

KFK-29

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Juni 1960

KFK 29

Meß- und Regeltechnische Abteilung

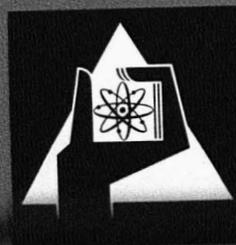
Die Instrumentierung des
Karlsruher Forschungsreaktors FR 2

Ein allgemeiner Überblick

Peter Dosch und Ernst Schneider

KERNREAKTOR
Bau- und Betriebs-Gesellschaft m. b. H.
Zentralbücherei

5. DEZ. 1960



KERNREAKTOR

BAU- UND BETRIEBS-GESELLSCHAFT M. B. H.

KARLSRUHE



Die Instrumentierung des
Karlsruher Forschungsreaktors FR 2
Ein allgemeiner Überblick

VON

PETER DOSCH UND ERNST SCHNEIDER

Sonderdruck aus der »SIEMENS-ZEITSCHRIFT«

34. Jahrgang · Juni 1960 · Heft 6 · Seite 339 bis 347

SIEMENS & HALSKE AKTIENGESELLSCHAFT
WERNERWERK FÜR MESSTECHNIK

Die Instrumentierung des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2

Ein allgemeiner Überblick

VON PETER DOSCH UND ERNST SCHNEIDER

Der FR 2, seine wichtigsten Konstruktionsmerkmale und technischen Daten

Der Kernreaktor FR 2 des Karlsruher Atomforschungszentrums ist ein heterogener Forschungsreaktor vom geschlossenen Tanktyp. Als Brennstoff wird natürliches Uran verwendet, als Moderator, Kühlmittel und Reflektor dient schweres Wasser. Die thermische Leistung beträgt 12 MW, die maximale thermische Neutronenflußdichte $3 \cdot 10^{13}$ n/cm²s. Bild 1 zeigt einen Längsschnitt durch die Anlage.

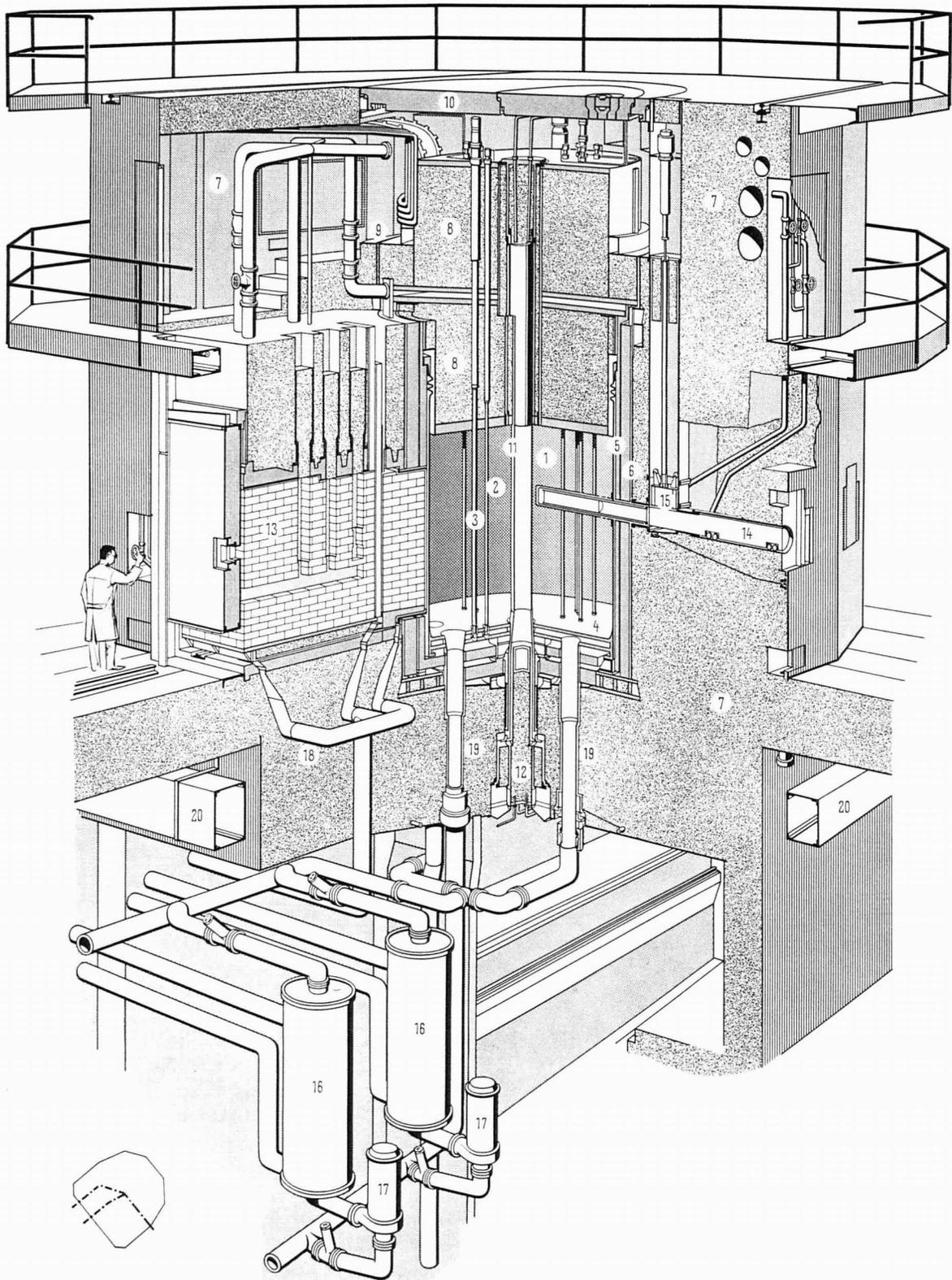
Der Reaktorkern enthält 157 Brennstoffelemente aus metallischem Uran, mit Aluminium ummantelt, und 31 Brutelemente aus Thorium. Die Elemente stecken in Führungsrohren, die auf dem Boden des Reaktortanks, dem Verteilerboden, aufsitzen. Der Verteilerboden hat düsenförmige Öffnungen, aus denen Schwerwasser als Kühlmittel in die Führungsrohre eintritt, im Ringspalt zwischen Brennstoffelement und Führungsrohr aufsteigt, dabei die beim Spaltprozeß freiwerdende Wärme aufnimmt und dann durch Schlitze am oberen Ende des Führungsrohrs in den Moderatorraum austritt.

