

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

Januar 1968

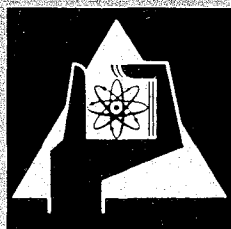
KFK 818

Abteilung Reaktorbetrieb

Sicherheitsbericht für die Kalte Neutronenquelle am FR 2

Projekt FR2/16

F. Spath, E. Karb, H. Oehme



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Januar 1968

KFK 818

Abteilung Reaktorbetrieb

S i c h e r h e i t s b e r i c h t

für

Die Kalte Neutronenquelle am FR 2

Projekt FR2/16

F.Spath, E.Karb, H.Oehme

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

An diesem Bericht haben mitgearbeitet:

E. Karb
H. Knauß
E. Maucher
W. Leiling
H. Oehme
A. Rahn
F. Spath
K. Vogel

Als Manuskript vervielfältigt.

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Zusammenfassung

Verschiedene physikalische Experimente benötigen einen möglichst hohen Fluß subthermischer Neutronen. Für solche Untersuchungen soll in den Horizontalkanal R3 des Reaktors FR2 eine Kalte Neutronenquelle eingebaut werden. Sie besteht im wesentlichen aus einer im Reflektorbereich des Reaktors anzuordnenden Moderatorkammer, die mit etwa 220 cm^3 flüssigem Wasserstoff gefüllt ist und durch gasförmiges Helium einer Heliumkälteanlage mit Expansionsturbinen gekühlt wird. Eine Apparatur mit 1 Nm^3 gasförmigem Wasserstoff dient zur Versorgung der Kammer, ein Vakuumsystem bewirkt die Kälteisolierung. Der durch höherenergetische Neutronen verursachte Untergrund wird durch ein im Strahlrohr eingebautes, mit flüssigem Stickstoff gekühltes Neutronenfilter aus Beryllium verringert.

Zur Vermeidung einer H_2 -Luft-Reaktion sowie anderer denkbarer Gefährdungen wurden zahlreiche Sicherheitsmaßnahmen getroffen; außerdem wurde zum Schutz des Reaktorcores die Wasserstoffkammer mit einem Druckrohr umgeben. Von der Projekt-Steuerwarte aus wird die Versuchsanlage automatisch überwacht, so daß sie zeitweise unbeaufsichtigt betrieben werden kann. Bei Störungen erfolgt Signal; durch Sicherheitsschaltungen werden geeignete Maßnahmen eingeleitet. In besonderen Fällen wird das H_2 -System entleert oder es erfolgt Reaktorschnellschluß. Die Kalte Neutronenquelle ist insgesamt so ausgelegt, daß sie mit hoher Sicherheit betrieben werden kann.

Abstract

Various physical experiments require the highest possible flux of sub-thermal neutrons. In order to permit such studies, it is envisaged to install a cold neutron source into the horizontal hole R3 of the reactor FR2. This source mainly consists of a moderator chamber to be placed into the reactor reflector zone. It is filled with some 220 cm^3 of liquid hydrogen and cooled by gaseous helium in a helium refrigeration system equipped with expansion turbines. An apparatus containing 1 standard cubic metre of gaseous hydrogen feeds the chamber, whilst a vacuum system provides the refrigeration isolation. The background of higher-energetic neutrons is reduced by a neutron filter made of beryllium which is mounted into the beam tube and cooled with liquid nitrogen.

In order to avoid a reaction between H_2 and air as well as other conceivable hazards, a number of safety precautions were taken; besides, the hydrogen chamber was surrounded by a pressure tube to protect the reactor core. The experimental facility is automatically controlled from the project control panel so that it may be temporarily operated without supervision. Any trouble will release a signal and appropriate measures will be initiated by safety circuits. In special cases the H_2 system is evacuated or the reactor is scrammed. The cold neutron source as a whole is designed as to allow for a very safe operation.

Résumé

Différentes expériences physiques demandent le plus haut flux possible en neutrons sous-thermiques. Pour pouvoir effectuer des expériences de ce type on envisage d'installer une source neutronique froide dans le canal horizontal R3 du réacteur FR2. Elle comprend comme partie principale une chambre modérateur qui doit être placée dans la zone réflecteur du réacteur. Cette chambre est remplie de quelque 220 cm^3 d'hydrogène liquide et refroidie par l'hélium gazeux dans un système de réfrigération à l'hélium pourvu de turbines d'expansion. Un appareil qui contient 1 Nm^3 d'hydrogène gazeux sert à alimenter la chambre tandis qu'un système à vide effectue l'isolation thermique. Le bruit de fond provoqué par des neutrons à l'énergie plus grande est réduit par un filtre neutronique en béryllium installé dans le tube de faisceau et refroidi par du nitrogène liquide.

Dans le but d'éviter une réaction H_2 -air et d'autres risques possibles, de nombreuses mesures de sécurité ont été prises. En outre, la chambre d'hydrogène fut entourée par un tube à pression pour protéger le coeur du réacteur. L'installation expérimentale est contrôlée automatiquement à partir du pupitre de commande du projet de sorte qu'elle s'opère temporairement sans surveillance. Tout incident déclenche un signal; des mesures appropriées sont démarrées par des circuits de sécurité. Dans des cas particuliers le système H_2 est évacué ou le réacteur est arrêté d'urgence. L'ensemble de la source neutronique froide est conçu de sorte qu'une grande sécurité d'opération est garantie.

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
<u>Einleitung</u>	1
1. <u>Zusammenfassung der Sicherheitsbetrachtung</u>	3
1.1. Begrenzende Betriebsdaten	3
1.2. Ergebnis der Sicherheitsbetrachtung	3
2. <u>Gesamtauslegung der Versuchsanlage</u>	6
2.1. Physikalische Anforderungen	6
2.2. Tragende Auslegungsgesichtspunkte	7
2.3. Blockschaltbild	8
2.4. Festlegung der physikalisch wichtigen Anlagenteile	8
2.5. Beschreibung des Gesamtsystems	9
3. <u>Beschreibung der Anlage</u>	11
3.1. Strahlrohrpfropfen	11
3.1.1. Abschirmteil	11
3.1.2. Neutronenfilter	12
3.1.3. Druckrohr, Vakuumraum und Luftkühlung	12
3.1.4. H ₂ -Moderatorkammer	13
3.1.5. Dichtungen des Vakuumraumes nach außen	14
3.2. H ₂ -System	15
3.3. Helium-Kälteanlage	16
3.4. Hochvakuumssystem	18
3.4.1. Pumpstand V-Vp 3/4 für Strahlrohrpfropfen	18
3.4.1.1. He-Belüftung	19
3.4.1.2. N ₂ -Sperrgas für Doppeldichtungen	19
3.4.1.3. N ₂ -Spülgas für Vakuumauspuffleitung	19
3.4.2. Pumpstand V-Vp 5/6 für Leitungs- u. Ventilisolierung	20
3.5. Flüssig-N ₂ -System und N ₂ -Gasversorgung	20
3.5.1. Aufbau	20
3.5.2. Schaltungen	21
3.6. Druckluftversorgung	21

	<u>Seite</u>
3.7. Meß- und Steuertechnik, Energieversorgung	22
3.7.1. Meßgeräte und Meßwertverarbeitung	23
3.7.1.1. Vakuummeß- und -schaltgeräte	24
3.7.1.2. Druckmeß- und -schaltgeräte	24
3.7.1.3. Temperaturmeß- und -schaltgeräte	25
3.7.1.4. Detektoren	26
3.7.2. Steuerung	27
3.7.2.1. Ausführungsprinzip	27
3.7.2.2. Programme	28
3.7.2.3. Schaltungen und Verriegelungen	29
3.7.2.4. Signalisierung	30
3.7.3. Energieversorgung	31
3.7.3.1. Einspeisung	31
3.7.3.2. Spannungsversorgung	32
3.7.3.3. Erdung	32
4. <u>Betrieb der Anlage</u>	33
4.1. Betrieb mit Flüssig-H ₂	33
4.1.1. Anfahren des Experimentes	33
4.1.2. Dauerbetrieb	34
4.1.3. Abstellen	36
4.2. Betrieb mit Flüssig-H ₂ und He-Verflüssigung	37
4.3. Betrieb ohne Flüssig-H ₂	37
4.4. He-Verflüssigung	38
5. <u>Sicherheitsbetrachtungen</u>	39
5.1. Übersicht über die Gefahrenquellen	39
5.2. <u>Gefährdungen im Reaktorblock</u>	40
5.2.1. Vermeidung einer H ₂ -Explosion im Druckrohr	41
5.2.1.1. Eindringen von Luft in den Vakuumraum	41
5.2.1.2. Eindringen von H ₂ in den Vakuumraum	44
5.2.1.3. Zündung eines eventuell vorhandenen H ₂ -Luft-Gemisches	45
5.2.2. Vermeidung einer "N-0"-Reaktion im Druckrohr	46
5.2.3. Schutz des Reaktors gegen die Folgen einer Explosion	47
5.2.3.1. H ₂ -Luft-Reaktion	47
5.2.3.2. "N-0"-Reaktion	47
5.2.4. Ausfall der Kühlung des Druckrohres	48
5.2.5. Ausfall der Kühlung der H ₂ -Moderatorkammer	49
5.2.6. Ausfall der elektrischen Energieversorgung	49

	<u>Seite</u>
5.3. Gefährdungen in der Reaktorhalle	50
5.3.1. Vermeidung einer H ₂ -Explosion	50
5.3.1.1. Leck des H ₂ -Systems	51
5.3.1.2. Bildung eines zündfähigen H ₂ -Luft-Gemisches	52
5.3.1.3. Zündung des H ₂ -Luftgemisches	53
5.3.2. Gefährdung durch die Aktivierung der Kreislaufmedien	54
5.3.2.1. Aktivierung im N ₂ -System	54
5.3.2.2. Aktivierung im He-Kühlkreislauf	55
5.3.2.3. Aktivierung im H ₂ -System	57
5.3.3. Gefährdung durch nukleare Strahlung am Strahlrohr	58
5.4. Größter glaubhafter Unfall	58
6. <u>Vorversuche und Berechnungen</u>	60
6.1. Zur Auslegung der H ₂ -Moderatorkammer	60
6.1.1. Wärmeübertragung	60
6.1.2. Festigkeit	61
6.1.3. Abnahmeprüfungen	61
6.2. Zur Dichtheit und zum Betrieb des Strahlrohrpfropfens	62
6.3. Zur Funktion und Dichtheit des H ₂ -Systems	63
6.3.1. Funktionsprüfung	63
6.3.2. Dichtheitsprüfung	63
6.4. Erprobung der He-Kälteanlage	64
6.5. Meßtechnische Vorversuche	65
6.5.1. Vakuummeter V-P 19, 20 und 21	65
6.5.2. Drucküberwachung H-P 2	65
6.5.3. H ₂ -Detektoren H-G1, V-G4 und 5	66
6.5.4. Lufteisdetektor V-G6	66
6.6. Versuche über die Reaktion von Flüssig-H ₂ mit flüssiger Luft	67
6.7. Zur Festigkeit des Druckrohres	68
7. <u>Out-of-pile Erprobung der Gesamtanlage</u>	69
7.1. Betrieb mit He	70
7.2. Betrieb mit H ₂	70
8. <u>Literatur</u>	71
9. <u>Abbildungen</u>	75

Einleitung

Dieser Sicherheitsbericht ist in 4 Informationsstufen eingeteilt:

Informationsstufe 1 (Einleitung sowie Abschnitt 1 u. 2) enthält Angaben zur Bearbeitung und die physikalischen Aufgaben, die begrenzenden Betriebsdaten und das Ergebnis der Sicherheitsbetrachtung sowie die Auslegungsgesichtspunkte.

Stufe 2 (Abschnitt 5) enthält die Sicherheitsbetrachtungen.

In Stufe 3 (Abschnitt 3 u. 4) wird der Aufbau sowie der Betrieb der Versuchsanlage beschrieben.

In Stufe 4 (Abschnitt 6) wird über Vorversuche und Berechnungen berichtet.

Für die Beurteilung der Sicherheit sind vor allem die Informationsstufen 1 und 2 maßgebend; die Stufen 3 und 4 sollen zum besseren Verständnis des Verfahrens beitragen. Die in diesem Bericht angegebenen Zahlenwerte (z.B. Drücke, Temperaturen, Grenzwerte) sind weitgehend errechnet. Sie sind bis auf die begrenzenden Betriebsdaten als Anhaltswerte zu betrachten, da sie im Betrieb den Erfordernissen in gewissen Grenzen angepaßt werden müssen.

Die Anregung für die Erstellung der Kalten Neutronenquelle wurde von den Herren Prof. Dr. Maier-Leibnitz und Prof. Dr. T. Springer von der Technischen Hochschule München gegeben. Die wissenschaftliche Betreuung sowie die Durchführung der physikalischen Messungen liegt jetzt in den Händen von Herrn Prof. Dr. Beckurts, Leiter des Instituts für Angewandte Kernphysik im KFK und Herrn Prof. Dr. Springer, Leiter des Instituts für Neutronenphysik der KFA Jülich. Projektierung, Erstellung und Betrieb der Versuchsanlage erfolgt durch die Abteilung Reaktorbetrieb des KFK.

Am FR2 werden mit der Kalten Quelle Messungen totaler und differentieller Wirkungsquerschnitte sowie Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Flüssigkeiten und Festkörpern durchgeführt. Über Experimente mit Kalten Quellen an anderen Reaktoren wird in /1, 2/ berichtet.

Seit Anfang 1965 ist eine 1. Ausbaustufe in Betrieb, die im wesentlichen aus einem durch flüssigen Stickstoff gekühlten Be-Neutronenfilter, einem mechanischen Neutronengeschwindigkeitsselektor und einem Chopper besteht. Probenkryostaten, Neutronenmeßgeräte und andere physikalische Einrichtungen ergänzen die Apparatur.

Die in diesem Bericht beschriebene 2. Ausbaustufe besitzt einen Flüssig-H₂-Moderator, der gegenüber der 1. Baustufe einen erheblichen Gewinn an subthermischen Neutronen erwarten läßt /1/.

Die He-Kälteanlage zur Kühlung des Moderators wurde seit Anfang 1966 bei Versuchen für die Kalte Neutronenquelle erprobt und zur Verflüssigung von Helium für verschiedene Experimente benutzt.

1. Zusammenfassung der Sicherheitsbetrachtung

1.1. Begrenzende Betriebsdaten

Die nachstehend angegebenen Daten begrenzen die Betriebsbedingungen der Versuchsanlage. Alle weiteren Daten können von diesen Hauptdaten abgeleitet werden oder sind nicht von primärer sicherheitstechnischer Bedeutung.

Im H_2 -System der Kalten Neutronenquelle darf innerhalb des Reaktorgebäudes die Wasserstoffmenge

$$1 \text{ Nm}^3$$

nicht überschreiten.

Die Temperatur des Druckrohres an der heißesten Stelle darf nicht mehr als

$$150 \text{ }^\circ\text{C}$$

erreichen.

In den Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens dürfen bei Betrieb mit H_2 insgesamt nicht mehr als

$$100 \text{ Nl Luft}$$

eindringen. Dies sind ca. 25 % der zu 220 cm^3 Flüssig- H_2 stöchiometrischen Menge.

1.2. Ergebnisse der Sicherheitsbetrachtung

Die Gefahr durch Reaktor-Strahlung ist minimal, sie bleibt im Rahmen üblicher Strahlrohrexperimente. Die Aktivierung der Kreislaufmedien wird in Grenzen gehalten, die eine Gefährdung von Personen ausschließen.

