufwand. Eine Reproduzierbarkeit von 0,1 mm ist vorgesehen. Die Neutronenleiterpakete sind mit einem zulässigen Winkelfehler bis  $2 \cdot 10^{-4}$  Radian zu einer Referenzachse justierbar. Der Stoßfehler an den Stirnseiten der einzelnen Neutronenleiterpakete ist kleiner als 0,03 mm.

Die Anlage ist z.Zt. im Bau. Sie wurde im Auftrage des Instituts Max v. Laue - Paul Langevin in Grenoble in Zusammenarbeit mit dem Institut für Festkörperforschung der KFA entwickelt.

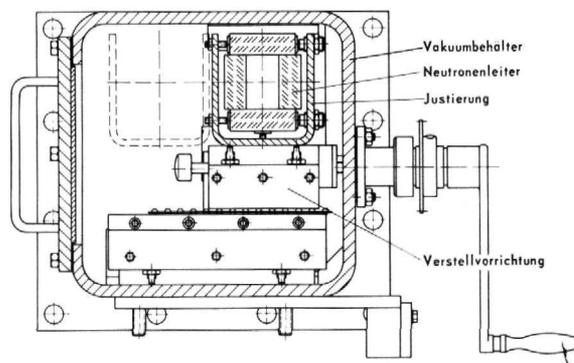


Abb. 8.24:  
 Schnitt durch den Neutronenleiter mit Vakuumbehälter und Verstellvorrichtung für die Neutronenleiterpakete

## Literaturverzeichnis zu Kapitel 8

- (L.1) Sicherheitsbericht LV 16A
- (L.2) Stechemesser, H.; Sachse, K.: Kerntechnik 12 (1970) 449
- (L.3) Sicherheitsbericht BE 20
- (L.4) Bundesmann, G.: Kerntechnik 10 (1968) 309
- (L.5) Sicherheitsbericht LV 4
- (L.6) Sicherheitsbericht LV 22
- (L.7) Sicherheitsbericht LV 21
- (L.8) Sicherheitsbericht LV 31 - Rig
- (L.9) Stechemesser, H.: Kerntechnik 10 (1968) 325
- (L.10) Sicherheitsbericht LV 28
- (L.11) Sicherheitsbericht LV 32.1
- (L.12) Sicherheitsbericht LV 32.0
- (L.13) Sicherheitsbericht Meßstation LV 32.0
- (L.14) Doose, C.; Preussner, A.; Stelzer, F.; Stiller, H.; Tholen, A.: Cryogenics 11 (1971) 107
- (L.15) Sicherheitsbericht SV 5
- (L.16) Lehrheuer, W.; Lison, R.: Kerntechnik 13 (1971) 157

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Aufgaben und Struktur des Instituts</b>	<b>5</b>
Entwicklung des Instituts S. 5 - Arbeitsprogramm S. 5 - Einrichtungen und Verfahren S. 5 - Struktur des Instituts S. 6 - Organisation S. 7	
<b>2. Nukleare Messungen und Berechnungen</b>	<b>9</b>
Sondenaktivierungsverfahren S. 10 - Direktanzeigende Verfahren für Messungen in Reaktoren S.11 - Neutronenspektrometrie S. 13 - Gammaskpektrometrie S. 15 - Absolutmessung von Aktivitäten S. 16 - Neutronen- und Gamma-Dosimetrie mit nichtnuklearen Sonden S. 17 - Nukleare Berechnungen S. 20	
<b>3. Reaktornutzung und Reaktorexperimente</b>	<b>21</b>
Probenbestrahlung S. 21 - Bestrahlungseinrichtungen am FRJ-1 S. 21 - Bestrahlungseinrichtungen am FRJ-2 S. 23 - Materialbestrahlungen S. 26 - Experimentebetreuung S. 27 - Strukturuntersuchungen mit dem Neutronendiffraktometer SV 7 S. 28	
<b>4. Kreisläufe, hohe und tiefe Temperaturen</b>	<b>31</b>
Rechenverfahren für Temperaturverteilungen und Wärmeübergänge S. 31 - Thermometrie über 0°C S. 33 - Eichverfahren für Temperaturfühler S. 33 - Reaktorkalorimetrie S. 34 - Wärmeleitfähigkeitsmessungen S. 35 - Technische Gasanalyse S. 35 - Thermometrie unter 0°C S. 36 - Eichverfahren für Tieftemperaturfühler S. 36 - Kälteanlagen, Versorgung mit flüssigen Gasen S. 37	
<b>5. Meß-, Steuer-, Regel- und Sicherheitssysteme</b>	<b>39</b>
Sicherheitssysteme S. 40 - Regelsysteme S. 42 - Steuersysteme S. 43 - Meßsysteme und Prozeßrechner S. 44 - Fertigung von Instrumentierungen S. 45	
<b>6. Technologie und Prüfwesen</b>	<b>47</b>
Diffusionsschweißen S. 47 - Hochtemperaturvakuumlöten S. 49 - Elektronenstrahlschweißen S. 50 - Schutzgasschweißen S. 52 - Reinraummontage von Reaktoreinschüben S. 52 - Prüfungen und Abnahmen S. 54 - Maßkontrollen und Versorgungsmessungen S. 54 - Leckprüfungen S. 54 - Durchflußmessungen S. 55 - Druckprüfung S. 55 - Filterprüfung S. 55 - Natrium-Abfüllanlage S. 56 - Röntgenprüfungen S. 56	
<b>7. Planung, Entwicklung und Konstruktion</b>	<b>57</b>
Termin- und Kapazitätsplanung, Kostenplanung und Nachkalkulation S. 57 - Geräteinformationssystem S. 59 - Konstruktionsmethodik S. 59 - Zuverlässigkeitsanalyse S. 60	
<b>8. Übersicht über wichtige Projekte des ZIR</b>	<b>63</b>
Dosimetertestrig LV16A S. 65 - Hydraulische Rohrpost BE 20 S. 66 - Rigs für verschiedene Bestrahlungsvorhaben S. 68 - Rigs und Spülkreisläufe am FRJ-2 S. 69 - Bestrahlungsanlage LV32.1 für den Hochflußreaktor R2 in Studsvik/Schweden S. 71 - Bestrahlungsanlage LV32.0 am Hochflußreaktor BR2 in Mol/Belgien S. 73 - Kalte Neutronenquelle am FRJ-2 S. 76 - Kleinwinkelstreuexperiment KWS Grenoble S. 78	