Für die Grob- und Feinregelung der Neutronenflußdichte enthält der Kern 16 Trimmabschaltstäbe und einen Feinregelstab mit Neutronenabsorbern aus Cadmium. Die Absorber können durch elektromotorische Stellantriebe auf- und abbewegt werden. Zum Schnellab-

schalten des Reaktors sind die Absorber der Trimmabschaltstäbe elektromagnetisch aufgehängt. Bei einer Unterbrechung des Erregerstromes fallen die Anker mit den Absorbern in den Kern ein. In den Reaktionsraum hinein ragen ferner vertikale und horizontale Experimentier- und Isotopenkanäle, darunter ein Rohrpostkanal. Von außen sind an den Reaktorkern zwei Kreisläufe – der Schwerwasser- und der Heliumkreislauf – angeschlossen.

Der Schwerwasserkreislauf führt die im Reaktor entstehende thermische Energie über Wärmeaustauscher an einen Leichtwasserkreislauf ab. Er besteht aus einem Hauptkühlkreis, einem Notkühlkreis und einem Reinigungskreislauf. Im normalen Betrieb arbeitet der Hauptkühlkreis. Der Notkühlkreis soll im Reaktor bei Netzausfall und bei Schäden im Hauptkühlkreis die nach dem Abschalten freiwerdende Wärme abführen. Der im Nebenschluß zum Hauptkreis betriebene Reinigungskreislauf enthält mechanische Filter und Ionenaustauscher zum Entfernen ionisierter Verunreinigungen aus dem Schwerwasser.

Der Heliumkreislauf nimmt das aus der Radiolyse von Schwerwasser stammende Knallgas, bestehend aus schwerem Wasserstoff (Deuterium), überschwerem Wasserstoff (Tritium, radioaktiv) und Sauerstoff, auf. Er enthält Anlagen, in denen diese Bestandteile wieder entfernt werden.



- | | | | | |
|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|--|----------------------------------|
| 1 Core | 5 Stahltank mit Bleifüllung | 9 Deckel-Rundgang | 13 Thermische Säule mit Graphit | 17 Schwerwasser-Pumpe |
| 2 Brennelement | 6 Gußeisenschirm | 10 Drehdeckel | 14 Horizontaler Experimentierkanal | 18 Kühlluft für thermische Säule |
| 3 Trimmabschaltstab | 7 Biologischer Schirm | 11 Zentraler Experimentierkanal | 15 Strahlenschieber | 19 Schwerwasserzu- und -abfuhr |
| 4 Aluminiumtank | 8 Reaktordeckel, zweiteilig | 12 Adapter | 16 Wärmeaustauscher
Schwerwasser-Leichtwasser | 20 Raumluftabsaugung |

Bild 1 Längsschnitt durch den Forschungsreaktor FR 2 in Karlsruhe

Das Helium steht als Schutzgas auf allen Schwerwasserflächen (im Reaktor und in allen Schwerwasserbehältern), um das Eindringen von leichtem Wasser in Form der Luftfeuchte und von anderen Verunreinigungen zu verhindern.

Der Leichtwasserkreislauf nimmt in den Wärmeaustauschern die Wärme aus dem Schwerwasser auf und gibt sie in drei künstlich belüfteten Kühltürmen an die Außenatmosphäre ab. Er wird mit vollentsalztem Wasser betrieben.

Der Luftkreislauf versorgt die Reaktorhalle sowie die Loop- und Kreislaufräume mit klimatisierter Luft. Ferner sind die Experimentier- und die Isotopenkanäle sowie einige andere Teile des Reaktors luftgekühlt und an den Luftkreislauf angeschlossen. Der Luftkreislauf enthält neben Gebläsen und Klimaanlage Absolutfilter zum Entfernen aktivierter Bestandteile und einen nahezu 100 m hohen Abluftschornstein.

Der Reaktor ist an anderer Stelle ausführlich beschrieben [15].

Allgemeines zur Instrumentierung von Kernreaktoren

Viele der am Reaktor zu messenden Größen, wie Drücke, Temperaturen, Durchflüsse gasförmiger oder flüssiger Stoffe, sind von konventionellen Anlagen der Verfahrenstechnik her bekannt. Der Spaltprozeß fordert aber auch Meßgeräte für andere physikalische Größen, wie Neutronenflußdichte, Neutronenflußänderungsgeschwindigkeit, Reaktorperiode und die Intensität von Kernstrahlungen. Die Eigenschaften der im Reaktor verwendeten Betriebs- und Hilfsstoffe verbieten es in vielen Fällen – mindestens im Reaktorkern und in den Primärkreisläufen –, ohne weiteres Meßgeräte der normalen Fertigung einzusetzen. Zum Teil werden im Reaktor besonders kostbare und reine Hilfsstoffe verwendet, z. B. das bereits erwähnte schwere Wasser, das nur im Verhältnis 1:7000 im natürlichen Wasser vorkommt, und Helium. Außerdem treten radioaktive, sehr gesundheitsschädliche Stoffe auf. Alle mit diesen Medien in Berührung kommenden Meßgeräte und Armaturen müssen nach außen außerordentlich dicht sein, um den Verlust kostbarer Stoffe so klein wie möglich zu halten und das Austreten radioaktiver Stoffe zu verhindern. Ferner müssen sie außerordentlich korrosionsbeständig sein, damit die Verunreinigung des Reaktors durch Korrosionsprodukte klein gehalten wird und die Geräte selbst eine große Lebensdauer haben. Reparieren und Auswechseln der Teile ist infolge der auftretenden Strahlung schwierig und an manchen Stellen auch nach dem Abschalten des Reaktors für lange Zeit unmöglich. Meßgeräte und Armaturen sind ferner im Reaktorbetrieb oft Strahlungseinflüssen unterworfen, die eine sorgfältige Auswahl geeigneter strahlungsbeständiger Werkstoffe notwendig

machen. Auch metallurgische Forderungen schränken die Anzahl der zulässigen Werkstoffe ein.

Ähnliches wie für die einzelnen Komponenten gilt auch für die gesamte Instrumentierung. Sie soll nicht nur dem Betriebspersonal die für den ordnungsgemäßen Betrieb notwendige Information über die Zustandsgrößen in übersichtlicher Form liefern und die Zustandsgrößen selbsttätig in bestimmten Grenzen halten, sondern sie muß auch wesentlich höheren Sicherheitsanforderungen genügen als bei konventionellen Anlagen. Bei gefährlichen Abweichungen vom normalen Betriebszustand müssen selbsttätig Sicherheitsoperationen eingeleitet werden, um die am Reaktor arbeitenden Menschen vor Strahlungsschäden und die Anlage selbst vor Beschädigung oder Zerstörung zu schützen. Der Schutz hat sich auch auf die Umgebung des Reaktors zu erstrecken, um Verseuchung und Strahlungsschäden durch aktive Spaltprodukte zu verhindern. Für die Reaktorinstrumentierung kennzeichnend ist daher ein besonderes Sicherheitssystem, das den Reaktor bei Gefahr sofort abschaltet und dessen Operationen Vorrang vor allen anderen automatisch oder von Hand durchführbaren Eingriffen haben.

