

KFK-396

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1965

KFK 396

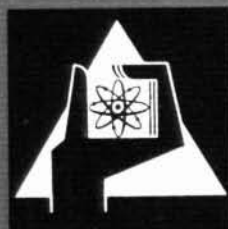
Institut für Reaktorentwicklung

Sicherheitsbericht für BR2-Material-Bestrahlungsversuche,
Projekt Mol 2

Untersuchung des Kriechverhaltens von Can-Materialien
unter Bestrahlung

K. Gast, W. Kramer

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Hauptabteilung Bibliothek und Medien



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Oktober 1965

KFK 396

Institut für Reaktorentwicklung

Sicherheitsbericht für BR2-Material-Bestrahlungsversuche,
Projekt Mol 2
Untersuchung des Kriechverhaltens von Can-Materialien
unter Bestrahlung

von

K.Gast und W.Kramer

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der
EUROPÄISCHEN ATOMGEMEINSCHAFT und der GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG
auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1.	Einleitung	1
2.	Auslegung der Bestrahlungseinrichtung	1
2.1	Allgemeine Gesichtspunkte	1
2.2	Auslegungsdaten und Anordnung der Bestrahlungsproben	2
3.	Bestrahlungsprogramm	4
4.	Beschreibung der Bestrahlungseinrichtung	5
4.1	Bestrahlungskanäle	5
4.2	Bestrahlungseinsatz	6
4.3	Helium-Druckversorgung	8
4.4	Temperatur-Regelanlage	11
5.	Handhabung des Bestrahlungseinsatzes	12
5.1	Einbau	12
5.2	Ausbau	13
5.3	Operationen in der Heißen Zelle	14
6.	Transportfragen	14
6.1	Transport der Bestrahlungseinsätze von Karlsruhe nach Mol	14
6.2	Transport der bestrahlten Proben von Mol nach Karlsruhe	14
7.	Vorversuche und Erprobungen	14
8.	Sicherheitsbetrachtungen	16
8.1	Reaktivitätsbeitrag	16
8.2	Aktivitäten	16
8.2.1	Feste Aktivitäten	16
8.2.2	Tritium	17
8.3	Mech.Festigkeit der Bestrahlungskapsel	20
8.3.1	Äußerer Überdruck	20
8.3.2	Innerer Überdruck	20
8.3.3	Beanspruchung beim Ein- und Ausbau	21
8.4	Elastische Durchbiegung der Kapsel beim Einbau	21
8.5	Sicherheit gegen Sieden an der Kapseloberfläche	22
9.	Kurze Störfallanalyse	24

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung Nr.	1	Bestrahlungseinsatz
"	"	2 Prüfling
"	"	3 Druckversorgungsschema
"	"	4 Temperatur-Regelanlage, Schaltplan
"	"	5 Aktivität des Bestrahlungseinsatzes im Corebereich von - 373 bis + 267
"	"	6 Durchbiegung des Bestrahlungseinsatzes beim Einbau
Tabelle	1	Richtanalysen der Legierungen
"	2	Gewichte der Legierungselemente im Corebereich von -373 bis + 267
"	3	γ -Spektrum der festen Aktivitäten
"	4	Verteilung der Aktivitäten auf die einzelnen Isotope
"	5	Störfallanalyse

Durch vorliegenden Bericht wird der Bericht 2. Phase von Mai 1964 ersetzt.

1. Einleitung

Bei der Auswahl geeigneter Can- und Strukturwerkstoffe für einen Schnellen Brutreaktor ist deren Anfälligkeit gegen Strahlenschäden ein wichtiges Kriterium. Insbesondere bei Canwerkstoffen ist die Frage von Bedeutung, bis zu welcher Temperatur das Hüllmaterial dem inneren Druck durch die Ausdehnung des Spaltstoffes und die Freisetzung von Spaltgasen für die Einsatzdauer eines Brennelementes standhält. Je genauer diese Temperatur ermittelt werden kann, desto höher kann die Oberflächentemperatur der Brennelemente zugunsten des thermischen Wirkungsgrades und/oder einer kleineren Kühlmittelumwälzleistung angesetzt werden. Es soll deshalb eine Reihe von aussichtsreichen Werkstoffen auf ihr mechanisches Verhalten unter Bestrahlung in einem möglichst hohen schnellen Fluß untersucht werden.

Die Bestrahlungsversuche, bezeichnet mit "Projekt Mol 2", werden im Reaktor BR2 in Mol durchgeführt und betreffen die Bestrahlung von Hüllröhrchen unter Innendruck bei regelbarer Temperatur, um Aussagen über die Zeitstandfestigkeit verschiedener Hüllwerkstoffe zu gewinnen.

2. Auslegung der Bestrahlungseinrichtung

2.1. Allgemeine Gesichtspunkte

Die Experimentiereinrichtung soll die Möglichkeit bieten, verschiedene hochwarmfeste Legierungen unter annähernd den gleichen Bedingungen, denen sie als Brennstoff-Hüllmaterial in einem Schnellen-Brutreaktor ausgesetzt sein werden, auf ihr Temperatur-Standzeitverhalten zu untersuchen. Für die Auswahl des Bestrahlungsortes im Core des BR 2 waren folgende Gesichtspunkte maßgebend:

Die Prüflinge sollen einem möglichst hohen schnellen Neutronenfluß ausgesetzt sein.

Die Bestrahlungskosten sollen durch Verwendung eines Kanals mit kleinem Durchmesser niedrig gehalten werden.

Es soll ein Bestrahlungseinsatz mit einer Vielzahl von Heiß- und Versorgungsleitungen so eingebaut werden, daß der normale Betrieb des Reaktors nicht gestört wird, und ein Brennelementwechsel ohne Ausbau des Einsatzes vorgenommen werden kann.

Als Bestrahlungskanal wurde aus diesen Gründen das Innere eines 6-schaligen Brennelementes gewählt. Es sollen jeweils zwei Einsätze gleichzeitig in 2 Kanälen bestrahlt werden.

Beide Kanäle sind durchgehend, d.h. sie haben eine Durchführung am unteren Reaktordeckel, durch die alle Meß- und Versorgungsleitungen in den sub pile room geführt werden. Der Einbau der Bestrahlungseinsätze erfolgt von oben. Die Brennelemente können unabhängig von den Einsätzen ausgewechselt werden.

2.2 Auslegungsdaten und Anordnung der Bestrahlungsproben

Die Probekörper sind gasdicht verschlossene Röhrrchen, die mit einem steuerbaren Helium-Innendruck von maximal 450 ata beaufschlagt werden können und deren Temperatur durch elektrische Innenheizung über eine elektronische Regelanlage konstant gehalten wird. Die Temperatur wird mit drei Mantel-Thermoelementen je Prüfling gemessen und registriert. Die Daten der Prüflinge sind folgende:

Außendurchmesser	7,0 mm
Wanddicke	0,4 mm
Gesamtlänge	62,0 mm
Länge der Heizwendel	34 mm
Heizleiter Thermokoax	1 Nc I 075/15
max. elektr. Heizleistung	250 Watt
max. Oberflächentemperatur	800°C
max. Innendruck	450 ata
Füllgas	Helium

In einem Bestrahlungseinsatz sind 8 Prüflinge coaxial angeordnet, von denen jeder über 3 zweipolige Thermoelementleitungen, eine Heizstromleitung und ein Kapillarrohr für die Druckkonstanthaltung mit der Kontrolleinrichtung im BR2-Betriebsgebäude verbunden ist. In zwei Bestrahlungskanälen können also gleichzeitig 16 Prüflinge bei verschiedenen Temperaturen und unter beliebiger mechanischer Spannung bestrahlt werden.

Entscheidend für den Aussagewert des Experimentes ist die Genauigkeit, mit der die Wandtemperatur der Proben gemessen und über eine bestimmte Meßlänge und eine längere Bestrahlungszeit konstant gehalten werden kann, bzw. mit der systematische Temperaturfehler rechnerisch eliminiert werden können; denn relativ kleine Temperaturänderungen haben bereits eine erhebliche Verkürzung oder Verlängerung der Standzeit zur Folge.

Die durch Temperaturfehler verursachte Streuung der ermittelten Zeitstandwerte muß deshalb klein sein gegenüber der durch Strahlenschäden zu erwartenden Veränderung der Materialkennwerte. Die zeitliche Temperaturkonstanz ist durch eine Präzisions-Regelanlage mit einer Genauigkeit von ca. ± 1 °C gewährleistet. Sehr schwierig ist es dagegen, die Oberflächentemperatur exakt zu messen und über einen gewissen Bereich der Proben örtlich konstant zu halten, weil durch den hohen γ -Fluß im BR 2 und die daraus resultierende hohe spezifische Heizleistung der Proben einerseits und die kleinen Abmessungen der Bestrahlungskapsel andererseits erhebliche Temperaturgradienten in der Umgebung der Probenoberfläche entstehen. Die Prüflingsröhrchen sind deshalb innerhalb eines gemeinsamen Hüllrohres von einem mit Helium gefüllten Ringraum umgeben, der bis auf die Thermoelemente frei von Meßleitungen ist, die die Temperaturverteilung beeinflussen würden. Dieser Ringraum ist so dimensioniert, daß die Temperatur der Prüflinge durch die maximale γ -Absorption von 16 Watt/g bei abgeschaltetem elektr. Heizstrom einen Wert von 500 °C nicht überschreitet, so daß bei der niedrigsten Versuchstemperatur von 550 °C noch elektrisch geregelt werden kann. Je größer der die Prüflinge umgebende Gasspalt ist, desto kleiner bleiben die Einflüsse von Maßabweichungen, Exzentrizität und Dehnung der Proben auf ihre Temperaturverteilung. Der bis zur äußeren Kapselwand verbleibende Ringraum besteht deshalb aus einem Aluminiumrohr, in das sämtliche Meß- und Versorgungsleitungen eingebettet sind. Dadurch wird erreicht, daß der größte Teil des Temperaturgefälles zwischen Probenoberfläche und Kühlwasser für den Gasspalt zur Verfügung steht. Die Ausdehnungsmöglichkeit der Prüflingsröhrchen während des Kriechvorganges beträgt auf Grund des zwischen Prüfling und Probenträger vorgesehenen Ringspaltes und bei Berücksichtigung der auf dem Prüfling angebrachten Thermoelemente ca. 14%. Falls eine weitere Dehnung während der Bestrahlung stattfindet, würde der Prüfling am Probenträger anliegen, wodurch eine freie Dehnung nicht mehr möglich wäre.