Die Anlage ist sicherheitstechnisch vor allem durch die Anwesenheit von H_2 im Reaktorblock und in der Reaktorhalle gekennzeichnet, besonders im Zusammenhang mit den tiefen Temperaturen verschiedener Anlagenteile. Die Gefahr bei Verwendung von H_2 liegt in der Möglichkeit einer Reaktion mit Luft; durch die tiefen Temperaturen wird im Falle eines Luftlecks die

Ansammlung größerer Luftmengen durch Ausfrieren begünstigt und die Leckdetektion erschwert.

Es wurden zahlreiche Maßnahmen getroffen, um jede der Bedingungen, deren Zusammentreffen erst zu einer H₂-Luft-Reaktion führen könnte, einzeln zu vermeiden (s. Abschnitt 5.). Die wichtigsten dieser Maßnahmen sind:

- Explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel am H₂-System,
- Dichte Ausführung des H₂-Systems,
- Kontinuierliche H₂-Leckkontrolle,
- Verschiedene, voneinander unabhängige Verfahren zur Detektion von Lufterlecks in den Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens,
- Automatisches Entleeren des H₂-Systems beim Überschreiten bestimmter Grenzwerte,

Es wird gefolgert, daß durch die getroffenen Maßnahmen eine H₂-Luft-Reaktion mit sehr großer Wahrscheinlichkeit vermieden wird.

Im Reaktorblock, wo ein Teil des H₂ in flüssiger Form, also mit hoher Dichte vorliegt, wurde darüberhinaus die Hülle um das H₂-System als Druckrohr ausgebildet. Auf der Grundlage eigener Explosionsversuche wurde die zulässige Leckluftmenge auf einen meßtechnisch erfaßbaren Wert begrenzt. Selbst wenn dieser Wert erreicht wird und eine H₂-Luft-Reaktion trotz der getroffenen Gegenmaßnahmen erfolgt, besteht keine Gefahr für das Druckrohr und mithin für das Reaktorcore (s. Abschn. 5.2.3.1.).

Da eine Beschädigung des Reaktorcores somit ausgeschlossen werden kann, wird die beim gleichzeitigen Versagen sämtlicher Sicherheitseinrichtungen denkbare H₂-Luft-Reaktion in der Reaktorhalle als größter glaubhafter Unfall betrachtet. Unter den ungünstigen Annahmen, daß der gesamte Inhalt des H₂-Systems ausströmt und optimal mit Luft gemischt wird, ist bei den Zündquellen, die in der Reaktorhalle zu erwarten sind (heiße Flächen, offene Flammen, elektrische Entladungen), höchstens mit einer explosionsartigen Verbrennung zu rechnen. Durch die dabei entstehenden Drücke ist selbst bei optimaler Reflexion der Druckwellen die Festigkeit der Reaktorhalle nicht gefährdet.

Wertung: Insgesamt geht aus der Sicherheitsbetrachtung für dieses Experiment hervor, daß eine Beschädigung des Reaktorcores oder der Reaktorhalle praktisch ausgeschlossen ist. Die am FR2 eingesetzte H_2 -Menge ist im Vergleich mit den bisher gebauten Kalten Quellen gering, da zur Kühlung des Moderators Helium verwendet wird. Bezüglich der Gefährdung von Personen oder Experimentiereinrichtungen wird festgestellt, daß die hier angewandten Sicherheitsmaßnahmen deutlich über das bei Industrieanlagen mit ähnlich geringen H_2 -Mengen übliche Maß hinausgehen.

2. Gesamtauslegung der Versuchsanlage

Die erste Kalte Neutronenquelle wurde von Butterworth u.a. 1957 am BEPO in Harwell installiert /3/; in der Zwischenzeit wurden weitere Anlagen am E13 in Saclay /4,5/, am ERL in Mol /6/, am DIDO in Harwell /7,8,9/ sowie am FiR in Helsinki /10/ geschaffen. Eine weitere Kalte Quelle befindet sich am FRJ-2 (DIDO) in Jülich /11/ im Bau. Einen Vergleich der mit eigenen Kälteanlagen arbeitenden Experimente zeigt Abb. 1. Bei der Besichtigung der Anlagen in Harwell, Saclay und Jülich fanden mit den dortigen Arbeitsgruppen fruchtbare Diskussionen statt, durch die uns die dort gemachten Erfahrungen weitgehend zugänglich wurden.

2.1. Physikalische Anforderungen

Für eine Reihe von physikalischen Untersuchungen, insbesondere auf den Gebieten der Kristallkunde und der Dynamik von Flüssigkeiten und Festkörpern, sind Neutronen niedriger Energien von weniger als 0,005 eV entsprechend Wellenlängen von mehr als 4 \AA geeignet. Folgende Anforderungen sollen erfüllt werden:

- Die Flußdichte subthermischer Neutronen soll möglichst hoch sein
- Im Strahl soll der Untergrund an Gammas und höherenergetischen Neutronen reduziert werden
- Der Neutronenstrahl soll monoenergetisch sein.

Verwendet man Reaktoren als Neutronenquellen, so entspricht die Energieverteilung der thermischen Neutronen angenähert der Maxwell-Verteilung bei der Temperatur des Moderators von z.B. $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$ (Abb. 2). Der Anteil der erwünschten niederenergetischen, d.h. kalten Neutronen beträgt in diesem Spektrum nur einige Prozent von dem im Maximum. Er wird wesentlich erhöht, wenn die Neutronen mit einem Moderator sehr tiefer Temperatur in Wechselwirkung treten, beispielsweise mit flüssigem Wasserstoff (H_2), da sich das Maximum der Verteilungskurve der Neutronen dann erheblich zu niedrigeren Energien hin verschiebt (Abb. 2). In praktischen Fällen kann nur ein beschränktes Volumen in einem Experimentierkanal mit einem geeigneten Moderator gefüllt und dieser auf tiefe Temperaturen abgekühlt werden, wobei zur Festlegung von Größe, Form und Material des Moderators eine Reihe von Gesichtspunkten gegeneinander abzuwägen sind.

Zur Reduktion des Untergrundes an höherenergetischen Neutronen und Gammas kann ein Neutronenfilter verwendet werden, z.B. aus Beryllium oder aus Wismut. Durch Kühlung des Filters mit flüssigem Stickstoff kann die Filtertransmission im interessierenden Energiebereich erhöht werden (s. Abb. 3, /12/).

Für Transmissionsmessungen kann ein mechanischer Monochromator oder Chopper, für Untersuchungen der inelastischen Streuung ein Kristallochopper eingesetzt werden.

2.2. Auslegungsschwerpunkte

Bei der ersten Ausführung der Kalten Quelle für den FR2 war man vor allem bemüht, den Nachweis zu erbringen, daß eine solche Einrichtung unter den hier gegebenen speziellen betrieblichen und technischen Voraussetzungen sicher betrieben werden kann. Diese Gesichtspunkte haben uns dazu geführt, die nicht konventionellen Teile, insbesondere die Moderatorkammer und ihr Füllsystem, konservativ auszulegen, d.h. zum Beispiel bezüglich der Kammergröße und bezüglich anderer Komponenten, die die Auswirkungen evtl. Störungen vergrößern könnten, nicht an die technischen Grenzen zu gehen. Außerdem erschien es uns notwendig, die Folgen möglicher Unfälle in Ergänzung der Versuche in Harwell /13,14/ weiter experimentell zu untersuchen /15/. Gleichzeitig versuchten wir, die konventionellen Anlagenteile in ihrer Konzeption fortschrittlich auszulegen und ihre Größe so zu wählen, daß sie als Grundeinrichtungen auch für spätere Ausführungen des Moderatorsystems dienen können.

Die Versuchsanlage ist für mehrwöchigen Dauerbetrieb gebaut und so instrumentiert, daß sie zeitweilig ohne direkte Aufsicht gefahren werden kann. Ihre Berechnung erfolgte für eine Reaktorleistung von zunächst 44 MW: Beim Bau der Anlage wurden die einschlägigen Vorschriften beachtet, insbesondere die Unfallverhütungs- und die VDE-Vorschriften sowie die Verordnung über elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Räumen. Die vorgeschriebenen Abnahmen werden vom TÜV durchgeführt.

2.3. Blockschaltbild

Aus den bisher besprochenen physikalisch-experimentellen Grundforderungen ergibt sich folgende prinzipielle Auslegung der Versuchseinrichtung (Abb. 4). In einem horizontalen Strahlkanal des Reaktors befindet sich zunächst ein Pfropfen, der folgende Funktionen erfüllen muß:

- Abschirmung
- Aufnahme der Moderator-kammer und des Neutronenfilters
- Isolation der kalten Teile durch Hochvakuum
- mechanischer Schutz des Reaktors gegen Störungen aus dem Pfropfen

Unmittelbar vor dem Kanal befindet sich die eigentliche Experimentier-einrichtung mit den Apparaten zur Erzeugung des monochromatischen Neutronenstrahls. Hierzu gehören auch die im allgemeinen sehr umfangreichen Neutronen messenden und Daten verarbeitenden Geräte, auf die hier jedoch nicht eingegangen wird.

Alle übrigen Teile der Versuchsanlage sind praktisch Hilfseinrichtungen, obwohl sie technisch aufwendig und umfangreich sind. Man benötigt eine Anlage zur Kühlung der Moderator-kammer, in unserem speziellen Falle ein System zur Versorgung der Kammer mit Moderator-material, eine umfangreiche verfahrenstechnische Meß- und Sicherheitsanlage sowie mehrere Hilfssysteme zur Erzeugung des Isolier-Vakuums, zur Kühlung der Filter etc.

2.4. Festlegung der physikalisch wichtigen Anlagenteile

Als Experimentierkanäle für die Kalte Quelle standen nur Reflektorkanäle zur Verfügung (Abb. 6), von denen der Kanal R3 mit einem verfügbaren Innendurchmesser von 121 mm verwendet wird. Vor ihm steht relativ viel Platz zur Verfügung, außerdem sind die Verbindungen zu den Experiment-Maschinen-räumen unter der Reaktorhalle im Südteil des Gebäudes sehr kurz. Eine spätere wesentliche Vergrößerung des Moderatorvolumens könnte durch den Übergang auf den Kanal R6 mit ca. 280 mm Innendurchmesser erreicht werden. Die Moderator-kammer ist in Reflektorkanälen stets in Transmissions-Geometrie angeordnet.

Als Moderator stehen im Prinzip verschiedene flüssige und feste Elemente oder Verbindungen zur Verfügung, z.B. H_2 , D_2 , Methan und H_2O (Eis), deren Moderationseigenschaften für sehr niederenergetische Neutronen aus mehreren Untersuchungen bekannt sind /6,7/. Bezüglich der Moderationseigenschaften liegt die Wahl vor allem zwischen festem Methan (CH_4) und flüssigem H_2 . Hier wurde flüssiger Wasserstoff als Moderator gewählt, da CH_4 für den Betrieb eine Reihe technischer Schwierigkeiten bringt, die sich auch sicherheitstechnisch erheblich negativ auswirken (Radiolyse, Wärmeübertragungsprobleme etc.) /16/.

Auch bezüglich Größe und Form der Moderator-kammer sind aus der Literatur verschiedene Ausführungen bekannt /9/, wobei die gemachten Erfahrungen aber noch keine endgültigen Aussagen gestatten. Die effektive Dicke der Kammer wurde mit ca. 45 mm festgelegt, womit man bei flüssigem H_2 als Moderator wahrscheinlich nicht im Optimum liegt. Da Deuterium für Neutronen einen kleineren Absorptionsquerschnitt besitzt als H_2 , kann durch Zumischen von D_2 die effektive Dicke der Kammer verringert und damit evtl. optimalisiert werden.

Die bisher bekannten Kammern sind zylindrisch oder besitzen grob angenähert die Form eines schwarzen Strahlers. Da über die neutronenphysikalischen Gesichtspunkte zur Formgebung noch keine endgültige Klarheit besteht, wird die Kammerform vor allem nach mechanischen und thermodynamischen Gesichtspunkten festgelegt /17/.

Als Neutronenfilter wurden gegossene Berylliumzylinder mit 70 mm \varnothing und einer Gesamtlänge von 350 mm gewählt. Außerdem kann je nach Bedarf ein Wismutfilter von ca. 150 mm Länge nachträglich in den Strahlrohrpfropfen eingeführt oder außen angebracht werden.

255. Beschreibung des Gesamtsystems

Die praktische Verwirklichung des Blockschalbildes nach Abb. 4 führt zu einer Versuchsanlage, deren Fließschema in Abb. 5 dargestellt ist. Man erkennt den Strahlrohrpfropfen mit Moderator-kammer (H-Bhl) und Filter (K-Wtl). Die Kammer ist als Wärmetauscher ausgeführt und wird

durch gasförmiges Helium von ca. 14°K am Eintritt gekühlt, das auch zur Kühlung des Probenkryostaten verwendet werden kann. Die Heliumkälteanlage ist der größte und weitgehend unabhängige Kreislauf; mit ihr ist auch die Erzeugung flüssigen Heliums möglich. Der Moderatorwasserstoff befindet sich in einem geschlossenen System mit relativ geringem Rauminhalt. Nur in der Moderator-kammer selbst ist der Wasserstoff flüssig und hat dort je nach Systemdruck eine Temperatur von ca. $21 - 26^{\circ}\text{K}$; im restlichen System ist er gasförmig. Das System ist mechanisch geschützt installiert und besitzt eine direkte Abgasleitung durch das Reaktorgebäude ins Freie. Der Strahlrohrpfropfen wird über eine eigene Vakuumanlage (V-Vp 3/4) evakuiert, während ein zweiter Pumpstand (V-Vp-5/6) zur Vakuum-Wärmeisolation der kalten Rohrleitungen und Armaturen dient. Die Vakuumanlage für den Pfropfen fördert aus Sicherheitsgründen direkt ins Freie. Für die Belüftung des Strahlrohrpfropfens wird He-Gas verwendet; zur Beaufschlagung seiner Doppeldichtungen dient ein Mini- N_2 -Schutzgassystem.

Die Kühlung des Neutronenfilters erfolgt über ein Flüssig-Stickstoffsystem, dessen Lagertank (K-Bh8) aus Transportgefäßen (K-Bh10) gefüllt wird. Bei Experimenten ohne flüssigen Wasserstoff kann das Stickstoffsystem durch eine geeignete Schaltung die Wärmeabfuhr aus der Moderator-kammer übernehmen. Die räumliche Anordnung der Kalten Quelle am FR2 geht aus den Abb. 6 und 7 hervor.

3. Beschreibung der Anlage

3.1. Strahlrohrpfropfen

Der schematische Aufbau des Pfropfens geht aus Abb. 8 hervor, seine technische Ausführung erfolgte nach RB-Zeichnung Nr. P016 1-0-1. Der Strahlrohrpfropfen übernimmt hauptsächlich folgende Funktionen:

- Abschirmung des Strahlkanals um den Experimentierstrahl,
- Aufnahme des flüssig-stickstoffgekühlten Neutronenfilters,
- Aufnahme der Flüssig-Wasserstoffmoderatorokammer,
- Bildung der Vakuurräume zur Isolation der kalten Einbauten,
- Schutz des Reaktorcores gegen Unfalleinwirkungen.

3.1.1. Abschirmteil

Er besteht im wesentlichen aus zwei konzentrischen Rohren aus Stahl, nämlich dem Strahlrohr von 50 mm Innendurchmesser und dem äußeren Mantelrohr. In dem mit Schwerbeton ($\rho = 4 \text{ g/cm}^3$) ausgefüllten Ringraum sind Edelstahlrohre verlegt. Diese sind hochevakuiert und nehmen die Thermoelemente sowie die kalten Leitungen für die Kühlung von Neutronenfilter und Moderatorokammer auf oder dienen als zusätzliche Saugrohre zum Evakuieren der corenahen Teile des Pfropfens. Der Abschirmteil ist etwa in der Mitte quer geteilt, und die Kühlmittleitungen sind zur Verbesserung der Abschirmwirkung mit einem Rücksprung verlegt. Mit Ausnahme dieses Querteilungsflansches, der eine metallische Doppeldichtung besitzt, weist der Abschirmteil nur Schweiß- und Hartlötverbindungen auf (s.3.1.5.).