Wie der Reaktor, der nach deutschen Plänen gebaut wurde, ist auch die Instrumentierung des FR 2 zum überwiegenden Teil deutscher Herkunft. Entwurf und Ausführung sind in enger Zusammenarbeit zwischen der meß- und regeltechnischen Abteilung der Kernreaktor-Bau- und Betriebsgesellschaft mbH, Karlsruhe, und den Lieferfirmen entstanden. Der größte Teil der meß- und regelungstechnischen Anlage wurde vom Wernerwerk für Meßtechnik geliefert.

Die Instrumentierung des Reaktorkerns

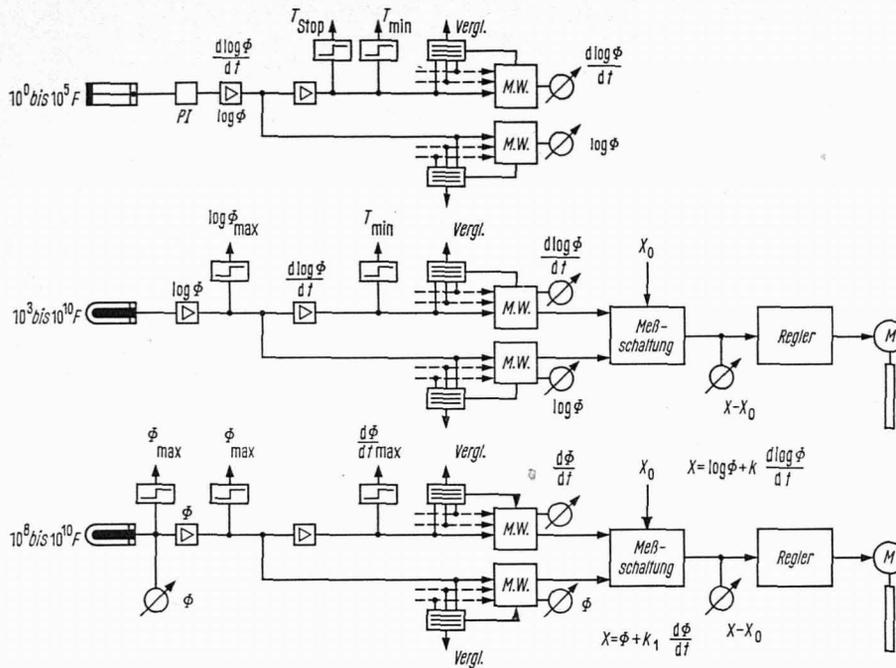
Die Kerninstrumentierung umfaßt die Meßgeräte für Neutronenflußdichte und Periode für das Leistungsregelsystem, die Überwachung der Brennelemente sowie der Isotopen- und Experimentierkanäle. Dem Leistungsregelsystem übergeordnet ist das Sicherheitssystem.

Die Neutronenflußmessung wird wegen des etwa zwölf Dekaden umfassenden Meßbereiches mit drei Meßkanälen verschiedenen Meßbereiches durchgeführt:

Der Startbereich von etwa 10^0 bis 10^5 n/cm²s wird mit einem Zählrohrkanal (Impulsmessung) erfaßt. Für den Bereich mittlerer Leistung bis zur Nennleistung – etwa 10^3 bis 10^{10} n/cm²s – ist ein logarithmischer Meßkanal eingesetzt. Für genaue Messungen im Leistungsbereich – etwa 10^8 bis 10^{10} n/cm²s – ist ein linearer Meßkanal vorgesehen. Die Meßbereichangaben beziehen sich auf die Flußdichten am Einbauort der Neutronendetektoren.

Die drei Meßkanäle sind wegen des angewendeten 2-von-3-Sicherheitssystems dreifach ausgeführt.

Als Neutronendetektoren dienen im Zählrohrbereich Bortrifluorid (BF₃)-Proportionalzählrohre und in den



ϕ Neutronenfluß
 F Flußeinheit ($n/cm^2 s$)
 T Reaktorperiode
 X Regelgröße
 $M. W.$ Mittelwertmesser

Bild 2
 Neutronenfluß-
 Meß- und -Regelkanäle
 des Forschungsreaktors FR 2
 (Vereinfachtes Blockschaubild)

beiden Leistungsbereichen unkompenzierte Borionisationskammern englischer Herkunft.

Der Zählrohrkanal ist folgendermaßen aufgebaut: In unmittelbarer Nähe des Zählrohrs befindet sich ein Impuls-Vorverstärker und im Geräteraum ein linearer Impulsverstärker, ein Differential-Diskriminator, der die von den einfallenden Neutronen herrührenden Impulse von den von der Gammastrahlung ausgelösten Impulsen niedrigerer Amplitude trennt, ein logarithmischer Mittelwertmesser, der den zeitlichen Mittelwert der Impulszahl im logarithmischen Maßstab abbildet, und ein Hochspannungs-Netzgerät, das die Speisespannung für das Zählrohr liefert.

Der vom Ausgang des logarithmischen Mittelwertmessers gelieferte Meßwert wird im Sicherheitssystem weiterverarbeitet sowie angezeigt und registriert. Ferner wird von diesem Meßwert die Reaktorperiode durch Differentiation mit Hilfe von Differenziervverstärkern abgeleitet. Auch die Periode wird im Sicherheitssystem verarbeitet sowie angezeigt und registriert.

Der logarithmische Meßkanal enthält einen Gleichspannungsverstärker mit exponentieller Gegenkopplung. Das Logarithmierglied ist eine Halbleiterdiode. Der Meßbereich ist 10^{-11} bis 10^{-4} A.

Im linearen Meßkanal ist ein linear gegengekoppelter Gleichspannungsverstärker mit dekadisch umschaltbaren Meßbereichen zwischen 10^{-11} und 10^{-4} A eingesetzt. Die Weiterverarbeitung der Meßwerte geschieht wie im Zählrohrkanal. Beide Kanäle enthalten

Differenziervverstärker. Im logarithmischen Kanal bildet der Differenziervverstärker die Periode, im linearen Kanal die Änderungsgeschwindigkeit des Neutronenflusses, die, bezogen auf den Neutronenfluß, wieder die Periode ergibt.