Ein Teil der zum Einsatz kommenden Werkstoffe hat Bruchdehnungen von ca. 1%, so daß hierbei keinerlei Schwierigkeiten auftreten. Eine 2. Gruppe von Materialien besitzt jedoch Bruchdehnungen von ca. 30% und mehr. Um bei fortschreitendem Kriechen zu verhindern, daß solche Prüflinge sich soweit aufblähen, daß ein Anliegen an den Probeträger stattfindet, ist der oberste Probenträger jedes Einsatzes mit einem kleinen elektrischen Kontakt ausgerüstet, der bei Erreichung von

ca. 8 % Dehnung eine Anzeige bewirkt, so daß die Heizung und Druckbelastung für den betreffenden Prüfling außer Betrieb gesetzt werden können. Der Zeitpunkt der Außer-Betriebnahme wird vom Bedienungspersonal der Anlage aufgeschrieben; dadurch ist es möglich, eine Aussage über den Zeitraum zu machen, in welchem eine bestimmte Dehnung eingetreten ist.

Es ist zu erwähnen, daß diejenigen Prüflinge, welche in der mit Kontaktvorrichtung ausgestatteten Position eingebaut sind, aus Platzgründen nur mit 2 Thermoelementen ausgerüstet werden können.

3. Bestrahlungsprogramm

Die Bestrahlungen sollen in den beiden durchgehenden und gleichwertigen Kanälen C 41 und C 319 gleichzeitig durchgeführt werden, wobei insgesamt 14 Bestrahlungseinsätze mit zusammen 112 Proben zur Bestrahlung gelangen. Die Belegung beider Kanäle wird sich insgesamt auf ca. 18 Monate erstrecken. Die Materialauswahl gliedert sich in zwei Versuchsgruppen.

Versuchsgruppe A:

austenitischer Stahl 20/25 Cr Ni

" " 16/13 Cr Ni Nb

Incoloy 800

Inconel X 750

Versuchsgruppe B:

Inconel 625

Inconel 718

V - 20 Ti

V - 20 Ti - 10 Nb

Im einzelnen handelt es sich um 80 Prüflinge der Versuchsgruppe A (10 Bestrahlungseinsätze) und um 32 Prüflinge der Versuchsgruppe B (4 Bestrahlungseinsätze).

Als Bestrahlungsdauer sind drei verschiedene Zeiten vorgesehen: 2, 4 und 8 Reaktorzyklen. Die Versuche werden bei zwei Temperaturen durchgeführt, und zwar bei 600 und 700°C.

Die Drücke in den einzelnen Prüflingsröhrchen richten sich nach der Werkstoffart und sind gestaffelt in prozentuale Anteile eines Bezugswertes, der selbst von Versuchsziel abhängig ist.

Die Drücke werden demnach im wesentlichen im Bereich von 40 bis 400 atü liegen.

In der Versuchsgruppe A sind bezüglich ihrer Duktilität zwei verschiedene Legierungstypen zu unterscheiden:

Aus Vorversuchen und Literaturangaben hat sich ergeben, daß die Legierungen 16/13 Cr Ni Nb und Inconel X 750 selbst beim Bruch nur Dehnungen unterhalb 1 % erreichen. Solche geringe Dehnungen sind jedoch in der Heißen Zelle nur schwerlich meßbar, so daß für diese beiden Legierungen eine Zeit-Bruch-Untersuchung vorgesehen ist; die Röhrrchen sollen also innerhalb der Bestrahlungszeit zu Bruch gehen.

Demgegenüber sind jedoch die Legierungen 20/25 Cr Ni und Incoloy 800 sehr duktil, so daß hierbei innerhalb der Versuchszeit eine meßbare Dehnung, jedoch kein Bruch angestrebt wird. Die Auslegung der Bestrahlungskapsel läßt eine Maximaldehnung von 14 % zu.

Eine Unterteilung der Legierungen der Versuchsgruppe B ist erst nach Abschluß der Vorversuche möglich.

Die Richtanalysen der für die Bestrahlung vorgesehenen Legierungen sind aus der Tabelle 1 im Anhang ersichtlich.

4. Beschreibung der Bestrahlungseinrichtung

4.1 Bestrahlungskanäle

Als Bestrahlungskanäle sind die Position C 41 und C 319 im Core des BR2, bestückt mit je einem Standardbrennelement vom Typ S VI i, vorgesehen. Beide Kanäle sind um einen Winkel von $5^{\circ}23'59''$ gegen die Vertikale geneigt und beiden ist eine Flanschdurchführung im Boden des Reaktorbehälters zugeordnet. Den eigentlichen Bestrahlungskanal bildet das Zentralrohr des BE's mit einem Innendurchmesser von 20,9 mm; nach Abzug eines Kühlpaltes von 1,75 mm verbleibt für den Bestrahlungseinsatz im Corebereich ein nutzbarer Durchmesser von 17,4 mm.

Unterhalb des Brennelementes hat das Führungsrohr eine lichte Weite von 80,14 mm. Für das Kühlwasser steht in diesem Bereich bei eingebautem Versuchseinsatz ein Ringspalt von 12,57 mm zur Verfügung.

4.2 Bestrahlungseinsatz

Die Außenhülle des Bestrahlungseinsatzes ist ein sehr schlankes, sich nach unten mehrfach erweiterndes Edelstahlrohr mit einer Gesamtlänge von ca. 5800 mm (siehe Abb.1). Der Oberteil der Kapsel, in dem koaxial die 8 Prüflinge sitzen, hat einen Aussendurchmesser von 17,4 mm und eine Wanddicke von 1 mm; er stützt sich auf der Höhe + 280 mm über drei Zentrierrippen gegen das Innenrohr des Brennelementes ab. Unterhalb des Cores erweitert sich das Kapselrohr auf einen Durchmesser von 55 mm; bei einer Wanddicke von 5 mm. Ober- und Mittelteil sind an der Durchmessererweiterung miteinander verschweißt (nach dem Einbau der Prüflinge). Der Kapselmittelteil ist auf den Höhen - 1105 mm und -2025 mm mit je 3 Rippen in dem Brennelement-Führungsrohr zentriert. In seinem Inneren sind Kupplungen für Thermoelementleitungen und Heizstromkabel und der Abschirmstopfen untergebracht. Kurz oberhalb des Durchführungsrohres erweitert sich die Kapsel auf 69,2 mm und dann auf den Durchmesser der Stopfbuchse von 69,5 mm und endet in einem Zapfen von 59 mm Durchmesser. An diesem Zapfen sind Anschlüsse für die Druckversorgungsleitungen und eine gasdichte Glasdurchführung für die Heizstrom- und Thermoelementleitungen.

Die eigentlichen Bestrahlungsproben (Röhrchen, Außendurchmesser 7 mm, Länge 45 mm) sind an den Enden durch eingeschweißte Formstücke verschlossen, die von der Stromzuführungsleitung bzw. von einem Kapillarrohr zur Druckeinspeisung durchbrochen werden. Beide Leitungen sind gasdicht mit den Deckeln verschweißt. Das Kapillarrohr hat einen Außendurchmesser von 1,2 mm und eine Wandstärke von 0,3 mm. Der Heizleiter ist ein Thermokoaxkabel von 1,5 mm Außendurchmesser mit einem Nickelmantel und Magnesiumoxydisolierung, der im Inneren des Prüflings auf einen Durchmesser von 0,75 mm ausgezogen und zu einer Spule gewickelt ist. Am Ende des Heizleiters ist die Ader mit dem Nickelmantel verschweißt, so daß der Heizstrom über den Ni-Mantel, den Prüfling und das Probenträgerrohr und außerdem über das Kapillarrohr zur Erde abfließt. Auf die Außenfläche der Proben sind drei - bei einem Prüfling nur zwei - 0,5 mm starke Mantel-Thermoelemente (Chromel-Alumel) direkt aufgeschweißt. Die Proben sitzen in je einem Probenträger aus AlIlg 3 mit einem Innendurchmesser von 9 mm, in dem sie durch die beiden Deckel zentriert sind. Die Passung zwischen Probendeckel und Probenträger ist so gewählt, daß die Prüflinge sich bei Erwärmung axial frei in einer Richtung ausdehnen können, andererseits aber ein guter Wärmeübergang an diesen Stellen mit erhöhter γ -Absorption gewährleistet ist.

Um die Proberöhrchen herum entsteht so ein Ringspalt von 1 mm, der mit Helium von maximal 2 atü gefüllt und bis auf die Thermoelmente frei von Meßleitungen ist. Die Ringräume der einzelnen Proben sind durch Nuten am Rand der Deckel miteinander verbunden und können über eine Spülleitung, die in den obersten Probenträger mündet, mit frischem Helium versorgt werden. Diese Leitung dient außerdem zum Spülen des Bestrahlungseinsatzes vor und nach der Bestrahlung. Die Heizleiter, Kapillarrohre und Thermoelementleitungen werden durch kurze Längsschlitze am Ende jedes Probeträgers herausgeführt und sind auf dessen Außenseite in Längsnuten eingebettet. Die einzelnen Probenträger sind zu einem Trägerrohr zusammengesteckt, das mit seiner Außenfläche an der Kapselwand so anliegt, daß eine freie Wärmedehnung möglich ist. Das Trägerrohr wird nach unten hin durch ein zweites Alu-Rohr mit einem Außendurchmesser von 20 mm verlängert, auf dessen Umfang 8 Heizleiter-Verbindungs muffen und 23 Thermoelementstecker befestigt sind. Die Muffen dienen zum Anschluß der Heizleiter an Thermokoaxkabel mit Nickelader, die bei gleichen Abmessungen nur etwa 1/10 des elektrischen Widerstandes haben. Durch die zweipoligen Stecker werden die 0,5 mm starken Thermoelentungen mit 1,5 mm starken Leitungen gleichen Typs verbunden.

Am Ende des Aluminiumrohres hängt der Abschirmstopfen. Er ist rund 2600 mm lang und besteht aus fertigungstechnischen Gründen aus Edelstahl. Die Meß- und Versorgungsleitungen werden in 4 Spiralnuten geführt, die außerdem als Verbindung zum oberen Kapselraum beim Evakuieren und Spülen des Bestrahlungseinsatzes dienen.