Am corefernen Ende des Strahlrohrpfropfens - am sog. Verteilerkopf - werden alle N_2 -, H_2 - und He-Leitungen in einem Verteilerrohr nach oben abgeführt. Die kalten Leitungen sind dabei so verlegt, daß ihre Längenänderungen infolge Abkühlung nicht zu unzulässigen Spannungen führen. Distanzhalter aus Edelstahl und Teflon zentrieren die kalten Leitungen in den Vakuumrohren.

Am Verteilerkopf ist außerdem der Pumpstand V-Vp 3/4 angeflanscht, der den Vakuumraum des Pfropfens - Isolierräume und Strahlrohr - evakuiert. Das Strahlrohr ist corefern durch ein vakuumdichtes Al-Be-Fenster verschlossen, das jedem glaubhaften Druckaufbau im Vakuumraum standhält (s. 6.6.).

Der im Reaktor eingebaute Strahlenschieber kann nicht benutzt werden. Um dennoch auch bei laufendem Reaktor in direkter Verlängerung des Strahlkanals kurzzeitig arbeiten zu können (s. 5.3.3.), ist am core-fernen Ende des Pfropfens eine besondere Strahlenblende mit elektromotorischem Antrieb außerhalb des Vakuumraumes angeordnet. Der Dichtschieber des R3-Kanals kann nicht geschlossen werden. Der Pfropfen ist jedoch an der Frontplatte des Kanals angeflanscht und gedichtet. Der Pfropfen wird auf Rollen in den Kanal eingeschoben. Er kann mit der Horizontalflasche am FR2 und den dazu vorhandenen Zusatzgeräten ausgebaut werden.

3.1.2. Neutronenfilter

Das Neutronenfilter von 35 cm Länge besteht aus mehreren, hintereinanderliegenden, massiven Berylliumzylindern. Diese Anordnung ist in ein doppelwandiges Filterträgerrohr aus Messing eingebaut. Durch schraubenförmige Nuten des Doppelwandrohres strömt flüssiger Stickstoff zur Kühlung. Zu- und Ableitungen des N_2 sind hart eingelötet und werden durch den Abschirmteil des Pfropfens nach außen geführt. Das Filter ist im Abschirmteil thermisch isoliert befestigt.

3.1.3. Druckrohr, Vakuumraum und Luftkühlung (Abb. 9)

Am coreseitigen Ende des Strahlrohrpfropfens ist ein fingerhutartiges Rohr mit Hilfe einer Überwurfmutter aus hochfestem Vergütungsstahl vakuumdicht angeschraubt. Dieses Rohr ist als Druckrohr ausgebildet (Außendurchmesser 113 mm, Wandstärke 9,3 mm) und nimmt die H_2 -Moderator-kammer auf. Es ist aus der Al-Legierung AlZnMg1 hergestellt und aus dem Vollen gearbeitet. Der Werkstoff besitzt hohe Festigkeit, geringe Neutronenabsorption, gute Schweißbarkeit und ist gut lieferbar. Die Sicherheitsfunktion des Druckrohres ist in 5.2.3. und seine festigkeitstechnische Auslegung in 6.7. beschrieben. Sein Betriebsdruck ist kleiner als 10^{-4} Torr.

Das Druckrohr, der Abschirmteil und die zugehörigen Vakuumanschlüsse bilden den Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens. Er ist über zwei Berstmembranen (V-Ve 55 und 66) gegen Überdruck gesichert, wobei auf möglichst große Abströmquerschnitte geachtet wurde. Die eine Berstmembran öffnet bei 2,5 atü in die H_2 -Abgasleitung und schützt druckempfindliche Bauteile wie die Vakuumpumpen. Die zweite Berstmembran öffnet bei 10 atü mit besonders großem Querschnitt direkt in die Reaktorhalle. Die integrale He-Leckrate des Vakuumraumes beträgt ca. 10^{-5} Torr l/s.

Die Temperatur des Druckrohres darf im Dauerbetrieb 100°C nicht überschreiten, da sonst ein Abfall der Werkstofffestigkeit eintritt /18/. Die aus diesem Grunde erforderliche Zwangskühlung erfolgt durch den normalen Kühlluftkreis für die Horizontalkanäle. Zur Führung der Kühlluft bis an den coreseitigen Halbkugelboden des Druckrohres dient ein spezielles Al-Luftumlenkrohr. Am coreseitigen Halbkugelboden des Druckrohres sind 3 Chromel-Alumel-Mantelthermoelemente (H-T 5 und 6, 4-T 66) und 2 Reserveelemente zur Überwachung der Druckrohrtemperaturen angebracht (s. 5.2.4.).

3.1.4. H₂-Moderatorkammer

Die Moderatorkammer ist nach Abb.10 gestaltet und als Wärmetauscher ausgebildet. Als Moderator wird tieftemperatur-gereinigter H₂ verwendet. Die Wärmeabfuhr und Verflüssigung des H₂ erfolgt durch kaltes, gasförmiges He mit einer mittleren Temperatur von ca. 16°K nach folgenden Gesichtspunkten: Die Wärme aus der Kammerwand wird direkt durch Leitung an stirnseitig aufgelötete Kühlrohre abgegeben. Die Wärme aus dem Moderator geht durch Kondensation an eine Kühlschlange über, welche in einem ca. 25 cm^3 großen Dampfraum über dem flüssigen Wasserstoff angeordnet ist. Die Kühlrohre ($8 \times 0,5\text{ mm}$) sind zusammen mit Zu- und Ableitungen für H₂ und He in die Kammerwand hart eingelötet. Die Kammer selbst ist geschweißt. Die Verbindung zwischen den Al-Leitungen der Kammer und den V2A-Leitungen des Abschirmteiles wird durch Spezial-Lötkupplungen (Al-Cu) hergestellt /19 /, die bei tiefen Temperaturen eingehend geprüft wurden /20 /. Die Kammer ist durch ein käfigartiges Gestell aus dünnwandigen Edelstahlröhrchen thermisch gut isoliert aufgehängt und im Druckrohr in Längsrichtung verschiebbar zentriert. Nach umfangreichen Berechnungen und Versuchen wurde eine Moderatorkammer mit folgenden Auslegungsdaten gebaut /17,21,22/:

Außendurchmesser:	90 mm
Wandstärke:	2 mm
Werkstoff der Kammer:	AlMn
Werkstoff der He- und H ₂ -Leitungen:	Al 99,5
Prüfdruck der Kammer bei 100°C :	7 at (z.B. gegen Vakuum)
Rauminhalt:	240 cm^3
Gewicht:	215 g
Moderator:	H ₂

H ₂ -Menge bei dem normalen Füllgrad von 90 %:	15 g
H ₂ -Schichtdicke:	45 mm
Heizfläche im Dampfraum:	70 cm ²
Wärmeumsatz bei 44 MW Reaktorleistung:	ca. 60 W
He-Kühlgasdurchsatz:	ca. 60 Nm ³ /h
Mittlerer He-Druck:	1,5 ata
Mittlere He-Temperatur:	ca. 16 °K

An der Kammer sind 4 Temperaturmeßstellen angebracht:

Ein Dampfdruckthermometer (H-T 1) zur Messung der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs im unteren Teil des H₂-Raumes: Meßfühler 1 cm³, Meßbereich 15 ° bis 27,5 °K. 3 Chromel-Alumel-Mantelthermoelemente (H-T2, 3 und 4) und 1 Reserveelement am Kammermantel. Meßbereich 20 °K bis 250 °C.

3.1.5. Dichtungen des Vakuutraumes nach außen

Im nicht zugänglichen corenahen Bereich befinden sich zwei Verbindungen von Pfropfenteilen, die mit Metall-Doppeldichtungen ausgerüstet sind. Sie erfüllen folgende Forderungen: Hohe Dichtheit, Beaufschlagung des Raumes zwischen den Dichtungen durch Sperrgas, Dichtheitskontrolle durch Überwachung des Sperrgasdruckes, gute Strahlenbeständigkeit.

Ausführung der Doppeldichtung Druckrohr - Strahlrohrpfropfen:

Pfropfen: Stahl

Druckrohr: Al-Legierung

Innendichtung: Kegelig mit 0,1 mm Al-Folie

Betriebstemperatur: 30 - 50 °C

Temperaturwechselerprobung: 20 - 100 °C

Außendichtung: aufgelötete bzw. geschweißte Sperrgashülse

Zusammensetzung der Sperrgashülse: Stahl-Liotalverbundmetall (Al-plattiertes Cu-Blech /23/) - Aluminium.

Alle übrigen Vakuumdichtungen des Strahlrohrpfropfens befinden sich am corefernen Ende an zugänglichen Stellen. Sie sind weitgehend als Doppeldichtungen mit Viton-O-Ring und dichtendem Metallzentrierring, jedoch ohne Sperrgas ausgeführt.

3.2. H₂-System

Das Wasserstoffsystem (s. Abb. 5) dient zur Versorgung der Moderator-kammer mit Wasserstoff. Die Kammer wird mit gasförmigem Wasserstoff be-schickt, der unter einem Druck von ca. 1,5 bis 4 atü steht. In der Kammer kondensiert der Wasserstoff an einer Kühlschlange, durch die kaltes Helium strömt.

Die Kammer ist mit einer Füll- und einer Sicherheitsleitung verbunden. Letztere soll verhindern, daß sich bei Verstopfung der Fülleitung durch Ausfrieren von Luft bzw. N₂ ein zu hoher Druck in der Kammer aufbaut. Beide Leitungen sind über Berstscheiben zur H₂-Abgasleitung hin abge-sichert. Die Querschnitte der Leitungen sind so gewählt, daß sich bei raschem Verdampfen des flüssigen H₂ in der H₂-Kammer kein unzulässiger Druck aufbaut.

Durch die Verwendung des Pufferbehälters H-Bh 2 kann das System während des Betriebes völlig von der Wasserstoffzufuhr aus der Druckgasflasche H-Bh 3 abgeschlossen werden, so daß ein Leck durch Drucküberwachung fest-gestellt werden kann (s. 5.2.1.2. und 5.3.1.). Das Volumen des Pufferbe-hälters ist so groß (200 l), daß die Druckdifferenz zwischen kaltem und warmem Zustand in der H₂-Moderatorkammer ca. 0,85 at beträgt.

Der Teil des H₂-Systems, der die Ventile, Druckminderer, die Vakuumpumpe, die Verschraubungen und die Meßgeräte enthält, ist baulich zusammengefaßt und im sogen. H₂-Schrank untergebracht, der durch ein Axialgebläse zwangs-belüftet ist. Der Luftstrom wird mit einem Detektor auf H₂-Gehalt über-wacht. Die räumliche Anordnung des H₂-Systems geht aus Abb. 6 u. 7 hervor. Der gesamte Hochdruckteil mit Druckgasflasche und Armaturen befindet sich außerhalb des Reaktorgebäudes und kann über ein fernbedientes Ventil abge-trennt werden.

Das gesamte H₂-System kann evakuiert werden, z.B. um vor dem Füllen Fremdga-se zu entfernen. Bei Kühlung der Moderatorkammer mit kaltem N₂-Gas (s. 4.3) ist das H₂-System mit N₂ gefüllt. Zum Spülen besteht ein Anschluß an die He-Druckgasflaschen H-BH 4 und 5. Diese Flaschenbatterie liefert auch das He für die Belüftung des Strahlrohrpfropfens sowie das o.a. Sperrgas.

Das System kann über die H₂-Abgasleitung durch die Rotunde direkt ins Freie entleert werden.

Zwischen das H₂-System und die Abgasleitung ist ein He-Sperrgasraum geschaltet, um eine Luftrückströmung zu vermeiden. Der Sperrgasraum wird durch das Überströmventil H-Ve8 sowie das Sicherheitsventil H-Ve 14 nach außen begrenzt. Diese Ventile sind höher eingestellt als die Druckabsicherung der Reaktorhalle, so daß selbst bei geöffnetem H₂-System die Dichtheit der Reaktorhalle gewährleistet wird.

Die elektrische Schaltung der Armaturen und Geräte wird in 3.7. beschrieben.

3.3 Helium-Kälteanlage

Die zur Verflüssigung und Kühlung des Wasserstoffs dienende He-Kälteanlage (Hersteller: Linde AG München) /24/ erzeugt eine Kälteleistung von ca. 210 Watt bei einer mittleren Temperatur von 12,5 °K. Die Anlage ist so ausgerüstet, daß sie auch als He-Verflüssiger mit einer Verflüssigungsleistung von ca. 20 l/h betrieben werden kann.

Abb. 11 zeigt das vereinfachte Fließschema. Als Arbeitsmittel wird Helium verwendet. Zur Reinigung des Heliums dienen zwei umschaltbare Tieftemperaturadsorber, die mit Flüssig-N₂ gekühlt werden. Die Kälteleistung wird durch zwei in Serie geschaltete Expansionsturbinen aufgebracht.

Bei reinem Gaskältebetrieb wird das gereinigte Helium in den evakuierten Kreislauf eingespeist. Ein ölfreier, wassergekühlter Teflon-Kolbenkompressor (9) in Abb. 11 verdichtet bei einer Leistungsaufnahme von 130 kW in 3 Stufen 1200 Nm³/h Helium auf einen Druck von 11,5 ata. Über ein System von zwei Wärmetauschern (11, 13) und zwei in Serie geschalteten Expansionsturbinen (12, 14) wird das He von 11,5 auf 2,2 ata entspannt und kühlt sich dabei auf ca. 13 °K ab. Im Verbraucher, der H₂-Moderatorkammer (15), erwärmt sich der zu dessen Kühlung verwendete Teilstrom ungefähr auf 18 °K. Der Hauptstrom von ca. 1000 Nm³/h wird mit dem Kühlhelium hinter dem Verbraucher über einen Bypass wieder vermischt und danach die gesamte Menge im Gegenstrom auf Umgebungstemperatur erwärmt. Eine Saugdruck- und eine Überdruckregelung im Umgang zum Kompressor (9) sorgen für konstante Betriebsverhältnisse im Gaskältekreis.

Zur Kühlung des Hauptkompressors sowie der Vakuumpumpen werden ca. $10 \text{ m}^3/\text{h}$ Frischwasser verbraucht, die ohne Gefahr ins Abwasser geleitet werden können (s. 5.3.2.).

Bei Verflüssigungsbetrieb dient die Kälteleistung der Turbinen zur Vor-
kühlung eines Joule-Thomson-Kreises. Aus einem Gasometer (2) werden von
einem vierstufigen, luftgekühlten, ölgeschmierten Hochdruckkompressor
(3) $50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ He angesaugt und mit einem Druck von 100 ata durch den Tief-
temperaturreiniger (5) gefördert. Das danach auf 18,5 ata entspannte Gas
kühlt sich im Gegenstrom mit dem entspannten Helium des Gaskältekreises
ab, wird über ein Joule-Thomson-Ventil in den Flüssig-He-Behälter (18)
entspannt und dabei teilweise verflüssigt. Der nicht verflüssigte Teil
kühlt das Hochdruckgas und wird dem entspannten He des Gaskältekreises
beigemischt. Dadurch erhöht sich die Ansaugmenge des Trockenlaufkompressors
und über die Saugdruckregelung wird der nicht verflüssigte Teil aus dem
Gaskältekreis in den Gasometer geleitet.