Erwähnenswert ist noch ein weiterer verstärkerloser Neutronenfluß-Meßkanal, der aus einer Ionisationskammer, einer Anodenbatterie und einem empfindlichen Spiegelgalvanometer besteht, so daß die Neutronenflußdichte auch bei Ausfall aller anderen Instrumente und Speisespannungen gemessen werden kann.

Alle Geräte der nuklearen Instrumentierung, mit Ausnahme der Impuls-Vorverstärker, sind in Einschubbauweise ausgeführt und im Geräteraum in Gestellen nach DIN-Norm zusammengefaßt.

Bild 2 zeigt ein Blockschaubild der nuklearen Instrumentierung, Bild 3 die Geräte.

Das Leistungsregelsystem besteht aus zwei Regelkanälen, einem logarithmischen und einem linearen. Regelgröße ist die Neutronenflußdichte. Die Istwerte werden vom logarithmischen und vom linearen Neutronenflußmeßkanal nach Mittelwertbildung der drei Einzelmessungen im Sicherheitssystem in Form von eingepprägten Strömen geliefert. Zur Stabilisierung sind dem logarithmischen Regler die Periode und dem linearen Regler sowohl die Periode als auch die Neutronenfluß-Änderungsgeschwindigkeit aufgeschaltet. Diese Meßwerte werden ebenso wie die Neutronenflußdichte dem Sicherheitssystem nach der Mittelwertbildung entnommen. Der logarithmische Regelkanal soll neben der

Leistungsregelung über den ganzen Bereich des logarithmischen Meßkanals den vollautomatischen Start des Reaktors ermöglichen. Zur genauen Regelung im Leistungsbereich kann nach dem Start und nach Erreichen des Sollwertes auf den linearen Regelkanal umgeschaltet werden. Für den logarithmischen Kanal ist ein TELEPERM*-Regler ST und für den linearen Kanal ein Zeigerregler ZR 5 MT eingesetzt, beide mit Transistor-Regelverstärkern ausgerüstet. Durch die Eigenart der RC-Rückführungen bekommen beide Regler progressives Verhalten, d. h., die Reglerparameter Verstärkung und Nachstellzeit werden nichtlinear von der Regelabweichung gesteuert.

Stellglieder für die Regelung sind der Feinregelstab und die Trimmabschaltstäbe, deren Stellantriebe mit einer Anzahl von Endschaltern ausgerüstet sind, die in ein umfangreiches Verriegelungssystem eingreifen, das aus Relaischaltungen besteht. Für die Stellungsanzeige sind Drehmelder vorgesehen.

Die Brennelement-Überwachungseinrichtungen überwachen das ordnungsgemäße Arbeiten der Kühlung der einzelnen Brennelemente und weisen Schä-

den der Brennstoffhülsen (Aluminium-Canning) nach. An jedem der 188 Brennelemente werden die Austrittstemperatur und der Durchfluß des Kühlmittels gemessen. Ein an der Austrittsstelle des Schwerwassers in die Brennelemente eingebauter Meßeinsatz enthält zu diesem Zweck ein Thermoelement für die Temperaturmessung und einen Woltmannflügel mit elektrischem Drehzahlabgriff. Die Woltmannflügel tragen ein Kronenrad, dessen Zacken die Kopplung eines mit hochfrequenter Spannung gespeisten Spulenpaares periodisch verändern und dadurch eine Amplitudenmodulation erzielen. Die Modulationsfrequenz ist der Flügeldrehzahl proportional.

Die Abgriffe werden aus einem Hochfrequenzoszillator gespeist. Beide Meßwerte jedes Brennelements werden zyklisch auf Unterschreitung eines Durchfluß-Grenzwertes und auf Überschreitung eines Temperatur-Grenzwertes kontrolliert.

Über vier Matrixschaltungen, aus Edelmetall-Schnellrelais bestehend, werden die Meßstellen von je 50 Brennelementen automatisch nacheinander angewählt. Die einzelnen Thermoelemente werden dabei über besonders ausgelegte Vergleichsstellentemperatur-Kompensationsschaltungen auf Verstärker geschaltet, deren Ausgangsströme mit voreingestellten Grenzwerten verglichen werden. Die Durchflußmeßstellen werden über die Wählermatrizen auf Drehzahlmeßumformer geschaltet, die die Modulationsfrequenz in einen proportionalen Gleichstrom umformen. Die Ausgänge werden wie bei der Temperaturgrenzwertkontrolle mit voreingestellten Grenzwerten verglichen, die den einzelnen Elementengruppen zugeordnet sind.

Das Überschreiten der Grenzwerte wird in einer Lampenmatrix, die die Position des gestörten Elements angibt, optisch und akustisch signalisiert. Außerdem werden die Meßwerte auf einem Meßwertdrucker in voreinstellbaren Zeitabständen gedruckt. Ein Kontrollzyklus (400 Meßwerte) dauert etwa 2 min.

Das Drucken der 400 Meßwerte dauert etwa 10 min. Außerdem ist es möglich, die Meßwerte von drei beliebigen Elementen auf elektronischen Präzisionsschreibern KOMPENSOGRAPH* (Linienschreibern) ständig zu registrieren.

Bei Ausfall des Kühlstromes eines Brennelements würde die Temperatur in wenigen Sekunden so stark ansteigen, daß das Element abschmilzt und den Reaktor für lange Zeit