Der Stopfen endet kurz oberhalb der Durchmessererweiterung des Kapselrohres auf 69,2 mm. Der Unterteil der Kapsel enthält nur die gebündelten Meßleitungen. Nach unten wird die Kapsel mit den erwähnten Durchführungszapfen verschlossen; die Verbindung erfolgt mit einer Überwurfmutter und O-Ring-Abdichtung. Der Zapfen hat eine zentrische Bohrung, durch welche die Thermoelentungen und Heizleiterkabel zu einer gasdichten Durchführung verlaufen. Diese Bohrung ist über eine radiale Bohrung und eine Einschraubkupplung an die Vakuumleitung der Druckversorgungseinrichtung angeschlossen. Um die zentrale Bohrung herum sind 9 parallele axiale Sacklöcher angeordnet, in welche die Kapillarröhrchen und die Spülgasleitung gasdicht eingelötet sind.

Der He-Druckanschluß von außen erfolgt über radiale Bohrungen ebenfalls durch Einschraubkupplungen mit Flachdichtungen.

4.3 Helium-Druckversorgung

Die Druckversorgungs-Einrichtung hat im wesentlichen 2 Aufgaben zu erfüllen: einerseits die Beaufschlagung der beheizten Prüflinge mit Innendruck, um die Belastung der Can-Materialien infolge des Spaltgasdruckes und eventuell Ausdehnungen des Brennstoffes zu simulieren, und andererseits die Beaufschlagung der Bestrahlungseinsätze mit einer Inertgasatmosphäre. Da vorgesehen ist, gleichzeitig in zwei Brennelementkanälen zu bestrahlen, handelt es sich damit um die Versorgung von $2 \times 8 = 16$ Prüflingen und 2 Bestrahlungseinsätzen. Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise des Druckversorgungssystems gehen aus dem Schaltschema, Abb. 3 hervor. Die Anlage gliedert sich in das Evakuierungs- und Abgassystem, die Einspeisevorrichtung für die beiden Bestrahlungseinsätze und die Einspeisevorrichtung für die Prüflinge.

Die Bestrahlungseinsätze werden über Druckminderer und Rückschlagventile direkt von einer He-Flasche beaufschlagt.

Die Einspeisung der einzelnen Prüflinge erfolgt von einem Druckbehälter, der bei 1 l Inhalt auf einen Druck von 500 atü bei 80°C ausgelegt ist und in allen Einzelheiten den Bestimmungen der Druckbehälter-Richtlinien entspricht. Die Versorgung des Behälters erfolgt durch einen Membrankompressor, so daß immer ölfreies Helium zur Verfügung steht. Der Gasdruck in den einzelnen Prüflingen muß für jeden Prüfling getrennt eingestellt werden können, wobei seitens der Anlage ein theoretischer Maximaldruck von 500 atü möglich ist.

Diese Forderung wird durch die gewählte Kaskadenschaltung erfüllt. Die einzelnen absperrbaren Speicherleitungen können über ein Rückschlagventil getrennt beaufschlagt werden. Jede Versorgungsstrecke besitzt eine unabhängige Druckmeßeinrichtung, welche mit einem elektronischen Grenzwertmelder für einstellbaren Maximal- u. Minimaldruck ausgestattet ist. Die von elektrischen Meßumformern aufgenommenen Drücke werden von Mehrfachpunktdruckern registriert. Um die Streuung der Belastung bei Ungenauigkeiten im Drucksystem gering zu halten, wurde eine Meßeinrichtung gewählt, deren Gesamttoleranz $\pm 1\%$ vom Meßbereichsendwert beträgt. Die wesentlichen Armaturen und Meßgeräte sind in einem geschlossenen Bedienungsschrank zusammengefaßt, der an das Abgassystem des DR 2 angeschlossen ist, wodurch ein eventuelles Austreten von Tritium verhindert wird.

Druckversorgung der Prüflinge

Das gesamte System wird über die Vakuumpumpe weitmöglich evakuiert, wobei Zwischenspülungen mit Helium vorgenommen werden.

Der Füllvorgang eines Prüflings gliedert sich in folgende Stufen:

a) Die einzelnen Speicherleitungen werden über ein System von Dosierventilen voneinander unabhängig gefüllt. Die Speicherleitung ist dabei zum Prüfling hin noch abgeschlossen. Nach dem Füllen wird die Zufuhr ebenfalls wieder gesperrt. Der Druck in den einzelnen Speicherleitungen wird registriert. Die Druckmeßeinrichtung besitzt Grenzkontakte, die bei einem für jede Leitung getrennt einstellbaren Maximal- und Minimalwert Signale auslösen

b) Die einzelnen Prüflinge werden durch Öffnen des jeweiligen Ventils beaufschlagt, welches die Verbindung zwischen der Speicherleitung und dem Kapillarrohr zum Prüfling herstellt. Zwischen Speicherleitung und Prüfling findet ein Druckausgleich statt. Der sich einstellende Druck kann über die Druckmeßeinrichtung kontrolliert werden. Der Füllvorgang erfolgt in mehreren Stufen. Der Enddruck muß einen Wert derart erreichen, daß bei Ansteigen der Temperatur im Prüfling infolge der elektrischen und γ -Aufheizung sich bei Erreichen des stationären Zustandes im Prüfling der gewünschte Beaufschlagungsdruck einstellt. Bei einem evtl. Überdruck kann Gas über den Ventilblock in das Abgas-system abgegeben werden.

Beaufschlagung der Bestrahlungseinsätze

Die Einsätze werden im Normalfall mit Helium bei einem Druck von 1 -1,5 atü beaufschlagt. Durch den Unterdruck im Einsatz gegenüber dem Druck des Reaktorwassers ist gewährleistet, daß kein Gas in den primären Reaktorkreislauf gelangt.

Es ist jedoch möglich, daß durch ein Leck eines Einsatzes Reaktorwasser in diesen eindringt. Die Einsätze müssen deshalb als Stopfen des Reaktors angesehen werden, die die Aufgabe haben, das Auslaufen des Reaktorwassers über das Druckversorgungssystem zu verhindern.

Die Sicherheitsventile in den Absaugleitungen der Einsätze sind deshalb auf 15 atü, den theoretischen Druck des Reaktorwassers, eingestellt. Die Einsätze einschließlich der entsprechenden Rohrleitungen sind auf denselben Druck ausgelegt und werden bei der Fertigung einem Prüfdruck von 22,5 atü unterworfen.

In den Absaugleitungen der Einsätze sind insgesamt folgende Sicherungen gegen Drucküberschreitung eingebaut:

Kontaktmanometer mit Alarmgabe, eingestellt auf 5 atü,
Druckwächter mit Alarmgabe, eingestellt auf 10 atü,
Sicherheitsventil, eingestellt auf 15 atü.

Um ein allerdings unwahrscheinliches Eindringen von Reaktorwasser über die Bestrahlungseinsätze in das Druckversorgungssystem möglichst frühzeitig anzuzeigen, ist in jeder Absaugleitung ein Naßfühler eingebaut.

Nachdem die Bestrahlungseinsätze einschließlich der Leitungen weitmöglich evakuiert sind, kann über den Druckminderer und Feinregulierventile Helium aus einer Gasflasche eingespeist werden. Um sicher zu gehen, daß zwischen Eintritt und Austritt keine Verstopfungen vorhanden sind, sind sowohl an den Einspeiseleitungen zu den Einsätzen als auch an den Leitungen danach Kontaktmanometer angebracht.

Die beiden Bestrahlungseinsätze können vollkommen getrennt beaufschlagt werden.

4.4 Temperatur-Regelanlage

Eine Grundforderung an die Versuchseinrichtung ist, daß die Temperatur der Prüflingsröhrchen während der ganzen Versuchszeit mit großer Genauigkeit konstant gehalten werden muß. Außerdem soll die Temperatur jedes einzelnen Prüflings unabhängig von den übrigen im Bereich von 550-800°C wählbar sein. Diese Forderungen erfüllt die im folgenden beschriebene Präzisionsregelanlage zur kontinuierlichen Regelung des Heizstromes (siehe Abb.4). Es werden in 2 Bestrahlungskanälen insgesamt 16 Prüflinge gleichzeitig bei unterschiedlichen Temperaturen bestrahlt. Wegen der geringen Zeitkonstanten der Proben und der hohen Wärmestromdichte würde eine Ein-Aus-Regelung nicht genügen. Aus dem gleichen Grunde können auch keine mechanischen Stellglieder verwendet werden. Die 16 Regelkreise und der identische Reservekreis sind daher mit schnellen kontinuierlichen, voll-transistorisierten Reglern ausgerüstet. Jeder Regelkreis besteht aus den folgenden Gliedern: Chromel - Alumel - Thermoelement (Istwert), Sollwertgeber, Soll- Istwert - Vergleichsstelle, Nullverstärker, PID-Regler, stromgesteuerter Transduktor und Trenntransformator.

Die Trenntransformatoren sind für eine maximale Ausgangsleistung von 300 VA bei einer wählbaren Spannung von maximal 88 Volt ausgelegt. Da die Heizwicklungen gemeinsam die Masse des Bestrahlungseinsatzes als Rückleitung benutzen, ist als Kurzschlußsicherung ein Transformator zur galvanischen Trennung der Regelanlage vom Netz vorgesehen.

Sämtliche Teile der Anlage sind in 2 Bedienungsschränken untergebracht; Schrank I enthält 8, Schrank II 9 Regelkreise, Der Reservekreis kann jeden einzelnen der 16 Regelkreise ersetzen. Die gesamte Temperaturregelanlage ist elektrisch abgesichert. Mit der beschriebenen Regelanlage wird die Prüflingstemperatur in den Grenzen $\pm 1^{\circ}\text{C}$ konstant gehalten.