Abb. 12 zeigt den Gaskälte- und Verflüssigungsbetrieb im T,s-Diagramm.

Die kalten Anlagenteile sind in einem Behälter montiert und durch Hoch-
vakuum thermisch isoliert. Eine Mehrschichtenisolierung aus aluminium-
bedampfter Kunststoffolie dient als Wärmestrahlschutz. Die Turbinen
mit den dazugehörigen Ventilen sind in getrennt evakuierbaren Behältern
untergebracht, um Reparaturarbeiten ohne Anwärmung des gesamten kalten
Apparates durchführen zu können. Alle Ventile innerhalb des Vakuumb-
ehälters werden mit Helium als Steuergas fernbetätigt.

Die Expansionsturbinen sind als einstufige Radialturbinen mit einem stati-
schen Gaslager auf der kalten und einem Öllager auf der warmen Seite aus-
geführt. Bei senkrecht stehender Turbinenwelle nimmt das Öllager auch die
Axialkräfte auf und dient neben einer Ölbremse zur Abbremsung der Turbine,
die bei einem Laufraddurchmesser von 27 mm Drehzahlen von 100.000 U/min
erreicht.

Die Anlage ist meß- und steuertechnisch so ausgerüstet, daß sie bei
stationärem Gaskältebetrieb zeitweise unbeaufsichtigt gefahren werden
kann. Sie paßt sich zwar veränderten Betriebsbedingungen nicht auto-
matisch an, jedoch werden gefährliche Betriebssituationen und größere
Heliumverluste durch entsprechende Schaltungen vermieden. Beim Anfahren
und bei Verflüssigungsbetrieb ist die Anlage bemannt.

3.4. Hochvakuumsystem

Zur Isolation der eingebauten kalten Teile werden zwei komplette Vakuumpumpsätze verwendet. Im Hochvakuumbereich sind sie durch eine Leitung mit Handabsperrrventil V-Ve 65 verbunden. Das Ventil ist im Normalfall geschlossen. Mit dem Pumpstand V-Vp 3/4 wird der Strahlrohrpfropfen zur Isolierung der eingebauten H₂-Kammer H-Bh 1 und des Neutronenfilters K-Wt 1 samt Zuleitungen evakuiert. Der zweite Pumpstand V-Vp 5/6 dient zur Isolierung der Ventile im Behälter K-Bh 9 sowie der N₂- und H₂-Leitungen außerhalb des Strahlrohrpfropfens. Beide Pumpstände werden vom Steuerpult aus getrennt bedient und durch entsprechende Meßgeräte und Grenzwertschalter überwacht.

Zur Belüftung des Pfropfens besteht ein Anschluß an die He-Gasversorgung (s. 3.2.). N₂-Gas zum Spülen der Vakuumauspuffleitungen und als Sperrgas für die Doppeldichtungen des Strahlrohrpfropfens wird der N₂-Gasversorgung (s. 3.5.) entnommen.

3.4.1. Pumpstand V-Vp 3/4 für Strahlrohrpfropfen

Dieser Pumpstand besteht aus der Drehschieberpumpe V-Vp3 mit Absperr- und Belüftungsventil V-Ve 62 und 63 sowie einer luftgekühlten Öldiffusionspumpe V-Vp 4 mit einer Sauggeschwindigkeit von 120 l/sec. Auf der Hochvakuumseite ist ein in Richtung Strahlrohrpfropfen gegen Atmosphäre dichtes Plattenventil V-Ve 61 eingebaut. Zur Verminderung der Ölrückströmung ist außer dem luftgekühlten Ölfänger der Diffusionspumpe ein frigengekühlter Ölfänger V-Öf 1 angebracht.

Zur Sicherheit bei einem schnellen Druckanstieg, wie Platzen der H₂-Kammer oder einer Flüssiggasleitung, ist am Pfropfen die Berstmembrane V-Ve 55 mit 2,5 atü Öffnungsdruck eingebaut. Sie bläst in die Vakuumauspuffleitung ab. Die große Berstmembrane V-Ve 66 mit einem Reißdruck von 10 atü dient zur Sicherheit bei einer Knallgasreaktion und bläst in die Reaktorhalle ab.

Zur Überwachung des Vakuums sind folgende Meßgeräte vorhanden, mit denen der gesamte Bereich von $5 \cdot 10^{-6}$ bis 70 Torr erfaßt wird: Ein Thermistorvakuummeter mit 3 Meßröhren V-P 23 bis 25 für das Feinvakuum, 2 Pirani-Vakuummeter V-P 20 und 21 sowie ein Penning-Vakuummeter V-P 19 im Hochvakuumbereich. Die Hochvakuummeßgeräte dienen gleichzeitig zur Leckdetektion nach der Druckanstiegsmethode (s. 5.2.1.). Grobvakuum und Überdruck können an dem Manometer V-P 31 (Meßbereich: -1 bis + 2,5 atü) abgelesen werden.

Auf der Druckseite der Vakuumpumpen sind ein H_2 -Detektor V-G 4 (Prinzip Wärmetönung) und ein H_2 -Detektor V-G 5 (Prinzip Wärmeleitung) eingebaut. Diese beiden Geräte überwachen kontinuierlich das von beiden Vakuumpumpen geförderte Gas auf H_2 -Spuren (s. 5.2.1.2).

Der Pumpstand V-Vp 3/4 wird von Hand angefahren, wobei die Meßgeräte zum Teil automatisch zugeschaltet werden.

3.4.1.1 He-Belüftung

Bei Ausfall der He-Kühlung oder beim Abstellen der Versuchsanlage müssen wegen der nuklearen Aufheizung die Einbauten im Strahlrohrpfropfen auf andere Weise gekühlt werden. Der thermisch isolierende Vakuumraum wird deshalb automatisch durch H-T 3 und 4 oder von Hand mit He-Gas belüftet. Dies geschieht aus der zentralen He-Druckgasflaschenbatterie H-Bh 4 und 5 über das Ventilsystem V-Ve 56 bis 60 (s. 5.2.5).

3.4.1.2 N_2 -Sperrgas für Doppeldichtungen

In die Zwischenräume der beiden Doppeldichtungen des Strahlrohrpfropfens führen Kapillaren, die an das Ventilsystem V-Ve 72 bis 76 angeschlossen sind. Dieses System erfüllt folgenden Zweck:

- Einlaß von N_2 -Sperrgas über die Ventile V-Ve 75 und 76 und Spülen über V-Ve 74.
- Ständige Überwachung der Dichtigkeit dieser Verbindungen über den Sperrgasdruck (0,3 atü) durch die Druckschalter V-P 29 und 30.
- Anschluß eines Lecksuchgerätes über V-Ve 74 oder Einlaß eines Testgases in die Zwischenräume zur Lokalisierung von Undichtheiten.

3.4.1.3 N_2 -Spülgas für Vakuumauspuffleitung

Die Auspuffleitung führt von der Berstmembrane V-Ve 55 und von den Vakuumpumpen V-Vp 3 und 5 über die parallel geschalteten Überström- und Sicherheitsventile V-Ve 67 und 71 in die H_2 -Abgasleitung und diese durch die Stahlrotunde direkt ins Freie. Um bei einem H_2 -Leck im Strahlrohrpfropfen die Bildung von Knallgas in der Auspuffleitung mit Sicherheit zu vermeiden, wird vor der Inbetriebnahme des H_2 -Systems über das Ventil V-Ve 77 mit N_2 -Gas gespült. Der Vorgang kann an den Manometern V-P 26 und 33 überwacht werden.

3.4.2 Pumpstand V-Vp 5/6 für Leitungs- und Ventilisolierung

Auch dieser Pumpstand besteht aus einer Drehschieberpumpe V-Vp 5 mit Absperr- und Belüftungsventil V-Ve 68 und 69 sowie einer luftgekühlten Öldiffusionspumpe V-Vp 6 mit einer Sauggeschwindigkeit von 120 l/sec. Er besitzt einen zweiten Ölfänger V-Öf 2 und in der Vorvakuumleitung das federbelastete Rückschlagventil V-Ve 70. Im Vorvakuumbereich ist das Thermistor-Vakuummeter V-P 28 und im Hochvakuumbereich das Pirani-Vakuummeter V-P 27 mit Schaltkontakt eingebaut. Beide werden durch den Druckschalter V-P 32 zu- und abgeschaltet. Der Pumpstand wird von Hand angefahren und normalerweise auch von Hand abgeschaltet.

3.5 Flüssig-N₂-System und N₂-Gasversorgung

Das Flüssig-N₂-System dient:

- bei Betrieb mit Flüssig-H₂ zur Kühlung des Neutronenfilters bei 78 °K,
- bei Betrieb ohne Flüssig-H₂ ebenfalls zur Kühlung des Neutronenfilters bei 78 °K und zusätzlich zur Kühlung der H₂-Moderatorkammer unter Raumtemperatur.

Die N₂-Gasversorgung hat folgende Funktionen:

- Druckerzeugung für das Flüssig-N₂-System,
- Versorgung der beiden Doppeldichtungen des Strahlrohrpfropfens mit Sperrgas,
- Spülung der **Vakuumauspuffleitung**,
- Belüftung der Vakuuminisationsräume der He-Gaskälteanlage,
- Druckerzeugung zum Überhebern von Flüssig-N₂ in die He-Reiniger und in die Flüssig-He-Behälter.

3.5.1 Aufbau

Das Flüssig-N₂-System besteht im wesentlichen aus dem 100 ltr.-Lager-tank K-Bh 8 mit Druckregelung, kapazitiver Standanzeige K-H 1 und Sicherheitsventilen. Es wird nachgefüllt aus 50 ltr.-Transportgefäßen K-Bh 10.

Die Tieftemperaturventile K-Ve 19 bis 26 im Vakuumbehälter K-Bh 9 ermöglichen die Schaltung der für die Kühlung von Neutronenfilter und ggf. Moderatorkammer erforderlichen Betriebszustände.

Mit der automatisch geregelten Heizung K-Hz 1 wird das kalte N_2 -Gas vor dem Ableiten in das Aktivabgassystem auf Raumtemperatur erwärmt. Mit dem Regelventil K-Ve 31 wird der Flüssig- N_2 -Durchfluß nach der Filteraustrittstemperatur (K-T 11) geregelt; zur Durchflußanzeige dient K-Q 1.

Die N_2 -Gasversorgung besteht aus einer Batterie von 4 Druckgasflaschen K-Bh 11 bis 14 mit einem Fülldruck von 200 atü. Der Vordruckminderer K-Ve 47 sowie einige Feindruckminderer mit Manometern erzeugen die erforderlichen Druckstufen.

3.5.2 Schaltungen

Die Umschaltung auf die einzelnen Betriebszustände erfolgt vorwiegend mit Handventilen, deren Stellung zum Teil auf das Steuerpult fernübertragen wird. Die übrigen elektrischen Geräte werden vom Steuerpult aus bedient und überwacht.

Füllstand und Druck im Lagertank sowie die Temperaturen von Neutronenfilter und Heizung werden über Grenzwerte kontrolliert. Die beim Ansprechen der Grenzwerte ausgelösten Alarme und Folgeschaltungen sind im Alarmstellenverzeichnis aufgeführt.

3.6 Druckluftversorgung

Druckluft ist erforderlich:

1. Zur Steuerung des Hochvakuumplattenventils V-Ve 61 im Vakuumsystem.
2. Für die Durchflußregelung K-Ve 31 im Flüssig- N_2 -System.
3. Für die Regelung und Ventilsteuerung in der He-Gaskälteanlage.

Zur Versorgung dient das Reaktordruckluftnetz mit 6 atü Betriebsdruck. Um eine gewisse Unabhängigkeit bei Störungen sicherzustellen, ist der Speicherbehälter D-Bh 20 mit Rückschlagventil D-Ve 86 zwischengeschaltet. Das Kontaktmanometer D-P 35 vor dem Rückschlagventil zeigt den Druck im Reaktornetz an und gibt beim Abfallen des Druckes auf einen Mindestwert Alarm. Das Absinken des Druckes im Speicherbehälter und damit im Netz der Experimentieranlage wird von dem Kontaktmanometer D-P 36 signalisiert. Alle Systeme, außer der He-Anlage, können bei Störungen durch das Ventil D-Ve 85 vom Druckluft-Versorgungsnetz abgetrennt werden.

3.7. Meß- und Steuerungstechnik, Energieversorgung

Innerhalb des Projektes gibt es zwei weitestgehend voneinander entkoppelte Meß- und Steuerungssysteme, wovon das eine dem Betrieb der He-Gaskälteanlage dient.

Der elektrische Teil der He-Gaskälteanlage wird in diesem Sicherheitsbericht nicht näher beschrieben. Er ist wie alle elektrischen Anlagen aus dem RB-Bereich entsprechend den VDE-Vorschriften errichtet und durch den TÜV abgenommen. Rückwirkungen auf den Versuchsbetrieb bei Ausfall dieser Kälteanlage werden in 5.2.5. behandelt.

Hier wird die Meß- und Steuerungsanlage innerhalb des Projektes beschrieben, die die Aufgabe hat, einen bestimmten Betriebszustand der Kalten Neutronenquelle (Betrieb der Moderatorokammer mit Flüssig-H₂ oder Betrieb ohne Flüssig-H₂) herzustellen und aufrecht zu erhalten. Diese Anlage läßt sich funktionsmäßig in folgende Gruppen gliedern:

- 1) Meßgeräte und Meßwertverarbeitung
- 2) Steuerung und Signalisierung
- 3) Elektrische Energieversorgung

In diesem Bericht werden nur die sicherheitstechnisch wichtigen Geräte näher behandelt; sie sind auch im Alarmstellenverzeichnis (Abb. 13) aufgeführt. Einen Gesamtüberblick gibt das Fließschema, Abb. 5. Die ausführlichen Geräte-Listen (RB-Z.Nr. P016-0-4-1/22) und der Befehlsplan (RB-Z.Nr. P016-7-0-4) liegen nicht bei. Weitere Angaben sind außerdem in /25/ zu finden.

Die Bedienung der Anlage erfolgt von einer Steuerwarte aus, die aus einem Steuerpult mit Blindschaltbild sowie dahinter aufgestellten Meß- und Steuer-schränken besteht. Weitere Bedienungstafeln befinden sich am H₂-Schrank sowie am Strahlrohrpfropfen (s. Abb. 6).

Im Steuerpult ist der größte Teil der Versorgungs- bzw. Steuergeräte für die Meßfühler untergebracht sowie die Meßwertverarbeitung, zu der Verstärker, Grenzwerteinheiten und anzeigende Meßgeräte gehören.

Die Steuerung ist nach dem Bausteinprinzip aufgebaut. Die Einschübe (Signal-, Zeit-, Stellglied- und Schützeinheiten) und die Steckverteiler sind im Steuerschrank untergebracht, ebenso die Sicherungen, die Schreiber und die H₂-Detektionsgeräte. Die Betriebs- und Summenstörleuchte ist gut sichtbar auf dem Schrank angebracht.

Die Energieverteilung geschieht in einer eigens für dieses Projekt installierten Gußverteilung im Raum R113, West.

3.7.1. Meßgeräte und Meßwertverarbeitung

Die Meßgeräte dienen zum größten Teil der Überwachung des Betriebsablaufes des Experimentes. Über die Meßwertverarbeitung werden bei Abweichungen vom normalen Betriebszustand Grenzwerte abgeleitet, die zum Teil selbsttätig eine Korrektur der gestörten Größe herbeiführen, zum Teil mindestens aber eine Störsignalisierung bewirken.

Zu diesen Betriebsüberwachungsgeräten kommt eine Reihe von Meßgeräten, die Störungen besonders in Bezug auf das Wasserstoffsystem feststellen und - ebenfalls über die Meßwertverarbeitung - Sicherheitsschaltungen veranlassen.