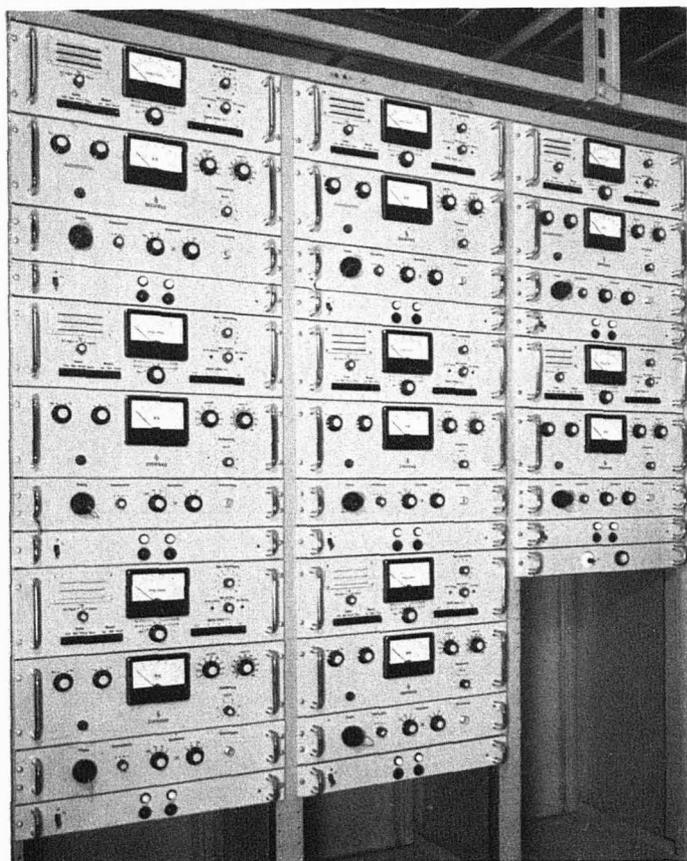


Bild 3 Geräteschränke für die nukleare Instrumentierung, angeordnet unter der Warte des Forschungsreaktors FR 2

* Eingetragenes Warenzeichen

unbrauchbar macht. Aus diesem Grund werden die Kühlströme der einzelnen Elemente zusätzlich dauernd überwacht. Hierzu ist an jeder Meßstelle ein Schaltgalvanometer mit einer transistorisierten Gleichrichter- und Verstärkerschaltung angeschlossen. Das Schaltgalvanometer – im Prinzip ein Kernmagnet-Drehpulmeßwerk mit Kontaktzeiger und magnetischer Kontaktverstärkung – schaltet den Reaktor über das Schnellschlußsystem bei Minimal-Durchflußwerten ab. Die Abschaltgrenzwerte liegen niedriger als die Grenzwerte der zyklischen Schnellkontrolle.

Für die Hüllenbruchüberwachung werden den Brennelementen zyklisch Kühlmittelproben entnommen und auf das Vorhandensein radioaktiver, aus den Elementen stammender, gasförmiger Spaltprodukte untersucht.

Die Isotopen- und Experimentierkanäle werden durch sogenannte Naßfühler mit wendelförmigen Elektroden, die im Stromkreis von ansprechempfindlichen Relais liegen, auf Undichtigkeit, d. h. auf Schwerwasser-einbruch, überwacht. Störungen der Luftkühlung von Isotopenkanälen werden durch Meßschaltungen mit beheizten Widerstandsthermometern signalisiert. Bei Ausfall der Kühlung wird der Reaktor über das Schnellschlußsystem abgeschaltet.

Außerdem werden alle Experimente durch Meßeinrichtungen überwacht, die je nach Bedarf und nach Art des Experimentes zusammengestellt werden. Für diese Meßeinrichtungen sind Anschlüsse an das Schnellschlußsystem vorhanden, so daß der Reaktor auch bei Störungen während des Experimentes selbsttätig abgeschaltet wird und entsprechende Signale in die Reaktorschaltwarte gegeben werden.

Überwachung und Steuerung der Reaktorkreisläufe

In den Reaktorkreisläufen werden an sehr vielen Stellen Meßwerte überwacht, die über den Betriebszustand Aufschluß geben, z. B. über die Aktivitäten, Temperaturen, Drücke, Durchflüsse, Behälterstände, Leitfähigkeits- und pH-Werte von schwerem und leichtem Wasser, Helium und Luft.

Bild 4 zeigt als Beispiel das Meßstellenschema des Schwerwasserkreislaufs.

Besondere Erwähnung verdienen neu entwickelte Geräte zur Gasanalyse für den Heliumkreislauf (Bild 5), die das Helium auf den D_2 , O_2 und N_2 -Gehalt überwachen. Bis auf die O_2 -Messung, die nach einem magnetischen Verfahren durchgeführt wird, werden dabei besonders entwickelte Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit angewendet. Bei der D_2 -Messung wird eine Differenzmessung der Leitfähigkeit durchgeführt, bei der das