Leistungsdaten

max. Leistungsbedarf eines Prüflings (3,25 A, 77 V) 250 Watt
max. Ausgangsleistung eines Transduktors 300 Watt
max. Leistungsbedarf für die ganze Regelanlage ca. 15 KVA

Regelvorgang

Als Istwert dient die EMK eines der 3 Thermoelemente jedes Prüflings. Dieser Thermospannung wird die Spannung einer Sollwertgebereinheit entgegengeschaltet. Die Differenzspannung wird über einen O-Verstärker dem PID-Regler zugeführt. Der Regler steuert einen Transduktor, welcher über einen Trenn- und Anpassungstransformator den Heizstrom für den Prüfling liefert. Die den Regelvorgang auslösenden Störgrößen

sind der zeitlich veränderliche γ -Fluß und Änderungen der Wärmeabfuhrbedingungen im Gasspalt durch Dehnung oder Durchbiegung der Prüflinge. Netzspannungsschwankungen innerhalb $\pm 10\%$ haben keinen Einfluß, weil der Regelkreis eine solche Änderung in kürzester Zeit nachregelt.

Temperaturmessung

Alle Temperaturmessungen werden auf Mehrfachpunktdruckern registriert, wobei für jeden der beiden Bestrahlungseinsätze getrennte Instrumente vorgesehen sind. Die Thermoelemente, welche zur Regelung benutzt werden, sind über einen Entkopplungsverstärker mit dem entsprechenden Punktdrucker verbunden. Dieser Verstärker hat eine hohe Eingangsimpedanz und verhindert eine Beeinflussung des Regelvorganges durch den Punktdrucker im Augenblick des Abgleichens. Die Messungen der Thermoelemente, welche nur zur Registrierung da sind, werden zusammen und getrennt von den Messungen der Thermoelemente, welche auch zur Regelung dienen, auf einen eigenen Punktdrucker aufgezeichnet. Die Temperatur jedes Prüflings kann außerdem über das Regelthermoelement mit einem direkt anzeigenden Gerät gemessen werden. Es dient hauptsächlich zur Kontrolle der Prüflingstemperatur beim Anfahren und zur Kontrolle des Reglers.

5. Handhabung des Bestrahlungseinsatzes

5.1. Einbau

Der Einbau der Bestrahlungskapsel in den Reaktor erfolgt von oben in den leeren, d.h. nur mit Wasser gefüllten Kanal. Die Kapsel hängt dabei an einem Auswechselrohr, das den Kapseloberteil umschließt und mit dem 55 mm starken Mittelteil über einen Spezialverschluß verbunden ist. Der Durchführungszapfen am unteren Ende des Einsatzes steckt in einer Hülse mit einem Außendurchmesser von 69,2 mm, die mit dem Kapselunterteil verschraubt, mit einem O-Ring abgedichtet und mit einer Stiftschraube gegen Verdrehen gesichert ist. Diese Hülse hat unten ein Sackloch mit Trapezgewinde, in das beim Absenken der Kapsel der Gewindezapfen des Verschlußstopfens eingreift. Nach Entfernen des losen Flansches an der Tankdurchführung kann die Kapsel weiter abgesenkt werden, bis die Verbindungsstelle Dichtungshülse-Kapselunterteil die Stopfbuchse verlassen hat, ohne daß Wasser

aus dem Reaktorgefäß in den sub pile room austritt. Danach werden Verschlussstopfen und Dichtungshülse von der Kapsel getrennt und diese mit einem losen Flansch befestigt. Der Einsatz wird mit einer gesicherten Überwurfmutter mit dem Flansch verschraubt. Zuletzt werden die Druckanschlußkupplungen eingeschraubt und der Gegenstecker mit den elektrischen Anschlußleitungen an den Durchführungszapfen befestigt.

Die Dichtheit der Druckanschlüsse und des Vakuumanchlusses wird nach beendeten Einbau folgendermaßen geprüft: Nacheinander werden sämtliche Prüflinge bis zu dem jeweils maximalen Betriebsdruck mit Helium gefüllt und die dazugehörige Einschraubkupplung mit einer Lecksonde abgeschnüffelt. Die zulässige Leckrate beträgt 10^{-5} Torr . l/sec.

5.2 Ausbau

Der Ausbau eines Bestrahlungseinsatzes erfolgt frühestens 24 Stunden nach Abschalten des Reaktors, und zwar erst nach einer gründlichen Reinigung der Prüflinge und der Kapsel von Tritium. Das Reinigungsverfahren wird im Abschnitt 8.2.2 beschrieben. Die Reihenfolge der einzelnen Arbeitsschritte beim Ausbau wird ebenso wie für den Einbau genau festgelegt:

1. Das Brennelement des betreffenden Kanals wird ausgebaut.
2. Das Auswechselwerkzeug wird in den Kanal abgesenkt und mit dem Bestrahlungseinsatz gekuppelt.
3. Der Durchführungszapfen an unteren Ende der Kapsel wird abgeschraubt und sämtliche Leitungen durchgetrennt.
4. Die Dichtungshülse wird aufgeschraubt und mit einer Stiftschraube gesichert.
5. Der Verschlussstopfen wird mit der Dichtungshülse verbunden.
6. Überwurfmutter, Sicherungsplatte und Schrauben am Flanschdeckel werden gelöst.
7. Der Standard-Flanschdeckel wird an Verschlussstopfen befestigt.
8. Der Bestrahlungseinsatz wird langsam durch die Stopfbuchse gezogen, bis der Verschlussstopfen in seiner normalen Position ist.
9. Der Flanschdeckel wird am Tankboden befestigt und der Verschlussstopfen von Einsatz gelöst.
10. Der Bestrahlungseinsatz wird aus dem Kanal herausgezogen und in das Absetzbecken transportiert. (Abschirmung beachten).

5.3 Operationen in der Heißen Zelle

Nach der Bestrahlung bleibt jeder Einsatz mindestens 10 Tage im Absetzbecken; in dieser Zeit klingen die kurzlebigen Aktivitäten ab. Die Zerlegung erfolgt danach in der Heißen Zelle, wobei folgende Operationen auszuführen sind:

1. Der Bestrahlungseinsatz wird auf einer Trennvorrichtung positioniert und das Oberteil abgetrennt.
2. Die Hüllrohrzentrierung am Oberteil wird abgetrennt.
3. Das Oberteil wird zwischen dem 4. und 5. Prüfling halbiert.
4. Die beiden je 320 mm langen Teile werden in eine spezielle Transportkapsel eingebracht.
5. Die Kapsel wird in den Transportbehälter eingesetzt und dieser mit einem Stopfen verschlossen.

6. Transportfragen

6.1 Transport der Bestrahlungseinsätze von Karlsruhe nach Mol

Die Bestrahlungseinsätze werden in fertig montiertem Zustand und in Spezialkisten verpackt per LKW von Karlsruhe nach Mol transportiert. Sie sind innerhalb der Kisten mehrfach unterstützt und so fixiert, daß sie sich weder verbiegen noch in der Verpackung bewegen können.

6.2 Transport der bestrahlten Proben von Mol nach Karlsruhe

Nach der Bestrahlung werden die Oberteile der Bestrahlungseinsätze mit den Prüflingen von einer Speditionsfirma per LKW zur Auswertung von Mol nach Karlsruhe geschafft.

Zu diesem Zwecke werden die beiden Teilstücke eines Einsatzes in eine Aluminiumkapsel gesteckt, die bereits unter Punkt 5.3 erwähnt wurde und genau in den Abschirmbehälter paßt. Der Behälter ist in einer separaten Notiz, TA 2 - Notiz Nr. 64/20, eingehend beschrieben.

7. Vorversuche und Erprobungen

Die bereits durchgeführten Vorversuche dienten hauptsächlich der Prüfung wichtiger Einzelkomponenten der Bestrahlungseinrichtung, insbesondere des Einsatzes auf Druckfestigkeit, Dichtheit, erreichbare Genauigkeit usw. Im folgenden werden einige wichtige Vorversuche kurz beschrieben:

Bestrahlungseinsätze und Prüflinge

Es wurde ein vereinfachter Einsatz hergestellt, der fast alle wesentlichen Komponenten des endgültigen enthält. An diesem "Prototyp" wurden folgende Versuche durchgeführt:

1. Druckproben und Dichtheitsprüfungen, besonders an den Einschraubkupplungen (Ermittlung der erforderlichen Flächenpressung an den Flachdichtungen).
2. Erreichbares Vakuum im Einsatz.
3. Optimale Ausbildung der Thermoelement-Schweißstelle (erreichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit).
4. Bestimmung der axialen und tangentialen Temperaturverteilung im Prüfling.
5. Untersuchung des Einflusses von Herstellungstoleranzen und Verformung der Prüflinge auf die Temperaturverteilung.
6. Bestimmung der Zeitkonstanten der Prüflinge hinsichtlich ihres Temperaturverhaltens.
7. Bestimmung der maximalen Temperatur, bei welcher die Heizwicklung eines Prüflinges durchbrennt.
8. Ermittlung der wahren Oberflächentemperatur eines Prüflings.
9. Untersuchung über die Anwendungsmöglichkeit eines Dehnungskontaktes für die Prüflinge.
10. Berstversuche an verschiedenen Prüflingen.
11. Berstversuch am Kapselrohr 17,4 ϕ .

Hinsichtlich der Ergebnisse der einzelnen Versuche wird für interessierte Stellen auf folgende separate Notizen verwiesen:

TA2- Notiz Nr. 64/27 v. 14.10.64,
mit Nachtrag v. 17.2.65 und 22.6.65,

TA2- Notiz Nr. 65/51 v. 17.2.65,

TA2- Notiz Nr. 65/61 v. 3.5.65,

IRE2-Notiz Nr. 65/68 v. 26.7.65,

IRE2-Notiz Nr. 65/69 v. 2.7.65,

Erprobung der kompletten Anlage

Ein vollständiger out of pile-Test der gesamten Bestrahlungseinrichtung wird in Karlsruhe stattfinden, so daß sich die Prüfungen vor der Inbetriebnahme in Höl auf verschiedene erforderliche Funktionstests beschränken können. Beim out of pile-Test sollen insbesondere auch die Betriebsvorgänge wie Anfahren, Temperaturkorrektur, Druckeinspeisung und Gasspülung gefahren und erprobt werden.

Diese Versuche sollen alle für den späteren Betrieb erforderlichen Meßwerte und Erfahrungen bringen.:

Für die Bedienung der Bestrahlungseinrichtung in Mol wird auf die separate Betriebsanweisung verwiesen.