Bei der Auswahl der Meßgeräte mußten folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- 1) Erfüllung der meßtechnischen Anforderungen
- 2) Möglichkeit der elektrischen Meßwertverarbeitung
- 3) Explosionsschutz
- 4) Möglichst neuer Stand der Technik (Transistorisierung)
- 5) Strahlenbeständigkeit (bei Thermoelementen in Corenähe)
- 6) Hohe Lebenserwartung und Wartungsfreundlichkeit

Besonders die Forderung nach Explosionsschutz konnte durch kommerzielle Geräte nicht immer befriedigt werden. Aus diesem Grunde wurden einige Geräte im Eigenbau erstellt, andere so umgebaut, daß Explosionsschutz erreicht werden konnte. Der Explosionsschutz der Versuchsanlage wurde vor Ort von PTB überprüft und hierüber ein Gutachten erstellt /26/.

Im folgenden sind einige wichtige Meßstellen angeführt, wobei - soweit von Bedeutung - auf das Meßprinzip, die Meßwertverarbeitung, auf Sicherheitsfragen u.dgl. näher eingegangen wird. In 6.5. wird außerdem über meßtechnische Vorversuche berichtet.

Die Grenzwerte werden in elektronischen Grenzwerteinheiten aus dem Analogausgangswert des jeweiligen Meßgerätes abgeleitet. Sie können von 0 - 100 % dieses Wertes eingestellt werden. Die z.Zt. eingestellten Grenzwerte sind im Alarmstellenverzeichnis (Abb. 13) angegeben. Zahlenwerte und Gerätetypen können, den Erfahrungen des vorgesehenen Probebetriebes entsprechend, noch geändert werden, wenn die Sicherheit nicht ungünstig beeinflußt wird.

3.7.1.1. Vakuummeß- und -schaltgeräte

Bei der Auswahl der Vakuummeßgeräte wirkte erschwerend, daß der Vakuumraum des Pfropfens, sowie die Auspuffleitung der Vakuumpumpen als möglicherweise explosionsgefährdete Räume deklariert wurden. Wir haben daher explosionsgeschützte Meßgeräte eingebaut und damit die Sicherheit erhöht.

Das Penning-Vakuummeter V-P19 wurde von einem handelsüblichen Gerät zu einem explosionsgeschützten umgebaut. Durch Reduzierung der Spannung und Begrenzung des Stromes konnte die Schutzart Eigensicherheit (Ex)i erreicht werden, was durch eine PTB-Sonderprüfung /26/ bestätigt wurde. Eine selbsttätige Abschaltung des Meßgerätes bei $2 \cdot 10^{-3}$ Torr ist eingebaut. Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der Kaltkathodenröhre; es ist für Luft geeicht, wobei sein Meßwert von der Gasart abhängig ist, so daß bei Gasen mit geringerem Molekulargewicht zu wenig angezeigt wird. Der Meßbereich liegt zwischen $5 \cdot 10^{-6}$ und $2 \cdot 10^{-3}$ Torr, wobei eine Genauigkeit für Luft von ca. 30 % gegeben ist. Der Meßwert wird angezeigt und geschrieben; über eine Grenzwerteinheit wird Signal gegeben. Das Vakuummeter dient zur Messung des Vakuums im Strahlrohrpfropfen sowie zur Leckdetektion nach der Druckanstiegsmethode (s.a. 5.2.1.1. und 2.). Über seine Erprobung und Eichung wird in 6.5.1. berichtet. Die beiden Pirani-Vakuummeter V-P20 und 21 wurden ebenfalls auf Explosionsschutz (Ex)i umgebaut und einer PTB-Sonderprüfung /26/ unterzogen. In /27/ wird gezeigt, daß Zündungen durch katalytische Wirkungen des Platin-Meßdrahtes ausgeschlossen werden können. Die Geräte arbeiten nach dem Wärmeleitprinzip und sind für Luft geeicht. Bei He und H_2 wird daher ein zu hoher Meßwert angezeigt. Der Meßbereich beträgt $5 \cdot 10^{-4}$ bis 0,5 Torr und kann mit einer Genauigkeit von ca. 10 % angegeben werden. Der Meßwert wird im Steuerpult angezeigt. Die beiden Vakuummeter werden in 1 von 2-Schaltungen zur Leckdetektion nach der Druckanstiegsmethode verwendet (s.a. 5.2.1.1. und 2.); sie sind mit je zwei oberen Grenzwerten ausgerüstet. Die Vorversuche werden in 6.5.1. beschrieben. Die Meßstelle V-P27 arbeitet ebenfalls mit einem solchen Pirani-Vakuummeter.

3.7.1.2. Druckmeß- und Schaltgeräte

Da in den Druckräumen beim Spülen und Evakuieren auch Unterdrücke auftreten können, haben die dort eingebauten Manometer einen Meßbereich bis - 1 atü und werden so bei Unterdruck nicht beschädigt. Es wurden im allgemeinen barometrisch nicht kompensierte Rohrfeder- und Plattenfedermanometer sowie Membrandruckschalter eingesetzt. In möglicherweise explosionsgefährdeten Bereichen, wie dem H_2 -Schränk, wurden die Manometer mit explosionsgeschützten Ferngeberpotentiometern zur Übertragung des

Meßwertes für Anzeige und Grenzwerte ausgerüstet.

Die Meßstelle H-P2 dient zur Messung und Überwachung des Druckes im H_2 -System. Sie besteht aus einem Rohrfedermanometer mit explosionsgeschütztem Ferngeber (Ex) d3n.05 und einem Meßbereich von - 1 bis + 6 atü. Der Meßwert wird über einen Transistorverstärker einer Fernanzeige im Steuerpult, einem Schreiber und Grenzwerteinheiten zugeführt. Drei obere und zwei untere, einstellbare Grenzwerte dienen zur Störsignalisierung, zur H_2 -Evakuierung und zur Beendigung des Füllvorgangs (s. Abb. 13). Die Anzeige dient über den Druck im H_2 -Pufferbehälter zur Messung des Füllstandes in der H_2 -Kammer. Das Auflösungsvermögen dieser Meßanordnung ist besser als 0,2 at, so daß im H_2 -System eine gute Dichtheitsüberwachung über den Druckabfall gegeben ist (s. 5.2.1.2.).

Außerdem ist an dieser Meßstelle ein überdrucksicheres Plattenfedermanometer mit explosionsgeschütztem Ferngeber und einem Meßbereich von - 1 bis + 0,6 atü eingebaut. Es dient zur Kontrolle des Vakuums beim Evakuieren und Spülen des H_2 -Systems; sein Grenzwert bei ca. 20 Torr verhindert das Einspeisen von H_2 , wenn nicht vorher evakuiert wurde. Ein weiteres Rohrfedermanometer (H-P2.5) ist an der H_2 -Sicherheitsleitung angeordnet und ermöglicht die Druckmessung in der H_2 -Kammer beim Aufwärmen des Flüssig- H_2 . Über die Erprobung der Meßanordnung wird in 6.5.2. berichtet.

3.7.1.3. Temperaturmeß- und -schaltgeräte

Zur Temperaturmessung an der Moderatorokammer, dem Druckrohr, dem Seelenrohr und dem Neutronenfilter wurden Thermoelemente verwendet. Es wurden vorzugsweise Chromel-Alumel-Mantelthermoelemente sowie an Orten geringer Strahlung und tiefer Temperatur Fe-Konstantan-Elemente eingesetzt.

Da einerseits die Meßstellen entweder geerdet oder von einem dichten Mantel umgeben sind, andererseits in den Eingangskreisen der Thermoelementverstärker sehr kleine Leistungen ($< 10^{-8}$ W) umgesetzt werden, wurden keine Forderungen bezüglich Explosionsschutz an die im Strahlrohrpfropfen eingesetzten Thermoelemente gestellt.

Die Vergleichsstelle liegt bei Thermoelementen, an die meßtechnisch hohe Genauigkeitsansprüche gestellt werden, bei $0^\circ\text{C} \pm 0,02^\circ\text{C}$ innerhalb einer Peltierelementkühlordnung. Die übrigen Meßstellen haben eine Kompensationsdose zur elektrischen Stabilisierung der Kaltlötstellentemperatur. Hier ist die Genauigkeit etwa um den Faktor 10 kleiner. Die Verstärkung der Thermospannung erfolgt bei isolierten Thermoelementen mit einem Zerhackerverstärker so, daß bei Aussteuerung über den gesamten zu erwartenden Meßbereich am Ausgang ein Einheitssignal erscheint (hier 10 mA).

Die Verstärkung der Thermospannungen von Thermoelementen mit geerdeter Meßstelle geschieht über Differenzverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung so, daß das Einheitssignal 1 V bei Vollaussteuerung entsteht. Diese Verstärker sind mit einer Thermoelementbruchsicherung ausgeführt. An die Verstärkerausgänge sind Anzeigeinstrumente, elektronische Grenzwerteinheiten und 12-Punkt-Drucker angeschlossen.

Die Grenzwerteinheiten sind "fail to safe" geschaltet und haben einen Relaiskontaktausgang, der in der Steuerung weiterverwendet wird.

Zur genauen Temperaturmessung an der H₂-Moderatorkammer sowie in den He- Hin- und Rückführleitungen eignen sich H₂-Dampfdruckthermometer sehr gut, da die Dampfdrücke als Funktion der absoluten Temperatur gut bekannt sind. Die hier verwendeten H₂-Dampfdruckthermometer sind zur genauen Ablesung vor Ort mit Manometern und zur Fernanzeige und Signalgabe mit Widerstandsferngebern ausgerüstet. Über Transistorverstärker werden Anzeigeinstrumente und Grenzwerteinheiten angeschlossen.

3.7.1.4. Detektoren

Außerhalb des H₂-Raumes (H₂-Moderatorkammer, Rohrleitungen, Behälter) darf im Normalfall kein Wasserstoff auftreten. Um Wasserstofflecks feststellen zu können, werden sowohl die Auspuffleitung aus den Vakuumpumpen als auch der Spülluftaustritt aus dem H₂-Schrank auf Wasserstoff überwacht. Hierzu dienen H₂-Detektoren.

Über dem H₂-Schrank wird der H₂-Detektor H-G1 eingesetzt, der nach dem Wärmetönungsprinzip arbeitet. Sein explosionsgeschützter Detektorkopf mit Schutzart (Ex)d 3nG5 ist im Strom der Lüftung angeordnet. Das zugehörige Steuergerät ist im Steuerschrank eingebaut. Der Meßbereich beträgt 0 bis 4 Vol.-% H₂ in Luft. Der Meßwert wird im Pult angezeigt und geschrieben. 2 obere Grenzwerte geben Signal und Schaltbefehle.

In der Auspuffleitung des Vakuumsystems wird nach 2 Methoden gemessen. Der H₂-Detektor V-G4 ist der gleiche Typ wie H-G1 und arbeitet auch nach dem Wärmetönungsprinzip. Der H₂-Detektor V-G5 benutzt das Wärmeleitprinzip, wobei das Abgas im Bypass durch das vor Ort angebaute Gerät strömt. Der Explosionsschutz wird durch 2 Sintermetall-Flammsperren erreicht, welche durch eine PTB-Sonderprüfung /26/ zugelassen sind. Der Meßbereich beträgt 0 - 1 Vol.-% H₂ in Luft oder N₂. Der Meßwert wird im Steuerpult angezeigt und geschrieben; 2 obere Grenzwerte für Signale und Schaltbefehle sind vorhanden. Über die Erprobung der H₂-Detektoren wird in 6.5.3. berichtet.

Zur Detektion von ausgefrorener Luft an den kalten He-Leitungen bei einem Luftleck im Vakuumraum des Pfropfens (s. 5.2.1.1.) wird als Lufteisdetektor V-G6 eine Spiegelanordnung mit Lampe und Photowiderstand verwendet, die die Verminderung der Reflektivität des Spiegels durch einen Luteisbelag zur Messung heranzieht /28, 29/. Lampe und Photowiderstand befinden sich außerhalb des Vakuumraumes durch eine Glasscheibe vom Spiegel getrennt, wodurch sich ein weiterer Explosionsschutz erübrigt. Der Meßbereich beträgt für unsere Anordnung etwa 2 bis 10 Nltr., was 0,5 bis 2,5 % der stöchiom. Luftmenge in Bezug auf 220 cm^3 Flüssig- H_2 entspricht. Über eine elektronische Meßwertverarbeitung werden das Anzeigegerät und der Schreiber sowie 2 obere Grenzwerte gesteuert. Der Luteisspiegeldetektor wurde erprobt (s. 6.5.4.).

3.7.2. Steuerung

.....

3.7.2.1. Ausführungsprinzip

Es wurde ein Steuerungsprinzip gewählt, das flexibel genug ist, den Anforderungen eines Experimentes - Änderungen von Steuerungsabläufen, zusätzlichen Einbauten und Signalisierung - gerecht zu werden.

Die hier beschriebene Steuerung ist eine Relaissteuerung und ist aus Baugruppen zusammengesetzt, die wiederum aus einzelnen steckbaren Einschüben bestehen. Die Einschübe einer Baugruppe lassen sich gegenseitig austauschen. Alle wichtigen Anschlüsse der Einschübe und der außenliegenden sowie der im Steuerschrank ankommenden Grenzwerte enden auf einem Steckverteiler. Innerhalb des Steckverteilers werden die Programme, Einzelsteuerungen, Verriegelungen und die Signalisierungen gesteckt. Dabei kann wahlweise, wenn es die Steuerung erfordert, jeder Anschluß jedem Einschub (unabhängig von der Baugruppe) bzw. jedem Grenzkontakt zugeordnet werden.

Für einige, durch das Stecksystem nicht zu erfassende Verriegelungen, wird eine fest verdrahtete, mit Relais bestückte Tafel verwendet.

Programmverriegelungen erfolgen über Steckbrett I, Verriegelungen der Stellglieder untereinander über Steckbrett III. Die Zuordnung der Programme zu den Stellgliedern geschieht über das Steckbrett II.

Es gibt folgende Baugruppen:

- 1) für Programme : Programmeinheiten
- 2) für Motoren, Ventile usw. : Stellgliedsteuereinheiten
- 3) für Verzögerungen : Zeiteinheiten
- 4) für 3-Phasen-Verbraucher : Schützeinheiten
- 5) für Signalisierung : Signaleinheiten

Mit dem Einlegen der Steuerspannung werden alle die Meßgeräte, Signalisierungen und Verriegelungen eingeschaltet und Automatikbefehle wirksam, die unabhängig von den Betriebszuständen "Betrieb mit Flüssig-H₂" und "Betrieb ohne Flüssig-H₂" sind.

3.7.2.2. Programme

Es gibt zwei Grundprogramme ("a" und "b"), die zum "Betrieb ohne Flüssig-H₂" oder "Betrieb mit Flüssig-H₂" eingeschaltet werden. Es sind Handprogramme, die über Schlüsselschalter betätigt werden.

Des weiteren gibt es vier Notprogramme ("c" bis "f"), die über eine Störung (Grenzwert) automatisch oder über Drucktaster von Hand ausgelöst werden können.

Programm "a" - Betrieb ohne Flüssig-H₂:

Durch Einschalten des Programms werden die für diese Betriebsweise zusätzlich erforderlichen Meßgeräte, Automatikbefehle, Signalisierungen und Verriegelungen zugeschaltet (s. 4.3.).

Programm "b" - Betrieb mit Flüssig-H₂:

Analog zum Programm "a" werden hier die für diese Betriebsweise zusätzlich erforderlichen Schaltungen durchgeführt. Insbesondere werden die für die Sicherheit wichtigen Geräte (Detektoren, Lüfter) zugeschaltet (s. 4.1.).