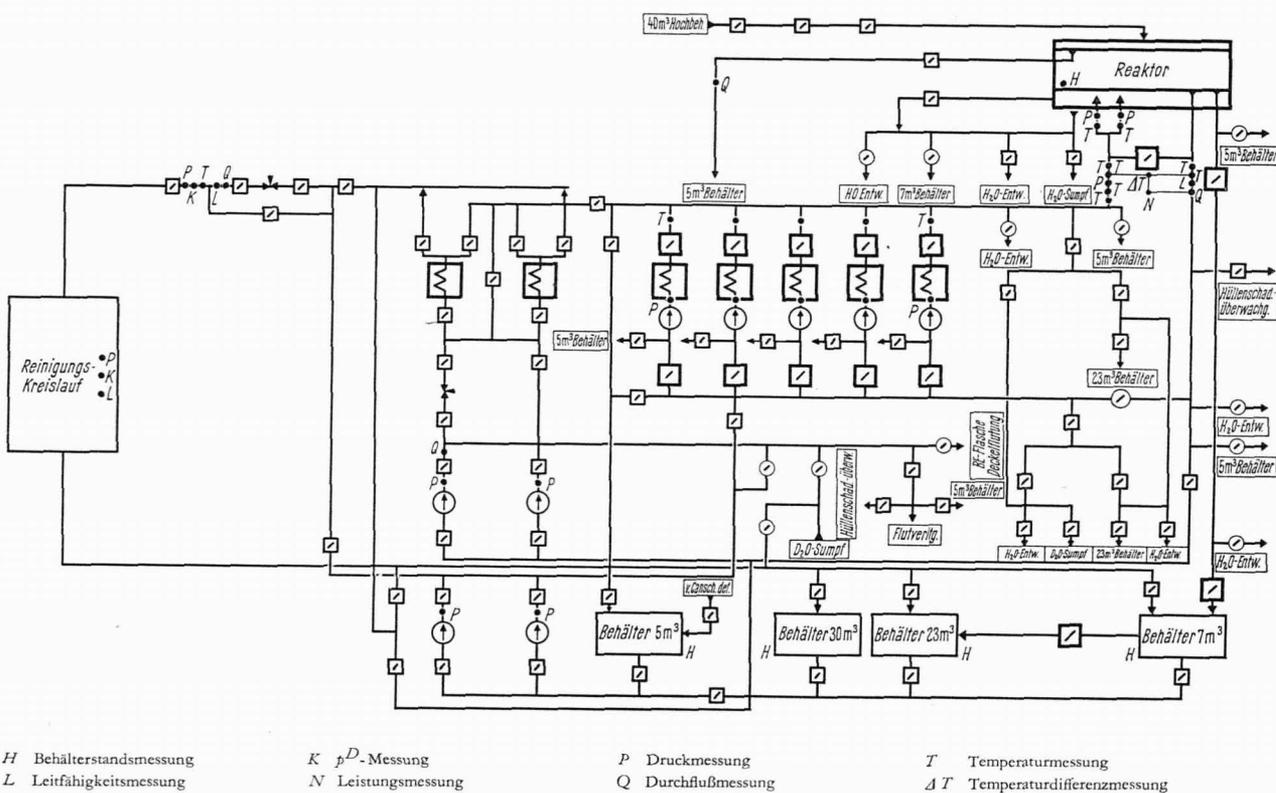


Bild 4 Vereinfachtes Meßstellenschema des D_2O -Kühlkreislaufes

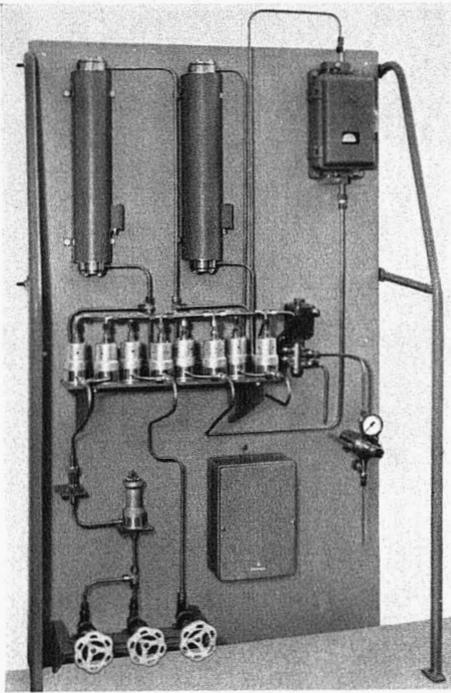


Bild 5 Gasanalysegeräte zur Überwachung des Heliumkreislaufs auf den D_2 -, O_2 -, und N_2 -Gehalt

D_2 zu D_2O verbrannt wird und die Zunahme des D_2O -Gehaltes nach der Verbrennung als Maß für den D_2 -Gehalt dient. Die N_2 -Messung wird nach Trocknung des Gases und Entfernen des Sauerstoffes ebenfalls als Differenzmessung der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Als Vergleichsnormale dient die Wärmeleitfähigkeit eines Gases in einer abgeschlossenen Vergleichskammer.

Die Kreislaufsteuerungen sind weitgehend automatisiert, weil je nach Betriebszustand umfangreiche Programme eingestellt werden müssen. Die Programme erstrecken sich auf die Steuerung einer großen Anzahl von Auf-Zu-Ventilen, Pumpen und Gebläsen. So kann z. B. der D_2O -Kreislauf mit verschiedenen Kühlprogrammen – Normkühlung, verminderte Kühlung bei niedriger Reaktorleistung oder Notkühlung – betrieben werden. Außerdem können bestimmte Füll- und Reinigungsprogramme sowie Moderatorablaßprogramme hergestellt werden. Die Programme können von Hand, einige auch selbsttätig abhängig von Meßwerten ausgelöst werden. Sie bestehen darin, daß eine große Anzahl von Ventilen in eine bestimmte Stellung gebracht und daß bestimmte Pumpen und Gebläse ein- oder ausgeschaltet werden. Außerdem können von der Warte aus nahezu alle Stellglieder, Pumpen und Gebläse von Hand einzeln ferngesteuert werden. Die Steuereinrichtungen sind aus Relais aufgebaut und enthalten zahlreiche Verriegelungen. Die Relais sind in Einschüben zu möglichst gleichartigen, austauschbaren Einheiten zusammengefaßt; so gibt es

z. B. Programmeinheiten, Ventilsteuereinheiten, Verriegelungseinheiten usw. Die Stellungen von Stellgliedern und die Betriebszustände von Pumpen werden rückgemeldet und darauf überwacht, ob sie mit den vorgegebenen Programmsteuerbefehlen übereinstimmen. Störungen werden signalisiert.

Das Sicherheitssystem

Das Sicherheitssystem hat die Aufgabe, den Reaktor bei Betriebszuständen abzuschalten, die das Bedienungspersonal oder Menschen, Tiere oder Pflanzen in der Umgebung des Reaktors oder die Anlage selbst gefährden. Das Abschalten besteht im Unterbrechen des Magnethaltstromes für die Trimmabschaltstäbe und im Ablassen des Moderators. Grundsätzlich werden zunächst beide Maßnahmen eingeleitet. Das Ablassen des Moderators kann unterbrochen werden, wenn alle Trimmabschaltstäbe ihre untere Stellung eingenommen haben. Der Moderatorablaß ist ein Steuerprogramm des D_2O -Kreislaufs, das vom Schnellschlußsystem ausgelöst wird.

Die Abschaltung wird von Grenzwerten der folgenden Meßgrößen abgeleitet:

1. Reaktorperiode im Startbereich (Zählrohrkanal)
2. Reaktorperiode im Leistungsbereich (logarithmischer Meßkanal)
3. Flußänderung im Leistungsbereich (linearer Meßkanal)
4. Neutronenflußdichte im Leistungsbereich
5. Kühlmiteleintrittstemperatur
6. Kühlmiteleintrittsdruck
7. Temperaturdifferenzen an sechs ausgewählten Brennelementen
8. Luftaktivität in der Reaktorhalle
9. Aktivitätsausstoß aus dem Abluftschornstein

Die Messung der unter 1. bis 7. erwähnten Größen schützt im wesentlichen die Reaktoranlage selbst vor Schäden oder Zerstörung, die der Meßgröße 8 schützt die in der Reaktorhalle tätigen Menschen, die der Meßgröße 9 die Umgebung.