8. Sicherheitsbetrachtungen

8.1. Reaktivitätsbeitrag

Da kein spaltbares Material zur Bestrahlung kommt, kann der Bestrahlungseinsatz nur einen negativen Reaktivitätsbeitrag haben. Sein Beitrag ist wegen der geringen Masse des im Core befindlichen Teiles und wegen der relativ niedrigen Absorptionsquerschnitte der verwendeten Materialien, die sämtlich unter 4 barn liegen, gering. Er wird sicher kleiner sein als 0,7 Dollar.

8.2. Aktivitäten

Während der Bestrahlungen entstehen in dem Bestrahlungseinsatz mit Ausnahme des Tritiums nur feste Radiosotope der Legierungselemente. Diese Aktivitäten müssen hinsichtlich einer evtl. Strahlengefährdung während des Transportes untersucht werden, wobei wegen des "remote handling" nur die γ -Strahler zu berücksichtigen sind. Beim Tritium besteht die Gefahr der Incorporation, weil das Heliumvolumen innerhalb des Bestrahlungseinsatzes über die Einspeiseröhre und die Vakuumleitung mit den Reaktorbetriebsräumen in Verbindung steht.

8.2.1. Feste Aktivitäten

Es soll eine Abschätzung der größt möglichen Gesamtaktivität desjenigen Einsatzteiles angegeben werden, welcher nach der Bestrahlung zusammen mit den Prüflingen von Mol nach Karlsruhe transportiert werden muß. Bei der Aktivierungsrechnung ist von folgenden Annahmen ausgegangen worden, welche auf dem Bestrahlungsprogramm, Kapitel 3 dieses Berichtes, basieren:

1. Bestrahlungszeiten: 2,4 und 8 Zyklen mit 20 Tagen pro Zyklus
 2. maximaler thermischer Neutronenfluß = $4,3 \cdot 10^{14}$ n/cm² sec, max. totaler Neutronenfluß $1,0 \cdot 10^{15}$ n/cm² sec.
 3. Länge des interessierenden Einsatzoberteiles = 640 mm, von ca. - 373 bis + 267.
 4. Bei den Legierungsanteilen der einzelnen Prüflinge sind jeweils diejenigen Komponenten berücksichtigt worden, welche die höheren Aktivitätsbeträge ergeben. Es ist also sicherheitshalber mit einem theoretischen Bestrahlungseinsatz gerechnet worden, welcher ein etwas größeres Gewicht als in Wirklichkeit aufweist.
- Die unter diesen Voraussetzungen errechneten maximalen Aktivitäten sind als Funktion der Abklingzeit in Abb. 5 dargestellt.

Die Tabelle 2 im Anhang enthält eine Übersicht über die Gewichtsanteile der einzelnen Legierungselemente. Die Tabelle 3 zeigt die spektrale Verteilung der Strahlung nach 160 Tagen Bestrahlungsdauer, welche hinsichtlich der notwendigen Abschirmung aufschlußreicher als die Angabe von Curiewerten ist. In einer weiteren Tabelle 4 ist die Verteilung der Aktivitäten auf die einzelnen Isotope angegeben. Der Vollständigkeit halber seien für den Transportbehälter die Dosisleistungen, welche bei der unter den obigen Voraussetzungen berechneten maximalen Aktivität und mit Berücksichtigung des γ -Spektrums auftreten, noch angegeben. Bei einer Bestrahlungszeit von 160 Tagen ergeben sich folgende Dosisleistungen in mrem/h

	Abklingzeit		zulässig nach Strahlenschutz- verordnung
	10 Tage	30 Tage	
an der Oberfläche des Behälters	35	32	200
in 1m Abstand vom Behälter	3,5	3	10
in 50m Abstand vom Behälter	1,65	1,5	10

Der für den Transport und die Lagerung vorgesehene Behälter (vergl. Abschnitt 6,2) ist damit ausreichend.

8.2.2 Tritium

Als Druckgas für die Prüflinge und zum Spülen der Bestrahlungseinsätze wird hochreines amerikanisches Helium mit einem He^3 -Isotopenanteil von $1,37 \cdot 10^{-6}$ verwendet.

Bei der Sicherheitsbetrachtung werden zunächst folgende ungünstigen Annahmen gemacht:

1. Die gesamte Heliummenge im Corbereich ist einem thermischen Fluß von $6 \cdot 10^{14} \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ausgesetzt.
2. Das entstehende Tritium verteilt sich durch Diffusion gleichmäßig innerhalb der Kapsel und der Leitungen bis zu den Einspeiseventilen.
3. Die He^3 -Konzentration im Einsatz nimmt während der Bestrahlung nicht ab.

Ohne die unter 2. vorausgesetzte Vermischung der Gasvolumina in pile und out of pile wäre die He^3 -Konzentration bereits nach 60 Stunden Bestrahlungszeit auf die Hälfte abgesunken und nach etwa 10 Tagen wären praktisch alle ursprünglich vorhandenen He^3 -Atome in Tritium umgewandelt. Die spezifische Aktivität betrüge dann $1,34 \cdot 10^{-2}$ Curie pro Gramm Helium.

Bei einem Druck von 400 ata und einer Temperatur von 500°C befindet sich eine Heliummenge von 0,27 gr in den acht Proben, weitere 0,03 gr sind in den Ringspalten und zwischen den einzelnen Proben, so daß insgesamt 0,3 gr Helium der Bestrahlung ausgesetzt sind.

Unter den Voraussetzungen 1. 2. u. 3. beträgt die Tritium-Erzeugungsrate im Bestrahlungseinsatz $8,9 \cdot 10^{11}$ Atome/sec gr. Insgesamt werden also in einer Sekunde $2,67 \cdot 10^{11}$ Tritiumatome erzeugt. Die Gesamtaktivität steigt unter den getroffenen Annahmen linear mit der Bestrahlungszeit an und beträgt nach 20 Tagen $2,25 \cdot 10^{-2}$ Curie.

Die längste vorgesehene Bestrahlungsdauer für einen Einsatz beträgt 8 Reaktorzyklen à 20 Tage. Es ist beabsichtigt, das Drucksystem nach jedem Zyklus zu entlasten, zu spülen und mit frischem He zu beaufschlagen. Wenn jedoch die He-Füllung im Einsatz und in den Proben nicht erneuert würde, betrüge die Tritium-Aktivität nach 8 Zyklen 0,18 Ci.

Damit liegt man hinsichtlich der größtmöglichen erzeugten Tritiummenge auf der sicheren Seite. Die Kenntnis der maximalen Gesamtaktivität ist wichtig bei dem - allerdings sehr unwahrscheinlichen - Unfall, daß die gesamte aktivierte He-Menge plötzlich aus dem Drucksystem austritt. Bei einer Toleranzkonzentration in Atemluft von Kontrollbereichen von $2 \cdot 10^{-6}$ Curie/ m^3 wäre eine Verdünnung der 0,18 Curie Tritiumaktivität auf 90 000 m^3 Luft erforderlich. Um diesen Unfall und die Gefährdung von Personal durch eventuelle Leckagen von vorneherein praktisch auszuschließen, sind alle Bauteile des Drucksystems, die während des Versuchsbetriebs Tritium enthalten können, in einem Schrank untergebracht, der unter einem niedrigeren Druck als das BR 2- Betriebsgebäude steht und an das Abgassystem des BR 2 angeschlossen ist.

Die Verschraubungen der einzelnen Rohrleitungen mit dem Bestrahlungseinsatz sind bei der Montage auf eine Dichtheit derart überprüft worden, daß die Leckrate $\leq 10^{-5}$ Torr \cdot 1/sec beträgt. Wenn bei zwei Einsätzen mit insgesamt 24 Verbindungsstellen gerechnet wird, ergibt sich eine größt mögliche Leckrate von $2,4 \cdot 10^{-4}$ Torr 1/sec.

Für die Berechnung der in den subpile room austretenden Tritiummenge muß man im Gegensatz zu den Annahmen 2. und 3. davon ausgehen, daß gar kein Austausch der Gasvolumina in pile und out of pile stattfindet. In den Prüflingen und im Kapseloberteil sind dann sämtliche He^3 -Atome aktiviert, d.h. die Tritiumkonzentration beträgt $1,34 \cdot 10^{-2}$ Curie/gr oder $2,3 \cdot 10^{-6}$ Curie pro Normal-Kubikzentimeter. Bei einer Gesamtleckrate von $2,4 \cdot 10^{-4}$ Torr l/sec treten dann $3,16 \cdot 10^{-4}$ Ncm³/sec Helium und damit $7,3 \cdot 10^{-10}$ Curie /sec oder $2,63 \cdot 10^{-6}$ Curie/h in den Sub Pile Room aus. Es würde etwa 75 Stunden dauern, um damit einen unbelüfteten Raum von 100 m³ Inhalt auf Toleranzkonzentration für Atemluft zu bringen.

Um die Tritium-aktivität des Helium in den Bestrahlungseinsätzen und Prüflingen in bestimmten Grenzen zu halten, werden die einzelnen Rohrleitungen während der Abschaltperioden des Reaktors vom Gasdruck entlastet und mit Frischgas beaufschlagt.

Vor den Ausbau des Bestrahlungseinsatzes muß das Drucksystem soweit von Tritium gereinigt sein, daß die Druckanschlüsse am Kapselunterteil gefahrlos von Hand gelöst werden können. Nach Abschalten des Reaktors steht für die Reinigung ein ganzer Tag zur Verfügung; dabei wird folgendermaßen verfahren:

1. Das gesamte Drucksystem wird über die Leitung für radioaktive Gase entlastet.
2. Das System wird mehrere Stunden lang evakuiert, während die Prüflinge geheizt werden, um eine ev. Oberflächenbeladung mit Tritium zu reduzieren.
3. Sämtliche Prüflinge werden mit frischem Helium von ca. 100 atü beaufschlagt und nach ca. 1 Stunde wieder entlastet. Die Kapsel selbst wird mit Helium von 9 atü gefüllt, das nach einigen Minuten in die Abgasleitung abgelassen wird. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die Toleranzkonzentration für Atemluft erreicht worden ist.
4. Das System wird nochmals bei beheizten Proben evakuiert und schließlich mit Helium von 1 ata gefüllt.