Programm "c" - H₂-Evakuierung:

Durch das Programm "c" wird bei bestimmten Störungen (siehe Abb. 13) der Wasserstoff aus dem H₂-System entfernt (s. 5.1.). Sollte der Wasserstoff trotz des Programms "c" im System bleiben (gemessen über H-P2), so erfolgt Reaktorschnellschluß.

Programm "d" - Pfropfenbelüftung:

Das Programm "d" dient der Flutung des Pfropfenraumraumes mit Helium als Wärmeträgergas bei erhöhter Kammertemperatur (s. 3.4.1.1. und 5.2.5.).

Programm "e" - Abstellen des Vakuumpumpsatzes V-Vp3/4 für Pfropfen:

Das Programm "e" bewirkt das nach vakuumtechnischen Gesichtspunkten sinnvolle Abstellen des Pumpstandes V-Vp3/4, z.B. bei erhöhter Kammertemperatur oder Drehzahlabfall der Vorpumpe (s. 3.4.1.).

Programm "f" - Abstellen des Vakuumpumpsatzes V-Vp5/6 für Ventil-
kasten:

Das Programm "f" bewirkt das nach vakuumtechnischen Gesichtspunkten sinnvolle Abstellen des Pumpstandes V-Vp5/6, z.B. bei Drehzahlabfall der Vorpumpe (s. 3.4.2.).

3.7.2.3. Schaltungen und Verriegelungen

Außer den Programmen gibt es weitere, durch Grenzwerte ausgelöste Steuerungsabläufe. Diese sind teilweise mit Verriegelungen ausgerüstet. Einige sicherheitstechnisch wichtige Fälle sollen im folgenden erwähnt werden. Hierin bedeuten:

oGW = oberer Grenzwert und
uGW = unterer Grenzwert.

H₂-Einspeiseventil H-Ve3 (stromlos zu)

Das Ventil trennt das H₂-System innerhalb der Reaktorhalle von der H₂-Versorgung (s. Abb. 5.). Das Ventil kann nur geöffnet werden, wenn:

- Programm "b" eingeschaltet ist,
- Programm "c" nicht ansteht,
- oGW₂ und uGW₃ von H-P2 sowie
- uGW von H-P6 und 9 nicht anstehen,
- Schlüsselschalter für H-Ve3 eingelegt ist und
- Auf-Taster "H-Ve3" gedrückt wird.

Wurde das Ventil einmal geschlossen, so erfordert jedes neue Öffnen des Ventils ein vorheriges Evakuieren des H₂-Systems unter ca. 20 Torr (uGW₃ von H-P2).

H₂-Ablauf-Ventil H-Ve 6 (stromlos auf)

Über dieses Ventil wird bei Beendigung des H₂-Betriebs und bei Störung während des Betriebes das H₂-System entleert und evakuiert. Das Ventil kann nur geschlossen werden, wenn:

- Programm "c" und oGW2 von H-P2 nicht anstehen und
- Zu-Taster "H-Ve 6" gedrückt wird.

H₂-Einspeiseventil H-Ve 83 (stromlos zu)

Das Ventil trennt die H₂-Einspeiseleitung außerhalb der Reaktorhalle von der H₂-Flasche. Das Ventil kann nur geöffnet werden, wenn:

- Programm "b" eingeschaltet ist,
- Programm "c" nicht ansteht,
- oGW2 von H-P2 sowie uGW von H-P6 und 9 nicht anstehen und
- Auf-Taster "H-Ve 83" gedrückt wird.

He-Spülventil H-Ve 97 (stromlos auf)

Über dieses Ventil wird die H₂-Kammer mit Helium gespült. Solange der "Auf-Befehl" für H-Ve 97 aus dem Programm "c" ansteht, kann das Ventil nicht geschlossen werden.

H₂-Evakuierpumpe H-Vp 1

Die Vakuumpumpe dient zum Evakuieren des H₂-Systems. Solange der "Ein-Befehl" für H-Vp 1 aus dem Programm "c" ansteht, kann die Pumpe nicht abgeschaltet werden (außer durch Drehzahlabfall).

3.7.2.4. Signalisierung

Das Prinzip der Signalisierung entspricht weitgehend der Ausführung am FR2. Es gibt ein schnelles (SB) und langsames (LB) Blinklicht, helles (HD) und dunkles (DD) Dauerlicht, Einzel- und Summenstörmeldung. Die Farben der Lampen sind weiß, gelb oder rot.

An der Versuchsanlage auftretende Störungen werden in der jeweiligen Signalleuchte im Steuerpult durch SB angezeigt. Außerdem wird jede neue Störung durch eine Summenstörmeldung optisch (Summenstörleuchte) und akustisch (Hupe) signalisiert.

In der FR2-Schaltwarte erscheinen folgende Signale:

- Projekt 16 auf Sicherheitssystem aufgeschaltet,
- Störung an Projekt 16,
- Reaktorschnellschluß (SS) durch Projekt 16.

An der Steuerwarte des Projektes 16 werden signalisiert:

Betriebszustände durch:

- Programmleuchten, weiß, Stufen: DD (Lampenüberwachung), SB (Programm eingeleitet), HD (nach dem Quittieren, solange Programm läuft);
- Meldeleuchten, weiß, Stufen: DD (Lampenüberwachung), HD (Meldung, z.B. Motor ein);
- Befehlsleuchten in den Auf- (Ein-)Tastern der jeweiligen Stellglieder, weiß, Stufen: DD (Lampenüberwachung), HD (Stellglied durch Automatikbefehl angesteuert), SB und LB sind unter "Störungen" beschrieben.

Störungen durch:

- Signalleuchten, gelb oder rot, Stufen: DD (Lampenüberwachung), SB (Störung steht an), LB (nach dem Quittieren, solange Störung ansteht),
- Befehlsleuchten in den Auf- (Ein-) Tastern der jeweiligen Stellglieder, weiß, Stufen: SB (vorgegebener Zustand nicht erreicht), LB (nach dem Quittieren, solange Störung ansteht), DD und HD sind unter "Betriebszustände" beschrieben.
- Summensignalleuchte, gelb, Stufen: SB (Störung steht an), HD (Steuerspannung eingeschaltet, nach dem Quittieren der Störung, Lampenüberwachung),
- Hupe, Stufen: aus (Normalzustand, nach dem Quittieren der Störung), ein (Störung steht an).

3.7.3. Energieversorgung einschließlich He-Anlage

3.7.3.1. Einspeisung

Die elektrische Energieversorgung erfolgt dreiphasig von der Elektro-Zentrale des FR2 über die Notstromhauptverteilung 1 für Experimente (NHV1) im Raum R113 direkt auf Klemmen im Steuerschrank. Sowohl der Abgang in der NHV1 als auch der Eingang im Steuerschrank sind abgesichert.

Die He-Kälteanlage besitzt eine eigene Niederspannungsverteilung. Die Versorgung mit Kraftschienenenergie erfolgt direkt aus der Elektro-Zentrale des FR2, mit Notstromenergie aus der Kraftschiene bzw. der Notschiene I von der NHV1.

3.7.3.2. Spannungsversorgung

Um kurzzeitige Unterbrechungen des Netzes überbrücken zu können, werden die Steuerung und Instrumentierung sowie besonders wichtige Stellglieder aus der Notschiene I (Notstrom ohne Unterbrechung) versorgt. Der Leistungsbedarf beträgt ca. 4 kVA. Für die Steuerung und Lampenversorgung wird die ankommende Spannung (380/220 V) auf 60 V = und 12/24 V \approx umgeformt.

Anlagenteile von sicherheitstechnisch geringer Bedeutung werden aus der Kraftschiene gespeist und bei deren Ausfall mit Verzögerung auf die Notschiene I umgeschaltet (Notstrom mit kurzzeitiger Unterbrechung). Diese Gruppe hat einen Leistungsbedarf von ca. 28 kVA.

Die übrigen Anlagenteile, besonders der Hauptkompressor der He-Kälteanlage, sind nur an die Kraftschiene (Normalnetz) angeschlossen und haben einen Leistungsbedarf von ca. 150 kVA.

3.7.3.3. Erdung

Die Schutzerdung der Anlage wurde gemäß VDE 0140 durchgeführt. Darüber hinaus wurden an Anlagenteilen, an die aus Explosionsschutzgründen besondere Ansprüche gestellt werden, spezielle Erdungsmaßnahmen getroffen (flexible Kupferbänder an Metalltüren u.ä.).

4. Betrieb der Anlage

Wir unterscheiden beim Fahren der Experimentieranlage folgende Betriebszustände:

- 1) Die Moderator-kammer ist mit Flüssig-H₂ gefüllt und wird durch die He-Anlage gekühlt; das Neutronenfilter wird mit Flüssig-N₂ gekühlt, der Probenkryostat kann mit He gekühlt werden. (Betrieb mit Fl.-H₂.)
- 2) Während des Betriebszustandes 1) kann zusätzlich He für andere Experimente verflüssigt werden. (Betrieb mit Flüssig-H₂ und He-Verflüssigung.)
- 3) Im Unterschied zu 1) befindet sich in der Moderator-kammer kein H₂; die nukleare Wärme aus dem Kammermaterial wird hierbei mit dem vom Neutronenfilter kommenden kalten N₂-Gas abgeführt. (Betrieb ohne Flüssig-H₂.)
- 4) Die He-Gaskälteanlage verflüssigt He, und das Strahlrohr-experiment wird ohne Flüssig-H₂ betrieben oder ist abgeschaltet. (He-Verflüssigung.)

Im folgenden werden diese Betriebsphasen soweit beschrieben, wie es zum Verständnis der Sicherheitsaspekte erforderlich erscheint. Eine ausführliche Bedienungsanleitung wird im Betriebshandbuch (BHB) enthalten sein.

4.1. Betrieb mit Flüssig-H₂

Diese Betriebsweise wird meistens gefahren und kann daher als Normalbetrieb angesehen werden.

4.1.1. Anfahren des Experimentes

Die Kalte Neutronenquelle kann sowohl bei abgeschaltetem Reaktor als auch bei voller Reaktorleistung angefahren werden. Hierzu sind 1 bis 2 Bedienungspersonen anwesend, welche zuvor eine Funktionsprüfung der wichtigsten Anlagenteile durchführen. Die He-Gaskälteanlage besitzt einen eigenen Schlüsselschalter und kann unabhängig von der übrigen Versuchsanlage betrieben werden. Da sie eine Abkühlzeit von etwa 12 h benötigt, wird sie zuerst angefahren. Hierbei werden auch die Versorgungssysteme für Strom, Wasser, Druckluft sowie N₂- und He-Druckgas zugeschaltet. Bei der ersten Inbetriebnahme oder nach Reparaturen werden die Sperrgasleitungen und -räume sowie die H₂-führenden Räume evakuiert oder gespült und die H₂-Druckgasflasche H-Bh3 außerhalb der Rotunde abgeschlossen. Zuvor werden die Steuerspannung und das Steuerprogramm am Steuerpult sowie die Lüftung und H₂-Detektion für den H₂-Schränk eingeschaltet.

Danach wird mit dem Vakuumpumpsatz V-Vp 5/6 im Ventilkasten K-Bh9 und den zugehörigen Leitungen Hochvakuum erzeugt.

Der Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens wird mit V-Vp3 auf 10^{-1} Torr evakuiert und gleich anschließend über V-Ve 59 mit etwa 5 Torr He belüftet, damit mit Sicherheit keine Luft vorhanden ist. Die beiden Doppeldichtungen am Pfropfen werden mit N_2 -Sperrgas beaufschlagt und dessen Druck an V-P29 und 30 kontrolliert. Die Vakuumauspuffleitung mit den H_2 -Detektoren V-G4 und 5 wird über V-Ve 77 mit N_2 -Gas gespült.

Das H_2 -System wird über H-Ve 97 mit He auf Betriebsdruck gefüllt und einer kurzen Druckstandsprobe zur groben Dichtheitskontrolle unterzogen. Danach wird das H_2 -System evakuiert, mit H_2 gespült und mit H_2 auf max. 4 atü gefüllt. Das Füllen ist aufgrund elektr. Verriegelung nur möglich, wenn die erforderlichen Sicherheitseinrichtungen in Betrieb sind und der Schlüsselschalter für das H_2 -Einspeiseventil H-Ve 3 betätigt wird.

Hat die He-Kälteanlage ihre Betriebstemperatur von etwa $13^\circ K$ erreicht, so kann die H_2 -Kammer langsam abgekühlt werden, wobei die Regelung von Hand über das Bypass-Ventil PK-Ve 180 erfolgt. Ist die H_2 -Kammer unter Raumtemperatur abgekühlt ($\approx 10^\circ C$), was mit dem Thermoelement H-T2 gemessen wird, so wird der Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens mit dem Pumpsatz V-Vp 3/4 auf 10^{-4} Torr evakuiert und damit die Isolierung der kalten Einbauten erreicht. Nun wird die Abkühlung bis zur Verflüssigung des H_2 in der Kammer fortgesetzt. Der Füllgrad der Kammer wird über den Druck im H_2 -Pufferbehälter H-Bh2 verfolgt; ist der Druck um etwa 0,85 at gefallen, so hat die Kammer ihren normalen Füllgrad erreicht. Danach wird das Neutronenfilter kontinuierlich mit Flüssig- N_2 auf $78^\circ K$ abgekühlt.

Damit sind die Strahlrohreinbauten betriebsbereit. Der Probenkryostat vor dem Strahlkanal kann über die Ventile PK-Ve 183 und 185 mit He abgekühlt werden, und die neutronenphysikalischen Messungen können nach dem Öffnen des äußeren Strahlenschiebers beginnen.

4.1.2. Dauerbetrieb

Hierbei befinden sich die einzelnen Anlageteile in folgendem Betriebszustand:

Am Steuerpult sind die Schlüsselschalter "Steuerspannung" und "Betrieb mit Fl.- H_2 " eingeschaltet. Der Betriebszustand wichtiger Komponenten wird auf dem Blindschaltbild angezeigt und automatisch überwacht.

Im Strahlrohrpfropfen wird mit dem Pumpsatz V-Vp 3/4 ein Vakuum zwischen 10^{-5} und 10^{-6} Torr aufrecht erhalten und mit den Meßgeräten V-P 19/20/21, V-P 23/24/25 und V-P 31 überwacht. Die Dichtheit des Vakuumraums wird automatisch kontrolliert: Nach der Druckanstiegs- methode mit V-P 19/20/21, mit dem Lufteis Spiegel V-G6 sowie durch die Druckschalter V-P 29 und 30 an den beiden Doppeldichtungen mit Sperrgas. In der Vakuumauspuffleitung wird das Gas mit der Pumpe V-Gb 3 umgewälzt und mit den Detektoren V-G4 und 5 auf H_2 untersucht. Die He-Belüftung für den Vakuumraum ist betriebsbereit.

Die Kühlung des Druckrohres wird mit H-T5 und 6 im Steuerpult sowie mit 4 T 66 und 4 Q 48 in der FR2-Schaltwarte überwacht.

Die Moderatorkammer ist mit 90 bis 95 % Flüssig- H_2 gefüllt. Die Temperatur wird über H-T1 bis 4, der Druck und damit der Füllgrad werden über das Manometer H-P2 im H_2 -Pufferbehälter H-Bh 2 überwacht. Die Dichtheit im H_2 -System wird laufend mit H-P2 und dem H_2 -Detektor H-G1 kontrolliert.