Alle Messungen werden nach dem 2-von-3-System durchgeführt, um einerseits den Reaktor bei Gefahr sicher und möglichst unabhängig von Gerätestörungen abzuschalten, andererseits aber unnötige Abschaltungen durch Gerätestörungen zu vermeiden. Das Prinzip des 2-von-3-Systems ist an anderen Stellen ausführlich beschrieben [2, 6, 7]. Abgeschaltet wird, wenn zwei von den drei Einzelmessungen den Grenzwert erreicht haben. Gerätestörungen werden dadurch erfaßt, daß die drei Einzelmessungen untereinander kontinuierlich verglichen werden. Wenn ein Meßwert von den beiden anderen abweicht, meldet sich der Meßkanal als gestört. Er kann dann ab-

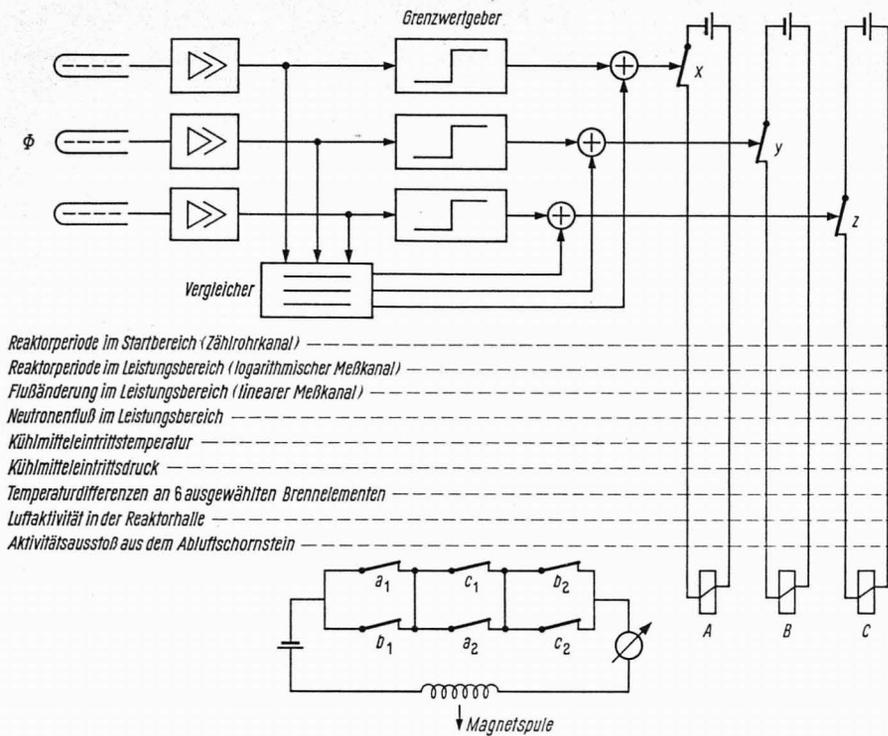


Bild 6
Vereinfachtes Blockschema
des Sicherheitssystems

geschaltet werden, wodurch die 2-von-3-Auswahl in eine 1-von-2-Auswahl umgeschaltet wird, d. h., bereits einer der verbleibenden Kanäle kann den Reaktor abschalten. Als weitere Sicherheitsoperationen führt das Sicherheitssystem bei bestimmten Reaktorperioden die Unterbrechung der Aufwärtsbewegung der Trimmabschaltstäbe, die Blockierung des Starts bei Gerätestörung und ähnliches aus. Bei Ausfall der normalen Kühlung wird die Notkühlung eingeschaltet.

Ein derartig umfangreiches System erfordert normierte Eingangsgrößen und normierte Geräte. Die Eingangsgrößen (= Ausgangsgrößen der dem eigentlichen Sicherheitssystem vorgeschalteten Meßverstärker) sind für alle nuklearen Größen auf 0 bis 20 V eingepreßte Spannung, für die anderen Größen auf 0 bis 10 mA eingepreßter Strom normiert. Bild 6 zeigt das vereinfachte Blockschaltbild des Sicherheitssystems.

Die drei Eingangsgrößen je Kanal wirken auf eine Anzahl von Grenzwertgliedern, darauf folgen Trennverstärker, hinter denen Anzeigegeräte und Überwachungseinheiten liegen. Hinter den Trennverstärkern wird der Mittelwert der drei Einzelmessungen gebildet. Von den Grenzwertgebern werden die Sicherheitsoperationen abgeleitet. Die Trennverstärker bewirken eine galvanische Trennung der Stromkreise der Grenzwerteinheiten vom Mittelwertkreis. Im Mittelwertkreis wird bei Ausfall einer Einzelmessung auf den Mittelwert von zwei Messungen umgeschaltet. Alle Mittelwerte werden registriert.

Die Mittelwerte der Fluß- und Perioden-Meßkanäle werden auf das Leistungsregelsystem geschaltet.

Wichtiger Bestandteil des Sicherheitssystems sind die sogenannten Magnetsteuergeräte für die Haltemagnete der Trimmabschaltstäbe. Diese Geräte liefern den Erregerstrom, melden den Erregungszustand und enthalten eine Meßschaltung, die angibt, ob die Anker der Absorber am Magnet haften. Diese Meßschaltung nutzt die Unterschiede der magnetischen Streuflüsse in Abhängigkeit vom Luftspalt zwischen Magnet und Anker aus. Sie hat noch eine weitere wichtige Aufgabe: Wenn nach einem Schnellschluß die Haltemagnete an die Absorber herangefahren werden, schaltet sie die Motoren ab, wenn die Magnete in den Haftbereich eingelaufen sind. Der Luftspalt ist dann so klein, daß die Absorber bei Einschalten des Erregerstromes mit Sicherheit angezogen werden. Hierfür konnte eine außerordentliche Genauigkeit von $\pm 0,005$ mm erreicht werden [3].

Alle Geräte des Sicherheitssystems sind in Einschubbauweise ausgeführt (Bild 7). Für die nuklearen Meßgrößen sind Grenzwertgeber mit transistorisierten Kippverstärkern mit besonders kurzer Ansprechzeit eingesetzt. Die übrigen Grenzwerteinheiten haben magnetische Kippverstärker. Die Überwachungseinheiten für den Vergleich der drei Meßgrößen bestehen im Prinzip aus zwei Grenzwertgebern mit magnetischem Kippverstärker. Als Trennverstärker sind kontinuierliche Magnetverstärker eingesetzt, deren Eingänge und Ausgänge galvanisch voneinander getrennt sind. Die Betriebszu-