Eine Abschätzung ergibt, daß spätestens nach dreimaligem Wiederholen des Vorganges Nr. 3 in den Proben und nach 5-maligem Wiederholen in der Kapsel die Toleranzkonzentration für Atemluft herrscht. Der Schritt Nr. 4 dient lediglich der Erhöhung der Sicherheit.

8.3 Mechanische Festigkeit der Bestrahlungskapsel

Eine mechanische Beanspruchung des Einsatzes entsteht durch äußeren Überdruck im Reaktorgefäß und unter Umständen bei plötzlich auftretenden Lecks an einem oder mehreren Prüflingen durch inneren Überdruck. Da die Kapsel festigkeitsmäßig mehrfach überdimensioniert ist, kann man den Fall einer Beschädigung der äußeren Hülle als sehr unwahrscheinlich betrachten. Sollte trotzdem durch eine nicht vorhersehbare Ursache ein größeres Leck an dem Teil der Kapsel auftreten, der sich innerhalb des Druckgefäßes befindet, so ist damit dieser Versuch beendet. In diesem Fall wäre der Ausbau der teilweise oder ganz mit Wasser gefüllten Kapsel zwar mit einigen Komplikationen verbunden, eine Störung des Reaktorbetriebes ist jedoch nicht zu erwarten. In Abschnitt 4.3 ist bereits darauf hingewiesen worden, daß im Falle des Eindringens von Reaktorwasser in den Bestrahlungseinsatz dieser als Stopfen des Reaktors angesehen werden muß. Die dadurch entstehende Beanspruchung der Kapsel bedeutet keine Gefahr für die Sicherheit des Reaktors.

8.3.1. Äußerer Überdruck

Der Wasserdruck von 12,5 atü erzeugt in der 1 mm starken Wand des Kapseloberteiles eine Tangentialspannung von $1,125 \text{ kg/mm}^2$, so daß gegen Einbeulen genügend Sicherheit vorhanden ist, zumal die Kapselwand durch die Proben-träger von innen abgestützt ist. Die Druckspannungen in dem Kapselmittelteil (55 mm ϕ , 5 mm Wanddicke) und in dem Unterteil (69,2 mm ϕ , 6 mm Wanddicke) betragen, $0,69 \text{ kg/mm}^2$ bzw. $0,73 \text{ kg/mm}^2$.

8.3.2. Innerer Überdruck

Wenn ein Prüfling durch die gleichzeitige Druck- und Temperaturbeanspruchung zerstört wird, so ist es sehr unwahrscheinlich, daß schlagartig das unter einem Druck von maximal 450 atü stehende Helium freigesetzt wird. Unter der ungünstigen Voraussetzung, daß sich die Heliumfüllung der Probe in diesen Fall zunächst nur auf den Ringspalt zwischen Probe und Proben-träger und die Gasräume zwischen dieser und den beiden benachbarten Proben verteilt, würde bei adiabatischer Entspannung momentan ein innerer Überdruck von 35 atü entstehen. Der Berstdruck des äußeren Mantelrohres liegt höher als 700 atü, so daß auch dann noch genügend Sicherheit gegen Zerstörung der Kapsel vorhanden ist, wenn sämtliche Prüflinge im gleichen Bruchteil einer Sekunde platzen sollten. Ein weiterer Druckaufbau durch nachströmendes Helium ist unmöglich, weil dem hydraulischen Widerstand der Kapillarrohre mit einem Innendurchmesser von 0,6 mm ein weit geringerer

Ausströmwiderstand in die unteren Teile der Kapsel und in das Abgassystem gegenübersteht. Eine Gefährdung der Kapselwand durch Druckwellen beim Aufplatzen einer Probe ist auszuschließen, weil der Ringspalt von 1 mm Breite nicht zur Ausbildung einer Druckwelle ausreicht; außerdem würde der Aluminium-Probenträger als Schockabsorber wirken.

8.3.3. Beanspruchung beim Ein- und Ausbau

Beim Ein- und Ausbau des Einsatzes wird der Kapseloberteil nicht durch Zug- oder Biegekräfte belastet, weil das Auswechselwerkzeug an dem 55 mm starken Kapselmittelteil angreift.

8.4. Elastische Durchbiegung der Kapsel beim Einbau

Durch die Neigung des Bestrahlungskanals gegen die Senkrechte und dadurch, daß der untere Teil des Einsatzes beim Absenken unterhalb des "grid" nicht mehr in einem Rohr geführt wird, ergibt sich eine elastische Durchbiegung; außerdem bewirkt das Spiel zwischen den Zentrierrippen am Mittelteil des Einsatzes und dem Führungsrohr eine Abweichung der Kapselachse von der Achse des Bestrahlungskanals. Die elastische Durchbiegung und die Achsabweichung dürfen zusammen einen Wert von 8 mm nicht überschreiten, damit der Gewindekopf am unteren Deckelstopfen noch in das Gewinde der Dichtungshülse am unteren Ende der Kapsel eingreifen kann. Die Einbausituation im Augenblick vor dem Gewindeeingriff ist in Abb. 6a skizziert. Der Einsatz ruht in diesem Zeitpunkt auf den Stützen A und B, und nach dem Einziehen in den unteren Kesselboden auf den Stützen B und C. Für die Berechnung der Durchbiegung wurde der Belastungsfall nach Abb. 6b angenommen. Die gesamte Abweichung setzt sich zusammen aus:

1. der elastischen Durchbiegung (f_1) auf Grund der Streckenlasten q_1 und q_2 (Eigengewicht Trägerrohr, Abschirmstopfen und sonstige Einbauteile),
2. der elastischen Durchbiegung (f_2) durch die Punktlast F (Durchführungszapfen und Montagehülse),
3. der Abweichung f_3 , die aus dem Spiel zwischen dem Führungsrohr und den federnden Zentrierungen A und B resultiert.

Je nachdem, ob durch die Lage der Einsätze die federnde Zentrierrippe bei A oder bei B eingedrückt wird, ergibt sich eine andere Abweichung f_3 .

Ergebnis: $f_1 = 2,0 \text{ mm}$
 $f_2 = 0,34 \text{ mm}$

$f_{3A} = 3,6 \text{ mm}$ (Feder bei A) $f_{3B} = 5,2 \text{ mm}$ (Feder bei B)

$f_{\text{ges}} = 5,94 \text{ mm}$ $f_{\text{ges}} = 7,54 \text{ mm}$

Damit liegt im ungünstigsten Falle die Mittenabweichung immer noch innerhalb der zugelassenen Toleranz. Der Sicherheit halber sollte beim Beladen des Einsatzes so vorgegangen werden, daß der Einsatz in einer solchen Lage eingeführt wird, daß keine federnde Zentrierrippe belastet wird.

8.5. Sicherheit gegen Sieden an der Kapseloberfläche

Die infolge der γ -Aufheizung und der elektrischen Heizung im Bestrahlungseinsatz erzeugte Wärmemenge muß durch das Kühlwasser des Reaktors abgeführt werden. Im Zusammenhang mit der Wärmeübertragung zwischen Kapseloberfläche und Reaktorwasser soll nachgewiesen werden, daß das Kühlwasser des Reaktors in der Umgebung der Kapsel nicht zum Sieden gelangt.

Die maximale γ -Aufheizung im Core beträgt bei einer Reaktorleistung von 50 MW thermisch 16 W/g. Für den Bestrahlungseinsatz gilt im Bereich der Prüflinge eine Gewichtsverteilung von ca. 9 g/cm. Damit wird die Wärmeleistung des Einsatzes infolge der γ -Aufheizung

$$S_1 = 144 \text{ W/cm}$$

Die elektrische Heizleistung pro cm Prüfling ist maximal

$$S_2 = 52,2 \text{ W/cm}$$

Die gesamte Wärmeleistung ergibt sich dann zu

$$S = S_1 + S_2 = 196 \text{ W/cm}$$

Unter Zugrundlegung eines stationären Wärmeflusses wird für den Wärmeübergang zwischen Kapseloberfläche und Wasser nach VDI-Wärmeatlas die Beziehung

$$Nu = c \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot (L/d)^S$$

angesetzt, welche für Längsströmungen allgemein gilt. Dabei ist für turbulente Längsströmung

$$c \cdot (L/d)^S = 0,024; m = 0,8; n = 0,335.$$

Mit den Gleichungen

$$Nu = \alpha \cdot d_h / \lambda$$

$$Re = c \cdot \gamma \cdot d_h / \nu \cdot g = c \cdot d_h / \nu$$

$$Pr = 3600 \cdot c_p \cdot \gamma / \lambda$$

wird

$$\alpha \cdot d_h / \lambda = 0,024 (c \cdot d_h / \nu)^{0,8} \cdot (3600 \cdot \nu \cdot c_p \cdot \gamma / \lambda)^{0,335}$$

Für die Wasserbedingungen im Reaktor mit einem Druck von ca. 10 ata und einer Temperatur von ca. 50 °C sind nachstehende Stoffwerte aus VDI-Wärmeatlas entnommen:

$$\begin{aligned} \nu &= 0,553 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \gamma &= 988 \text{ kg/m}^3 \\ c_p &= 0,997 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \\ \lambda &= 0,551 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Für den Kühlkanal zwischen Bestrahlungskapsel und BE-Zentralkrohr mit den Abmessungen $d_a = 20,9$ und $d_i = 17,4$ mm ist der hydraulische Durchmesser

$$d_h = 4 F/U = 3,5 \text{ mm} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Die Geschwindigkeit des Kühlwassers wird mit $c = 9$ m/s angenommen.

Mit obigen Werten ergibt sich eine Reynolds-Zahl von

$$Re = 56900$$

und eine Prandtl-Zahl von

$$Pr = 3,55$$

Die Wärmeübergangszahl α bestimmt sich dann zu

$$\alpha = 37000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

Dieser theoretisch ermittelte Wert erscheint unrealistisch; es wird deshalb im folgenden sicherheitshalber mit

$$\alpha = 20\,000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

gerechnet.