Die He-Gaskälteanlage läuft im Kreislaufbetrieb und kühlt im Bypass mit einer automatisch geregelten Zulauftemperatur von ca. $14^\circ K$ bei einem He-Durchsatz von etwa $60 Nm^3/h$ die H_2 -Kammer, so daß der Flüssig- H_2 bei einem maximalen Druck von 3,15 atü und einer Temperatur von ca. $26^\circ K$ gehalten wird. Die He- Zu- und Rücklauftemperaturen werden mit PK-T71 und 49 überwacht. Da die Temperatur des Kühllheliums $14^\circ K$ nicht unterschreitet, kann selbst bei abgeschaltetem Reaktor der H_2 in der Moderator- kammer nicht einfrieren, d.h. nicht fest werden.

Das Neutronenfilter wird kontinuierlich mit Flüssig- N_2 aus dem Lagertank gekühlt und seine Temperatur mit Hilfe einer Durchflußregelung auf $78^\circ K$ gehalten sowie mit K-T8 und 9 gemessen und überwacht. Das entstehende kalte N_2 -Gas wird mit der geregelten Heizung K-Hz 1 auf Raumtemperatur erwärmt und in das Aktivabgassystem geleitet. Die kalten Zuführungs- leitungen und der Ventilkasten K-Bh 9 werden mit dem Pumpsatz V-Vp5/6 vakuumisoliert und der Druck mit V-P27, 28 und 32 kontrolliert.

Die Versorgungssysteme sind angeschlossen und auf ihre Funktion über- wacht. Elektr. Energie, Kühlwasser und Druckluft werden dem zentralen Versorgungssystem am Reaktor entnommen. Für Flüssig- N_2 , He- und N_2 -Gas besitzt das Projekt eine eigene Versorgung mit Signalisierung des Nach- füllzeitpunktes.

Die gesamte Anlage ist so ausgelegt, daß während des Dauerbetriebs bei auftretenden Fehlern mit Hilfe von Sicherheitsschaltungen Schäden an der Apparatur und der Umgebung automatisch vermieden werden. Es ist keine dauernde Überwachung der Steuerwarte sondern nur alle 2 h eine örtliche Kontrolle durch das Betriebspersonal erforderlich; gegebenenfalls wird dabei die Temperatur im He-Hauptkreislauf nachgeregelt sowie die Versorgungssysteme aufgefüllt. Wichtige Betriebswerte werden automatisch aufgezeichnet.

4.1.3. Abstellen

Soll das Experiment beendet werden, so wird zuerst die Flüssig-N₂-Kühlung des Neutronenfilters abgestellt. Danach wird die He-Kühlung der H₂-Kammer durch Schließen von PK-Ve 181 beendet. Die He-Kälteanlage kann nun ebenfalls abgestellt oder zum Verflüssigen von He weiter betrieben werden. Durch nukleare und thermische Aufheizung erwärmen sich die kalten Einbauten im Strahlrohrpfropfen, wobei im allgemeinen durch abdampfende Restgase der Druck im Vakuumraum über $5 \cdot 10^{-3}$ Torr ansteigt, so daß über V-P 20/21 das Programm "H₂-Evakuierung" eingeleitet wird. Dabei wird der H₂ ins Freie abgegeben und das H₂-System mit He gefüllt. Dieses Programm kann bei zu geringem Druckanstieg im Vakuumraum auch von Hand eingeschaltet werden.

Wenn das H₂-System mit He gefüllt ist, können auch der H₂-Detektor H-G1 sowie das Gebläse H-Gbl2 abgeschaltet werden.

Bei Reaktorbetrieb steigt die Temperatur der H₂-Kammer weiter an. Bei ca. 85 °C wird der Vakuumraum automatisch mit He als Wärmeträger auf einige Torr belüftet; dieser Vorgang kann auch von Hand ausgelöst werden.

Die beiden Vakuumpumpsätze werden stufenweise abgeschaltet, wobei der Frigen-gekühlte Ölfänger V-Öf 1 abzutauen ist. Soll das Experiment für längere Zeit (z.B. länger als einige Stunden) stillgesetzt werden, so wird der Vakuumraum des Pfropfens über V-Ve 60 mit He weiter bis auf Atmosphärendruck belüftet. Die Druckrohrkühlung wird bei Reaktorbetrieb über 4-T66 und 4-Q48 in der FR2-Schaltwarte überwacht und die Druckrohrtemperatur geschrieben. Dies geschieht unabhängig vom Betriebszustand des Projektes.

Mit dem Ziehen des Schlüsselschalters für die Steuerspannung am Steuerpult wird auch die Meßtechnik abgeschaltet. Damit wird die Experimentieranlage mit Ausnahme der He-Kälteanlage außer Betrieb genommen und bedarf keiner weiteren Überwachung.

4.2. Betrieb mit Flüssig-H₂ und He-Verflüssigung

Da für die jetzige Moderatorokammer nur etwa 1/3 der Kälteleistung der He-Anlage benötigt wird, kann gleichzeitig He verflüssigt werden, wobei ca. 10 l Fl.-He/h erzeugt werden dürften. Dieser kombinierte Kühl- und Verflüssigungsbetrieb ist bei großem Flüssig-He-Bedarf am FR2 vorgesehen, er muß jedoch erst weitererprobt werden, wobei folgender Ablauf geplant ist:

Hat die Kalte Quelle ihren Dauerbetriebszustand entsprechend 4.1.2 erreicht, so wird die He-Verflüssigung über das Joule-Thomson-Ventil eingeleitet. Die Kälteleistung ist dabei von Hand so nachzuregeln, daß nach der Turbine 2 die erforderliche Temperatur von ca. 13 °K sowie der eingestellte He-Durchsatz durch die H₂-Kammer erhalten bleiben. Während dieser Betriebszeit soll dauernd mindestens 1 Bedienungsmann an der Anlage sein. Das Abfüllen von Flüssig-He in Transportgefäße muß besonders sorgfältig erfolgen, damit die H₂-Kammer nicht durch Druck- und Temperaturschwankungen beeinflusst wird. Soll die Verflüssigung beendet werden, so ist dafür zu sorgen, daß die im Verflüssigungskreis aufgrund des Reinigungseffekts ausgefrorenen geringen H₂-Anteile des Frisch-He nicht in den Kältekreislauf eindringen, sondern abgepumpt werden. Ggf. muß hierzu die Kälteanlage etwas angewärmt werden (14 - 15 °K). Weitere Maßnahmen ergeben sich aus den Erfahrungen des Out-of-pile-Tests.

4.3. Betrieb ohne Flüssig-H₂

Da für manche neutronenphysikalischen Messungen keine so hohe Intensität subthermischer Neutronen benötigt wird oder die He-Kälteanlage nicht betriebsbereit sein kann, soll das Experiment auch ohne H₂-Moderator betrieben werden können. Dabei entfällt die He-Kühlung der H₂-Kammer, die mit dem Neutronenfilter im gleichen Vakuumraum untergebracht ist. Die Vakuumisolierung muß jedoch für das Filter aufrechterhalten werden, daher muß die H₂-Kammer, wegen der nuklearen Aufheizung des Kammermaterials, gekühlt werden. Die hier diskutierte Betriebsart weicht im wesentlichen wie folgt von der unter 4.1. ab:

Es wird der Schlüsselschalter "Betrieb ohne Flüssig-H₂" betätigt und die He-Anlage bleibt durch die Ventile PK-Ve 181 und 186 abgetrennt. Im H₂-System befindet sich He, das Abströmventil He-Ve 6 wird geschlossen.

Nun wird bei einem He-Druck im Strahlrohrpfropfen von ca. 5 Torr die H₂-Kammer über den Ventilkasten K-Bh9 und die H₂-Leitungen mit kaltem N₂-Gas aus dem Lagertank bis unter Raumtemperatur abgekühlt. Dann wird der Strahlrohrpfropfen auf 10⁻⁴ Torr evakuiert und das Neutronenfilter parallel zur H₂-Kammer auf 78 °K abgekühlt. Nun wird das Fl.-N₂-System am Ventilkasten von Hand so umgeschaltet, daß Filter und Kammer hintereinander von N₂ durchströmt werden und bei diesem Vorgang die Temperaturen von Filter und Kammer konstant bleiben. Im stationären Betrieb wird dies durch eine automatische Regelung bewirkt. Die Temperatur der H₂-Kammer darf 120 °K nicht unterschreiten, was durch eine Grenzwerteinheit überwacht wird. Die Meßgeräte V-G4, 5 und 6 werden für diese Betriebsart nicht benötigt.

4.4. He-Verflüssigung

Ist die He-Kälteanlage durch die Ventile PK-Ve 181 und 186 von der übrigen Versuchsanlage abgetrennt, so kann sie unabhängig zur He-Verflüssigung (etwa 20 l/h) verwendet werden. Die Versorgungssysteme sind diesem Betriebszustand angepaßt. Bei der Verflüssigung und beim Abfüllen von Flüssig-He in Transportkannen muß 1 Bedienungsperson dauernd anwesend sein. Beim Betrieb zum Kalthalten der Anlage (z.B. über Nacht) erfolgt die Überwachung automatisch und durch Kontrollen im Abstand von 2 h.

5. Sicherheitsbetrachtungen

Die Versuchsanlage ist so ausgelegt, daß sie durch interne Sicherheitsschaltung allen denkbaren Gefahren begegnet und somit direkte Verbindungen zum Reaktor-Sicherheits-System weitgehend vermieden werden.

Ein automatischer Reaktorschneellschluß wird nur in 3 Fällen eingeleitet:

- 1) Wenn die Temperatur des Druckrohres über 100°C ansteigt (s. 5.2.4.).
- 2) Wenn die Temperatur der H_2 -Kammer über 110°C ansteigt (s. 5.2.5.).
- 3) Wenn die H_2 -Evakuierung nicht programmgemäß abläuft (s. 5.1., Pkt. 3 des Programms " H_2 -Evakuierung").

5.1. Übersicht über die Gefahrenquellen

Als Hauptgefahr wird die Anwesenheit von H_2 in Corenähe und in der Reaktorhalle angesehen. Bei Betrieb des Experimentes befinden sich insgesamt maximal $0,9 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$ im H_2 -System innerhalb des Reaktorgebäudes. Hiervon sind ca. 220 cm^3 Flüssig- H_2 (entspr. $0,15 \text{ Nm}^3$) in der H_2 -Moderatorkammer am Corerand und $0,75 \text{ Nm}^3$ im H_2 -Pufferbehälter im H_2 -Schrank an der Rotundeninnenwand sowie den Zuleitungen zur H_2 -Kammer. Die H_2 -Druckgasflasche mit maximal 10 Nm^3 Inhalt ist einschließlich Hochdruckteil außerhalb des Reaktorgebäudes geschützt aufgestellt und über eine Niederdruckleitung (ca. 10 atü) mit dem H_2 -System verbunden. Wie in 2.4. näher erläutert, kann Wasserstoff auch als D_2 oder als Gemisch aus H_2 und D_2 verwendet werden, was jedoch sicherheitstechnisch von relativ geringer Bedeutung ist.

Droht Gefahr im Zusammenhang mit H_2 , so wird dieser automatisch aus dem System ins Freie abgegeben, indem das Programm " H_2 -Evakuierung", gesteuert durch Zeitrelais, abläuft:

- 1) Es wird sofort das H_2 -Abläßventil H-Ve 6 geöffnet und der H_2 ins Freie abgeblasen sowie die He-Kühlung durch Schließen von PK-Ve 181 abgestellt. Wird gerade H_2 aufgefüllt, so werden die H_2 -Einspeiseventile H-Ve 83 und H-Ve 3 geschlossen. Gleichzeitig werden die beim Aufwärmen abdampfenden Restgase aus dem Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens mit V-Vp 3 abgepumpt.
- 2) Nach einer einstellbaren Zeit, in der der Druck im H_2 -System auf ca. 0,4 atü abgesunken ist, wird der Flüssig- H_2 in der Kammer durch Einspeisen von He-Gas über H-Ve 97 verdampft und ausgeblasen.
- 3) Nach einer Zeit, in der sich die H_2 -Kammer auf ca. 30°K erwärmt, schließen H-Ve 97 und H-Ve 7, die Vakuumpumpe H-Vp 1 läuft an und evakuiert das H_2 -System auf 0,5 Torr. Die H_2 -Evakuierung wird über

H-P2 überwacht. Wird in der vorgesehenen Zeit im H_2 -System ein Vakuum von ca. 380 Torr nicht erreicht, so zeigt dies, daß die H_2 -Evakuierung nicht programmgemäß abläuft, und es erfolgt automatisch Reaktorschnellschluß.

- 4) Nun werden bei laufender H-Vpl über H-Ve 97 ca. 20 Nltr. He-Gas eingespeist und damit das H_2 -System gespült.
- 5) H-Vpl evakuiert weiter auf ca. 0,2 Torr und wird dann abgeschaltet, wobei H-Ve 7 öffnet. Über den Druckminderer H-Ve 9 wird das H_2 -System selbsttätig mit He-Gas auf ca. 0,05 atü gefüllt.

Eine weitere mögliche Gefahr neben der Anwesenheit von H_2 stellt das unbemerkte Eindringen von Luft in den Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens und ihr Ausfrieren an den kalten He-Leitungen (ca. 14 °K) im Bereich hoher nuklearer Strahlung dar. Dabei können sich Ozon sowie Sauerstoff- und Stickstoffradikale bilden, die beim Aufwärmen explosionsartig reagieren können. Außer den genannten Gefährdungen werden auch solche durch nukleare Strahlung und Aktivierung sowie durch konventionelle Störungen, wie Ausfall von Kühlluft oder elektrischem Strom, untersucht.

In Abb. 14 sind die Sicherheitseinrichtungen in ein vereinfachtes Fließschema eingezeichnet.

Diejenigen konventionellen Störfälle, die sicherheitstechnisch von geringer Bedeutung sind, werden nicht besonders erörtert, sie sind jedoch im Alarmstellenverzeichnis (Abb. 13) aufgeführt. Auch die He-Gaskälteanlage, eine nach den einschlägigen deutschen Vorschriften gebaute und vom TÜV abgenommene Apparatur, wird hier nicht behandelt, da sie keine besondere Gefährdung für den Reaktor darstellt.

In den folgenden Betrachtungen unterscheiden wir:

- Gefährdungen im Reaktorblock und
- Gefährdungen in der Reaktorhalle.

5.2. Gefährdungen im Reaktorblock

Hierbei sind -die folgenden Möglichkeiten und Gegenmaßnahmen zu diskutieren:

- 1) H_2 -Luft-Explosion im Druckrohr
- 2) N-O- bzw. Ozon-Reaktion im Druckrohr
- 3) Schutz des Reaktors bei 1) und 2)
- 4) Ausfall der Kühlung des Druckrohres
- 5) Ausfall der Kühlung der H_2 -Kammer
- 6) Ausfall der elektrischen Energieversorgung

5.2.1. Vermeidung einer H₂-Explosion im Druckrohr

In der H₂-Moderatorkammer am Corerand befinden sich ca. 220 cm³ Flüssig-H₂. Es sind daher die Wahrscheinlichkeit einer Explosion sowie die zu erwartenden Folgen zu diskutieren.

Für eine H₂-Explosion sind drei Bedingungen gleichzeitig bzw. nacheinander erforderlich:

- 1) Leckage von Raum- oder Kühlluft in den Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens
- 2) Leckage von H₂ in den Vakuumraum
- 3) Zündung des auf diese Weise entstandenen H₂-Luftgemisches.

Selbst bei einer Explosion können Einwirkungen auf das Reaktorcore nur dann eintreten, wenn Druckrohr, Seelenrohr und Tankrohr zerstört würden (s. 5.2.3.).

Um eine Beschädigung des Cores mit größter Sicherheit auszuschließen, werden Maßnahmen getroffen, durch die jede der drei Bedingungen einzeln vermieden und so eine gleichzeitige Erfüllung aller Bedingungen sicher ausgeschlossen werden soll.