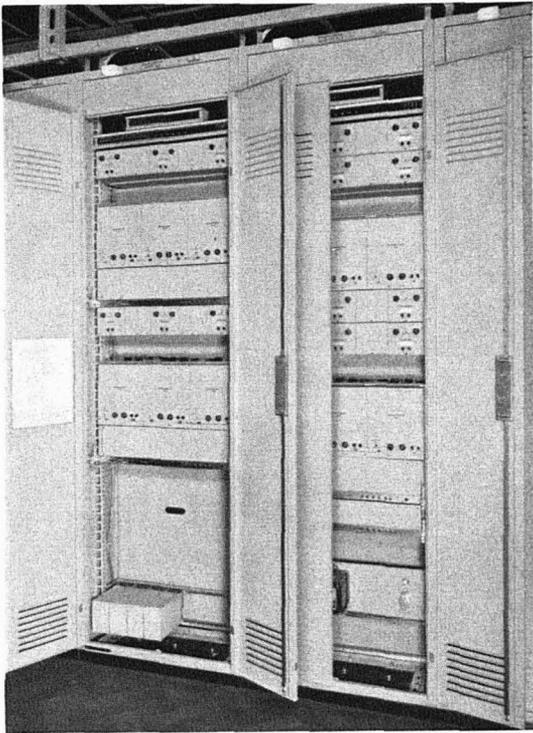


Bild 7 Geräteschränke des Sicherheitssystems in Einschubbauweise

stände des Sicherheitssystems werden über Signalschaltungen gemeldet, die aus Relais bestehen. Weitere Relais-einschübe enthalten die Mittelwertumschaltung und die 2-von-3-Schaltungen für die Unterbrechung der Magnet-halteströme.

Warte und Geräteraum

Der Reaktorbetrieb soll von einer zentralen Warte aus geleitet werden. Auf einer Schalttafel und einem Pult sind alle Anzeige-, Schreib- und Signalgeräte, die Aufschluß über den Betriebszustand der Anlage geben, und alle Bedienungsteile zum Schalten, Steuern und Regeln untergebracht. Sie ist nach gleichen Gesichtspunkten wie die zentralen Warten kontinuierlich laufender Anlagen der Verfahrenstechnik projektiert.

An zentraler Stelle der Warte steht das Steuerpult mit den Anzeige- und Bedienungsgeräten für die Reaktor-Leistungsregelung, für das Sicherheitssystem und die wichtigsten Teile des Steuersystems für den Schwerwasser-kreislauf. Das Mittelfeld der Schalttafel, dem Pult gegenüberliegend, gibt Aufschluß über den Betriebszustand des Reaktors selbst. Es enthält die Stellungsanzeiger und Handsteuerschalter für die einzelnen Trimmabschaltstäbe, Schreiber für Neutronenflußdichte, Reaktorperiode sowie für Druck und Temperaturen des Kühlmittels und die mit dem schweren Wasser abgeführte thermische Leistung.

Die übrigen Felder enthalten Fließbilder der vier Reaktor-kreisläufe mit den zugehörigen Anzeige-, Bedienungs- und Signalgeräten. Weitere Schalttafeldfelder sind für die Signallampen und Schreiber der Brennelementüberwachung vorhanden, ferner ein kleines Pult mit dem Meßwertdrucker.

Im Stockwerk unter der Warte befindet sich ein Geräte-raum, in dem die Geräteschränke für die Neutronenfluß-messung, die Strahlungsmessungen, das Sicherheits-system, die Leistungsregelung, die Steuersysteme der Kreisläufe, die Brennelementüberwachung und eine große Anzahl von Hilfsgeräten, wie Meßverstärker, Regler, Relais usw., aufgestellt sind. In einem besonders abgeteilten Raum steht ein Rangierverteiler, über den alle aus dem Reaktorgebäude kommenden Meß- und Steuerleitungen geführt und auf die Geräteschränke sowie Schalttafeln und Pult durchrangi-ert sind. Da das Reaktor-gebäude unter einem geringen Unterdruck gegenüber der Außenatmosphäre gehalten wird, um bei Schäden das Austreten aktivierter Luft zu verhindern, sind alle Kabel nach einem bereits beschriebenen Verfahren [4] gasdicht aus dem Reaktorgebäude herausgeführt.

Erwähnenswert ist, daß für die gesamte Instrumentie-rung eine eigene Energieversorgung vorhanden ist, die länger als eine Stunde einen vom Netz unabhängigen Betrieb ermöglicht. In einem besonderen Raum sind für Steuer- und Signalzwecke eine 60-V-Batterie mit Lade-gleichrichtern untergebracht. Zwei rotierende Umfor-mersätze mit Gleichstromantrieb, Batterie und Lade-gleichrichter speisen die mit 220 V Wechselspannung betriebenen Geräte.

Schrifttum

- [1] Berkl, K.: Ein elektrischer Stellantrieb für Trimmabschaltstäbe in Reaktoren. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 384 bis 385
- [2] Dosch, P.: Fragen der automatischen Überwachung des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2. Atomenergie (1957) 316
- [3] Hemmer, N. und Reinert, N.: Die Haft-Halte-Meldung für die Trimm-Abschalt-Stäbe des Karlsruher Reaktors FR 2. Arch. techn. Messen (1959) Lfg. 285, R 101 bis R 104
- [4] Hitzig, K.: Gasdichte Kabeldurchführungen im Karlsruher Reaktor FR 2. Siemens-Zeitschrift **33** (1959) 630 bis 634
- [5] Janner, K.: Zur Anordnung von Strahlungsmeßfühlern für die Regelung von Kern-reaktoren. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 279 bis 284
- [6] Kaltenecker, H.: Überwachungssysteme für Meßgrößen. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 287 bis 291
- [7] Kaltenecker, H.: Auswahlssysteme zur Erhöhung der Sicherheit von Signalen. Rege-lungstechnik (1958), H. 3
- [8] Kalusche, H.: Neutronenfluß-Meßkanäle für Reaktoren. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 285 bis 287
- [9] Dauth, R. und Kraus, H.-J.: Der Trimmabschaltstab des Karlsruher Reaktors FR 2. ATM (1958) R 71 bis R 74
- [10] Leisegang, S. und Merz, L.: Meß- und Regeltechnik am FR 2. Die Atomwirtschaft (1957) 416
- [11] Liesegang, H.: Ein logarithmischer Gleichstromverstärker mit selbsttätiger Drift-kompensation und kurzer Einstellzeit. ATM (1958) R 68 bis R 71
- [12] Rinn, F. H.: Ein vielseitiges Strahlungsmeßgerät. Siemens-Zeitschrift **32** (1958) 360 bis 365
- [13] Wehrle, G.: Ein Gleichstromverstärker mit automatischer Driftkompensation. ATM (1958) R 65 bis R 68
- [14] Winterer, G.: Das Schaltgalvanometer, ein robustes Überwachungsinstrument hoher Empfindlichkeit. Siemens-Zeitschrift **34** (1960) 218 bis 219
- [15] Wirtz, K.: Karlsruhe research reaktor FR 2. Bericht der zweiten Genfer Konferenz (1958) A/Conf. 15/P/1660