Für die abzuführende Wärmemenge gilt

$$S = \alpha \cdot F (t_w - t_{fl}) \quad (\text{Kcal/h})$$

es ist $1 \text{ kcal} = 1,163 \text{ Wh}$ und damit

$$S = 1,163 \cdot \alpha \cdot F (t_w - t_{fl}) \quad (\text{W/cm})$$

wobei t_w die Oberflächentemperatur der Kapsel und t_{fl} die Wassertemperatur bedeutet. Die Austauschfläche F wird auf einen cm Kapsellänge bezogen und beträgt dann $546 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

Bei einer mittleren Wassertemperatur von 50 °C und $S = 196 \text{ W/cm}$ bestimmt sich die Temperatur der Kapseloberfläche zu

$$t_w = 15,4 + 50 = 65,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Damit ist der Nachweis erbracht, daß die durch den Bestrahlungseinsatz anfallende Wärmemenge vom Kühlwasser des Reaktors abgeführt werden kann, ohne daß das Wasser an der Kapseloberfläche zum Sieden gelangt.

9. Kurze Störfallanalyse

Die bei evtl.auftretenden Störfällen an der Bestrahlungseinrichtung erforderlichen Maßnahmen sind der Übersicht halber tabellarisch zusammengestellt. (Siehe Tabelle 5 im Anhang). Für nähere Einzelheiten wird auf die Betriebsanweisung verwiesen.

Prüfung
Inneprüfung

- 1 wie 1
- 2 wie 1
- 3 wie 1
- 4 wie 1
- 5 wie 1
- 6 wie 1
- 7 wie 1
- 8 wie 1 mit Ausbauelement
- 9 wie 1
- 10 wie 1
- 11 wie 1
- 12 wie 1
- 13 wie 1
- 14 wie 1
- 15 wie 1
- 15 wie 1 mit Ausbauelement

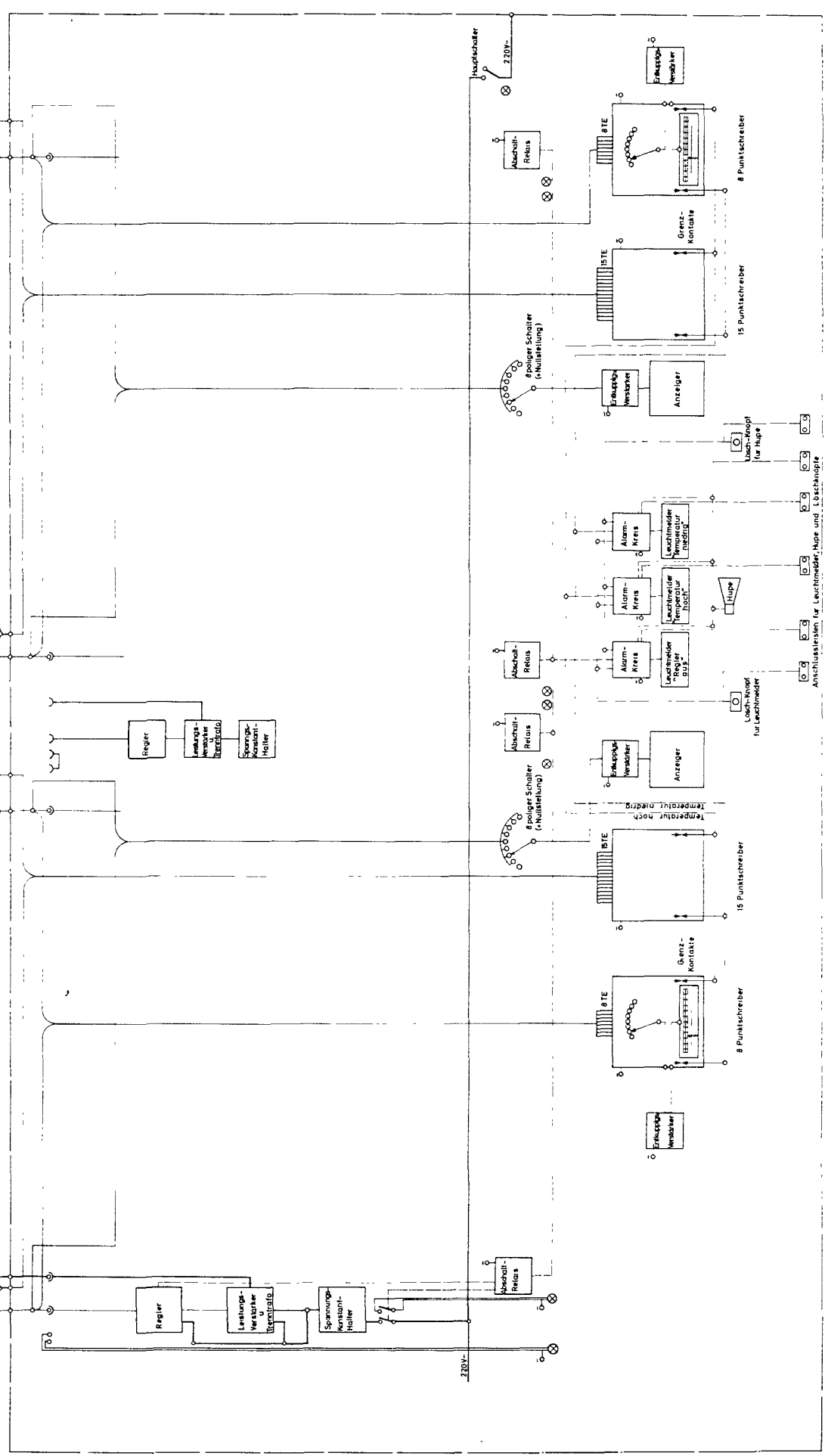
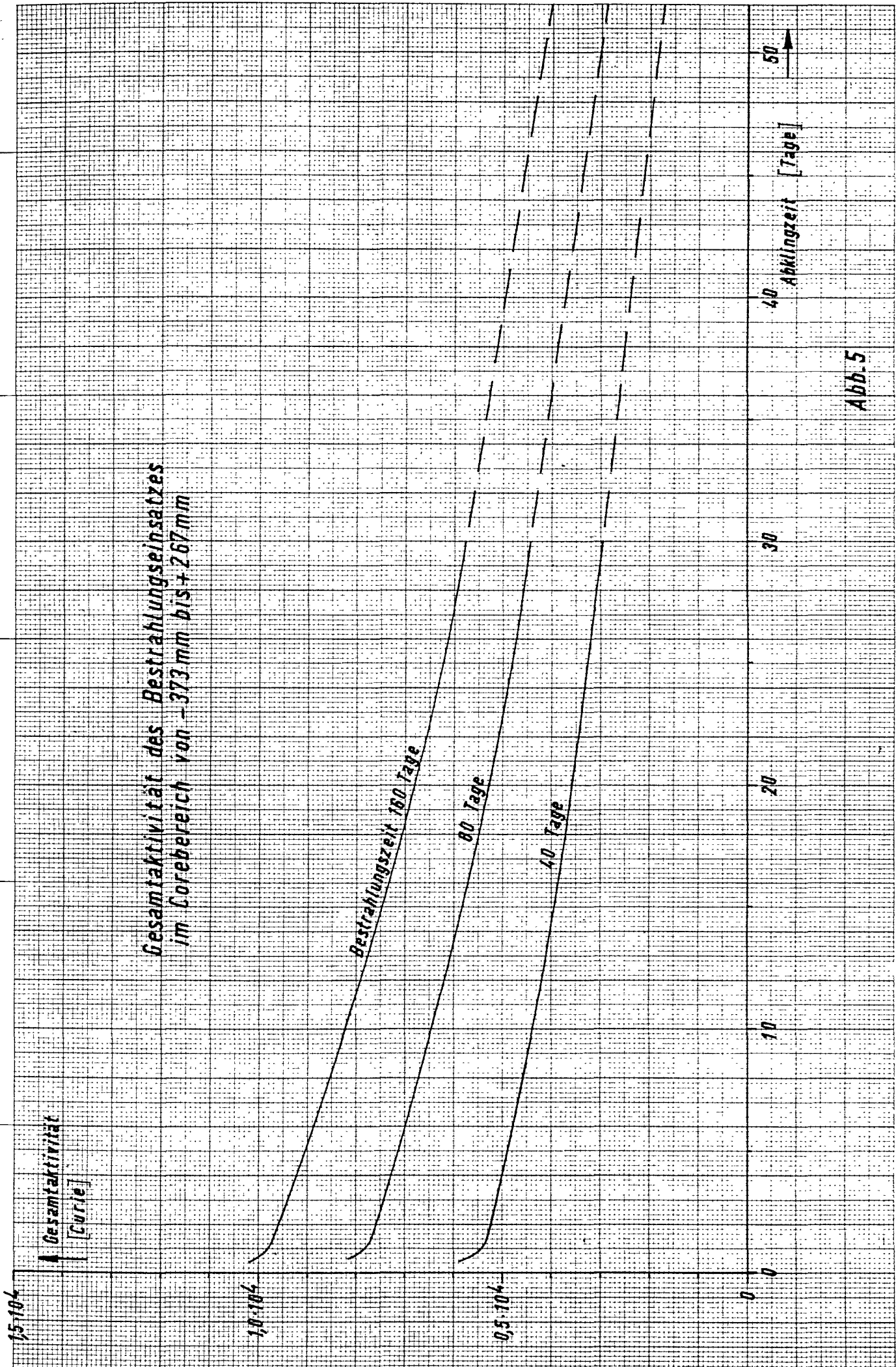


Abb. 4

Titel	Blatt	Blattzahl	Blätter
101	1	1	1
Zeichnungsart		Blattgröße	Blattformat
Schaltplan		A4	210 x 297 mm
Projekt		Verfasser	Prüfer
BRZ-Motor-Beobachtungsvorrichtung, Projekt, Teil-2		BRZ-Motor-Beobachtungsvorrichtung	BRZ-Motor-Beobachtungsvorrichtung
Temperatur-Regel-Kreis, Blockschaltbild		BRZ-Motor-Beobachtungsvorrichtung	BRZ-Motor-Beobachtungsvorrichtung

BRZ-Motor-Beobachtungsvorrichtung, Projekt, Teil-2
Temperatur-Regel-Kreis, Blockschaltbild

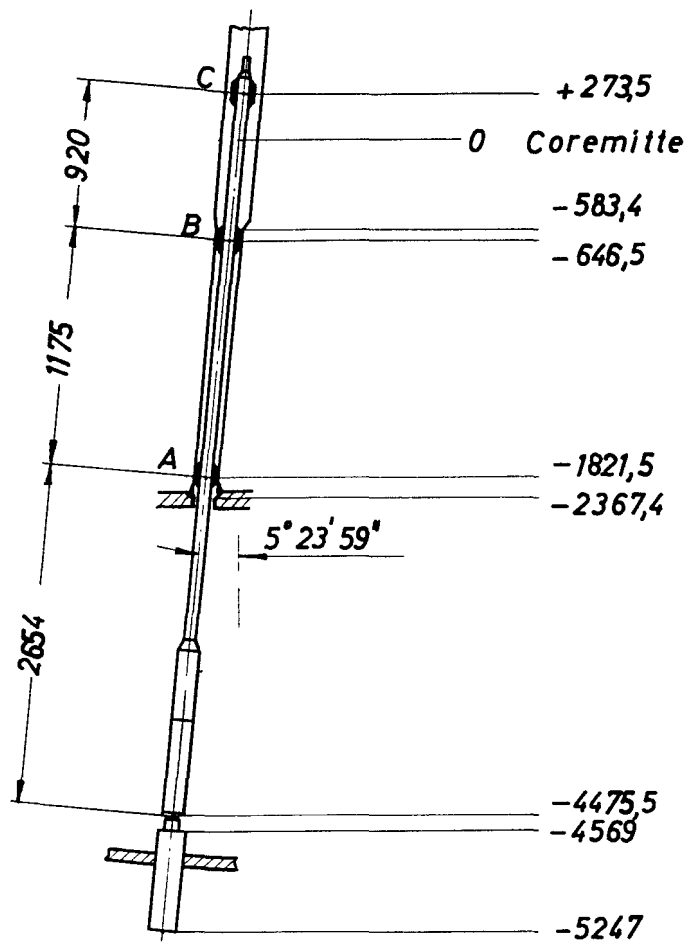


Gesamtaktivität des Bestrahlungseinsatzes
im Corebereich von -373 mm bis +267 mm

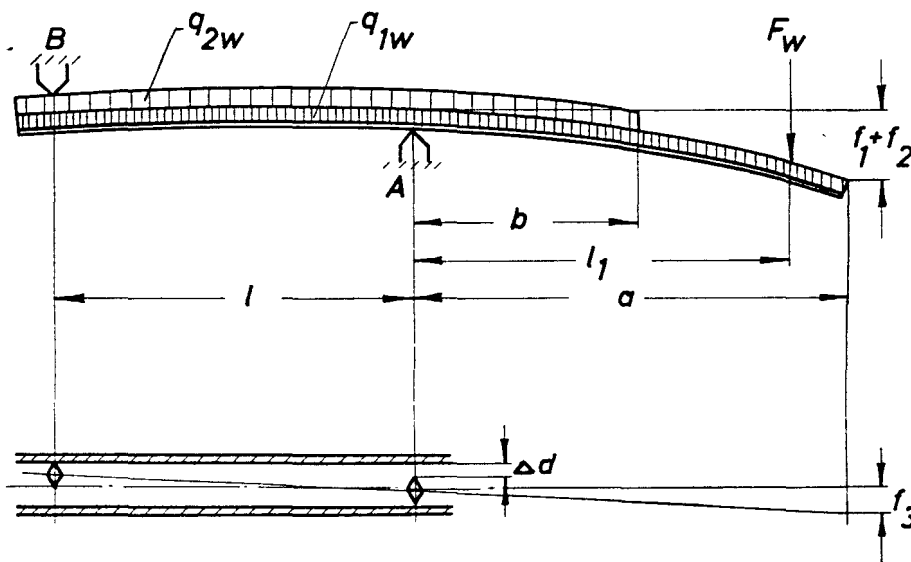
Gesamtaktivität
[Curie]

Abklingzeit [Tage]

Abb. 5



a) Einbausituation



$$\begin{aligned}
 a &= 2654 \text{ mm} \\
 l &= 1175 \text{ mm} \\
 b &= 1305 \text{ mm} \\
 l_1 &= 2154 \text{ mm} \\
 \Delta d &= 0,25 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{1w} &= 0,941 \text{ kp/m} \\
 q_{2w} &= 0,8 \text{ kp/m} \\
 F_w &= 0,263 \text{ kp}
 \end{aligned}$$

b) Belastungsfall

Abb. 6: Durchbiegung des Bestrahlungseinsatzes beim Einbau

Tabelle 3

γ -Spektrum der festen Aktivitäten des Bestrahlungseinsatzes im Corebereich von -273 bis + 267 nach einer Bestrahlungszeit von 160 Tagen

E-Gruppe	E-Bereich (MeV)	E (MeV)	Abklingzeit 10 Tage γ -Quanten/sec.	Abklingzeit 30 Tg. γ -Quanten/sec.
1	0,1- 0,4	0,4	$2,63 \cdot 10^{13}$	$1,82 \cdot 10^{13}$
2	0,4- 0,9	0,8	$9,55 \cdot 10^{13}$	$7,88 \cdot 10^{13}$
3	0,9- 1,35	1,3	$1,91 \cdot 10^{13}$	$1,77 \cdot 10^{13}$
4	1,35-1,8	1,7	$4,72 \cdot 10^{11}$	$3,89 \cdot 10^{11}$
5	1,8- 2,2	2,2	$2,96 \cdot 10^7$	$7,4 \cdot 10^6$
6	2,2- 2,6	2,5	-	-
7	\rightarrow 2,6	2,8	$4,2 \cdot 10^7$	-

Tabelle 4

Verteilung der Aktivitäten auf die einzelnen Isotope des Bestrahlungseinsatzes im Corebereich von - 373 bis + 267 nach einer Bestrahlungszeit von 160 Tagen.

Isotop	Aktivität Curie	
	Abklingzeit 10 Tage	Abklingzeit 30 Tage
Ca ⁴⁵	0,0037	0,0034
Ca ⁴⁷	0,000005	0,000002
Cr ⁵¹	4721,	2870,
Co ⁵⁷	0,00059	0,00056
Co ⁵⁸	2570	1980
Co ⁶⁰	151,5	150,5
Cu ⁶⁴	0,00024	-
Mn ⁵⁴	27,8	26,5
Ho ⁹³	0,044	0,043
Ho ⁹⁹	1,50	0,011
Na ²⁴	0,0012	-
Ni ⁵⁷	0,00002	-
Ni ⁵⁹	0,115	0,115
Ni ⁶³	13,16	13,16
Fe ⁵⁵	597,0	490,0
Fe ⁵⁹	74,9	56,0
Nb ⁹²	0,04	0,01
Nb ⁹⁴	0,0015	0,0015
Nb ⁹⁵	0,0048	0,0032
P ³²	24,7	9,37
P ³³	0,00065	0,00038
S ³⁵	0,158	0,135
Sc ⁴⁶	0,41	0,35
Sc ⁴⁷	0,0041	0,000073
Sc ⁴⁸	0,0024	0,000001
Ta ¹⁸²	140,8	124,8
Tc ⁹⁹	1,65	0,0116
W ¹⁸¹	0,021	0,0193
W ¹⁸⁵	1,28	1,11
W ¹⁸⁷	0,0289	0,000 000 3
Y ⁸⁹	0,000127	0,000 002
Y ⁹⁰	0,000386	0,000 002
Zr ⁸⁹	0,000127	0,000 002
Summe	8226,05	5722,13

Tab. 5: Maßnahmen bei Störungen

Störung	Anzeige	mögl. Wirkung	Maßnahme	Bemerkung
1. Leck in einem Bestrahlungseinsatz	Alarm durch Naßfühler EM I oder EM II, Alarm durch Kontaktmanometer infolge Druckanstiegs	Reaktorwasser des Primärkreislaufes dringt in den Einsatz ein.	Abschalten der el. Heizung und Druckentlastung aller Prüflinge. Ausbau des Einsatzes nach Zyklusende.	
2. Undichtwerden oder Bersten eines Prüflinges.	a) Druckanzeige sinkt ab. b) Grenzwertmelder spricht an.	Druckanstieg in Einsatz	Schließen des betr. Ventils PA..2. Abschalten der el. Heizung des betr. Prüflinges. Evtl. Druckentlastung des Einsatzes auf Sollwert.	Die Fortführung der Bestrahlung richtet sich nach der Anzahl der bereits defekten Prüflinge.
3. Leck in dem Einspeisesystem zu einem Prüfling	a) Druckanzeige nicht stabil. b) Druckanstieg in Einsatz (Manometer EM I 1, EM I 2 oder EM II 1 und EM II 2)	Heliumaustritt in den Druckschrank oder ins BR2-Gebäude, oder in den sub pile room, oder in den Einsatz.	Schließen des betr. Ventils PA...2. Abschalten der el. Heizung des betr. Prüflinges.	
4. Leck im Gassystem der Bestrahlungseinsätze.	Druckanzeige sinkt ab.	Heliumaustritt in den Druckschrank oder ins BR2-Gebäude oder in den sub pile room.	Abschalten der el. Heizung für alle Prüflinge des betr. Einsatzes. Lecksuche und Dichtheit wieder herstellen.	Falls Leck in sub pile room, ist eine Reparatur erst während der nächsten Abschaltperiode möglich.
5. Ausfall einer Druckmeßeinrichtung.	Druckanzeige sinkt, Alarngabe.		Schließen des betr. Ventils PA... 2	Evtl. Ersatzmeßkreis anschließen
6. Ausfall eines Heizleiters	Abfall in der Temperaturanzeige, Alarngabe.		Abschalten des betr. Regelkreises, Druckentlastung	Die Fortführung der Bestrahlung richtet sich nach der Anzahl der defekten Prüflinge.
7. Ausfall des Thermoelements für die Regelung	Abfall der Temperaturanzeige, Alarngabe.		Regelthermoelement gegen ein Registrierthermoelement austauschen.	Abschalten erst, wenn beide Registrierthermoelemente auch ausgefallen sind.
8. Ausfall eines Temperatur-Regelkreises.	Temperatur zu niedrig oder zu hoch.		Regler überprüfen. Evtl. gegen Ersatzregelkreis austauschen.	
9. Plötzliche Abschaltung des Reaktors.	Alarm: Reaktor Trip.	Heizleistung steigt, um die verminderte γ -Heizung auszugleichen.	Abschalten der el. Heizungen.	Die Drücke in den Prüflingen sind nur bei regulären Abschaltperioden zu entlasten.