5.2.1.1. Eindringen von Luft in den Vakuumraum

In dieser Hinsicht bestehen zwei Probleme:

- Vermeiden von Luftlecks
- Detektion von Lecks, die nicht vermieden werden konnten.

Gegen das Eindringen von Luft werden vor allem folgende Maßnahmen getroffen:

Das im corenahen Teil angeordnete luftgekühlte Druckrohr ist aus der Al-Legierung AlZnMg1 mit einer Mindestwandstärke von 9 mm aus dem Vollen gefertigt. Es wurde voll geröntgt und auf Dichtheit (Leckrate $< 10^{-9}$ Torr l/sec) geprüft. Das Druckrohr ist über eine kontinuierlich mit N₂-Sperrgas überwachte metallische Doppeldichtung (Vorversuche siehe 6.2.) mit dem ebenfalls aus dickwandigem Material hergestellten doppelwandigen Pfropfen verbunden (s. Abb. 9). Der Pfropfen selbst besitzt in der Mitte eine weitere überwachte Doppeldichtung und ist ansonsten im Corebereich geschweißt. Alle Schraub- und Schweißverbindungen wurden mit dem He-Massenspektrometer auf Dichtheit geprüft.

Das Druckrohr ist im Betrieb keiner besonderen Belastung ausgesetzt, die Temperatur liegt unter 100°C und im Innern herrscht Vakuum. Die Betriebstemperatur des Pfropfens und der Dichtungen beträgt weniger als 60°C .

Unter diesen Voraussetzungen kann selbst bei jahrelangem Betrieb die Möglichkeit von unbemerkten Lecks im corenahen Bereich ausgeschlossen werden.

Am corefernen Ende des Pfropfens sind viele lösbare Verbindungen vorhanden, die weitgehend mit (nicht überwachten) Doppeldichtungen ausgerüstet sind. Hier können Lecks nicht ganz ausgeschlossen werden, weshalb eine angemessene Detektion erforderlich ist.

Die Detektion von Luftlecks ist vor allem bei kleiner Leckrate sehr schwierig, weil die eindringende Luft an den kalten Flächen (ca. 14°K) im Strahlrohrpfropfen (Vakuum ca. 10^{-6} Torr) ausfriert und nur einen sehr geringen, schwer meßbaren Druckanstieg erzeugt /29, 30, 31/. Größere Undichtheiten und plötzlicher Lufteinbruch können dagegen durch die Druckmessung im Vakuumraum leicht erkannt werden.

Die Anforderungen an die Leckdetektion ergeben sich daraus, daß die in der längsten Betriebsperiode eindringende Luft einen Höchstwert nicht überschreiten darf. Aufgrund von Reaktionsversuchen mit H_2 (s. 6.6.) und der Festigkeit des Druckrohres (s. 6.7.) wurde dieser Wert zu 100 Nl festgelegt; das sind ca. 25 % der zu den 220 cm^3 Flüssig- H_2 in der Moderatorokammer stöchiometrischen Menge.

Es wurden die folgenden Detektionsmethoden angewandt, die den genannten Schwierigkeiten begegnen und den obigen Forderungen genügen:

- Druckanstiegsmethode mit sich überlappenden Anzeigebereichen
- Lufteisspiegel am corefernen Pfropfenende
- Periodische integrale Dichtheitsprüfung

Druckanstiegsmethode:

Tritt während des Betriebs corefern Luft in den Vakuumraum ein, so friert sie zum größeren Teil an den kalten He-Leitungen aus und der Rest wird vom Vakuumsystem abgepumpt. Da die kalten Flächen corefern weitgehend abgeschirmt sind, ist ihr Saugvermögen vergleichsweise gering. Außerdem drosseln die Einbauten im Vakuumraum die Luftströmung zu den corenahen Bereichen. Dies führt dazu, daß trotz laufender

Vakuumpumpe und der vorhandenen kalten Flächen bei Luftlecks in der uns interessierenden Größe im corefernen Teil des Vakuumraumes sich ein merklich erhöhter Gleichgewichts-Druck einstellt. In Vorversuchen am Originalpfropfen wurde der Zusammenhang zwischen Gleichgewichtsdruck und Leckrate ermittelt und folgende Sicherheitsvorkehrung getroffen:

Mit den Vakuummetern V-P19, 20 und 21 wird der Druck im corefernen Teil des Vakuumraumes automatisch überwacht und je nach Leckrate entsprechend der folgenden Tabelle Alarm ausgelöst bzw. eine automatische H₂-Evakuierung eingeleitet.

Grenzdruck (Torr)	Leckrate		Betriebszeit ^{+))} (d/100 NI)	Maßnahme
	(Torr l/sec)	(NI/d)		
$2 \cdot 10^{-5}$	0,01	1,0	100	Alarm
$8 \cdot 10^{-4}$	0,2	20	5	Alarm (in 1 von 2-Schaltg.)
$5 \cdot 10^{-3}$	1,0	100	1	H ₂ -Evakuierung (in 1 v.2-Schaltg.)

^{+))} Zeit für das Eindringen von 100 NI Luft

Bei Alarm wird die Anlage bemannt und dafür gesorgt, daß sie höchstens bis zu einer integralen Leckrate von ca. 25 % der zum vorhandenen H₂ stöchiometrischen Luftmenge, das sind 100 NI, betrieben wird.

Bei den genannten Vorversuchen wurde weiter festgestellt, daß bei der vorhandenen Pfropfengeometrie mit einem geringen Leitwert im Hochvakuumgebiet bei einem corefernen Luftleck der hier diskutierten Größenordnung keine nennenswerten Mengen Luft in corenahe Bereiche, also in die Nähe der H₂-Kammer, dringen, wodurch die Gefahr infolge Luftlecks weiter reduziert ist.

Luftteisspiegeldetektor:

An der kalten He-Rückleitung im corefernen Teil des Pfropfens ist ein Silberspiegel angebracht, an dem eingedrungene Luft ausfriert (Lufteis) und dabei die Reflektivität des Spiegels verringert. Mit Hilfe von Lampe und Fotowiderstand wird die optische Strahlungsanzahl gemessen und damit eine empfindliche integrale Leckanzeige geschaffen /28, 29/, deren Nachweisgrenze unter 1 % der stöchiometrischen Luftmenge zu 220 cm³ Flüssig-H₂ liegt (siehe Vorversuche, 6.5.4.). Bei einer Spiegelanzeige

von 50 % des Meßbereichs (entsprechend 5 Nl Luft bzw. 1,2 % stöchiom.) erfolgt Alarm und bei 100 % (entsprechend 10 Nl Luft bzw. 2,5 % stöchiom.) erfolgt "H₂-Evakuierung".

Periodische integrale Dichtheitsprüfung:

Nach jeder Reaktorbetriebsperiode wird der Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens bei warmen Einbauten einer Dichtheitsprüfung nach der Druckanstiegsmethode mit dem Vakuummeter V-P19 im Hochvakuumbereich unterzogen und bei einer genügenden Dichtheit (Leckrate einschl. Gasabgabe $< 5 \cdot 10^{-3}$ Torr l/sec entspricht in 1 Monat 16 Nl bzw. 4 % stöchiom.) für den weiteren Betrieb freigegeben.

5.2.1.2. Eindringen von H₂ in den Vakuumraum

Durch ein Leck in der Moderatorokammer oder den H₂-Leitungen könnte H₂ in den Vakuumraum eindringen. Es wurden deshalb folgende 4 Maßnahmen ergriffen, welche das Ansammeln von gefährlichen Mengen H₂ im Vakuumraum mit hoher Sicherheit verhindern:

- Hohe Dichtheit des H₂-Systems
- Leckdetektion mittels Druckanstiegsmethode
- H₂-Detektion im Vakuumauspuff
- Drucküberwachung im H₂-System

Hohe Dichtheit des H₂-Systems:

Alle H₂-führenden Teile im Vakuumraum sind geschweißt oder hartgelötet. Bei der nach dem Einbau durchgeführten Dichtheitsprüfung bei Raumtemperatur sowie bei einer Betriebstemperatur von 26 °K, in beiden Fällen bei einem Betriebsdruck von 4 atü, war die Gesamtleckrate kleiner als 10^{-7} Torr l/sec (= 0,33 Ncm³ H₂/Monat). Außerdem wurde die H₂-Kammer beim Hersteller umfangreichen Prüfungen unterzogen.

Leckdetektion mittels Druckanstiegsmethode:

Mit den Vakuummetern V-P19, 20 und 21 wird gemäß 5.2.1.1. der Druck im Vakuumraum überwacht. Die kalten He-Leitungen im Vakuumraum haben eine tiefste Temperatur von 14 °K. Am Tripelpunkt hat H₂ ebenfalls eine Temperatur von 14 °K und einen Dampfdruck von 54 Torr. Diese Daten zeigen, daß bei unseren Betriebsbedingungen H₂ weder ausfrieren noch auskondensieren kann. Tritt durch ein Leck H₂ in den Vakuumraum ein, so führt dies zu einem Druckanstieg, wobei gleichzeitig der H₂ laufend mit V-Vp 3/4 ins Freie abgepumpt wird. Bei einem H₂-Leck

von 10^{-3} Torr 1/sec ($\hat{=} 4 \text{ Ncm}^3 \text{H}_2/\text{h}$) erfolgt über V-P19 ein Alarm. Über V-P20/21 erfolgt in 1 von 2-Schaltung bei 10^{-2} Torr 1/sec ($\hat{=} 45 \text{ Ncm}^3/\text{h}$) ein weiterer Alarm sowie bei 10^{-1} Torr 1/sec ($\hat{=} 450 \text{ Ncm}^3/\text{h}$) eine H_2 -Evakuierung.

H_2 -Detektion im Vakuumauspuff:

In der Vakuumauspuffleitung messen die Detektoren V-G4 und 5 die H_2 -Konzentration. Ein Gerät arbeitet nach dem Wärmeleitprinzip und kann H_2 in N_2 oder Luft nachweisen. Das zweite Meßgerät ist mit einem Katalysator ausgerüstet und ermöglicht mit Hilfe der Wärmetönung die Detektion von brennbaren H_2 -Luft-Gemischen. Beide Detektoren leiten bei einem H_2 -Anteil in Luft bzw. N_2 von 0,5 % die H_2 -Evakuierung ein, was bei unserer Meßanordnung einer integralen H_2 -Leckage in den Vakuumraum von ca. 50 Ncm^3 entspricht.

Drucküberwachung im H_2 -System:

Der Druck im H_2 -System wird mit H-P2 überwacht. Bei konstant gekühlter H_2 -Kammer führt ein H_2 -Leck zu einem Druckabfall, wodurch bei einer integralen Leckage von ca. 100 Nl H_2 das Programm " H_2 -Evakuierung" eingeschaltet wird.

5.2.1.3. Zündung eines eventuell vorhandenen H_2 -Luft-Gemisches

Nimmt man an, daß sich trotz der oben geschilderten Maßnahmen eine merkliche Menge fester Luft an der Moderatorokammer oder den kalten Leitungen im Vakuumraum anlagert und gleichzeitig ein Leck in der H_2 -Moderatorokammer vorhanden ist, so wird eine Zündung im Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens auf folgende Weise vermieden:

Meßgeräte mit Explosionsschutz:

Die im Vakuumraum eingesetzten Vakuummeter und Druckschalter sind in der Explosionsschutzart "Eigensicherheit (Ex)i" ausgeführt und von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) /26/ geprüft. Dies gilt auch für die H_2 -Detektoren V-G4 und 5 in der Vakuumauspuffleitung. Die Thermolemente arbeiten mit so geringen Leistungen ($< 10^{-8} \text{ W}$), daß auch hier keine Zündung zu befürchten ist.

Abschalten von Geräten bei Druckanstieg:

Unterhalb 1 Torr ist ohne besondere Katalysatoren die Zündung von Knallgas praktisch nicht möglich /32/. Steigt der Druck im Vakuumraum über 1 Torr an, so werden über den Druckschalter V-P31 die Vakuummeter V-P19, 20 und 21 sowie die Heizung der Diffusionspumpe V-Vp4 abgeschaltet und gleichzeitig wird die H₂-Evakuierung eingeleitet.

Vermeidung einer "N-O"-Reaktion:

Eine "N-O"-Reaktion (vgl. 5.2.2.) wäre als Zündquelle denkbar. Diese Gefahr soll vermieden werden durch die in 5.2.1.1. beschriebene Luftdetektion sowie durch laufendes Abpumpen der evtl. ausgefrorenen Luft beim Aufwärmen.

Im vorliegenden Abschnitt 5.2.1. wurde die Vermeidung einer H₂-Explosion im Druckrohr diskutiert. Es wird gefolgert, daß die angeführten Maßnahmen eine unbemerkte Bildung von Knallgas und dessen Zündung in Corenähe mit großer Wahrscheinlichkeit ausschließen.

5.2.2. Vermeidung einer "N-O"-Reaktion im Druckrohr

Auch ohne die Anwesenheit von H₂ stellt ausgefrorene Luft im Vakuumraum eine gewisse Gefahr dar. Es sind nämlich verschiedene Unfälle an Kryostaten in Strahlenfeldern bekannt geworden, bei denen ausgefrorene Luft oder Flüssig-N₂, der O₂ enthielt, beim Wiederaufwärmen explosionsartig reagierte. Der Mechanismus dieser Explosionen ist nicht bekannt. Die Autoren Cottrell /33/, Coltman /34/, Lacaze /5/, Webb /9/ und Marfaing /35/ vermuten Bildung von Ozon, von O-, N- oder N-O-Radikalen, die nur bei tiefen Temperaturen stabil sind und beim Aufwärmen explosionsartig zerfallen (Ozon) oder miteinander oder mit Spuren organischer Substanzen reagieren.

Die Schäden bei den erwähnten Unfällen waren gering, so daß in unserem Fall eine Zerstörung des Druckrohres nicht zu erwarten wäre. Es könnte jedoch eine solche Reaktion zur Zerstörung der Moderatorokammer und zur Zündung des dann vorhandenen H₂-Luft-Gemisches führen. Auch aus diesem Grunde erscheinen die in 5.2.1.1. beschriebenen Maßnahmen erforderlich, um das Ausfrieren gefährlicher Mengen Luft im Strahlrohrpfropfen zu verhindern.

Eine O₂-Anreicherung im Neutronenfilter bei Kühlung mit Flüssig-N₂ wird durch dauernde Spülung mit dem Kühlmedium vermieden. Die H₂-Moderator-kammer wird bei Betrieb ohne Flüssig-H₂ nur mit kaltem N₂-Gas gekühlt und eine Unterschreitung von 120 °K automatisch verhindert, so daß sich auch in diesem Fall kein Flüssig-O₂ ansammeln kann /36/.

5.2.3. Schutz des Reaktors gegen die Folgen einer Explosion

Für den unwahrscheinlichen Fall, daß die oben beschriebenen vielfältigen Sicherheitsmaßnahmen versagen, wurde der coreseitige Teil des Strahlrohr-pfropfens als Druckrohr ausgebildet, um Reaktortank und -core vor den Folgen einer dann denkbaren explosionsartigen Reaktion zu schützen.

5.2.3.1. H₂-Luft-Reaktion

Mit einer Reihe eigener Versuche (s. 6.6.) wurde ermittelt, mit welchen Drücken bei einer H₂-Luft-Reaktion maximal zu rechnen ist. Die Höhe der Drücke wird maßgeblich vom H₂-Luftverhältnis beeinflusst (s. Abb. 15), bei gegebener H₂-Menge also vom Luftanteil (in % der entsprechenden stöchiometrischen Luftmenge). Der maximal zulässige Wert für die durch denkbare Lecks insgesamt einströmende Luftmenge wurde auf 25 % der stöchiometrischen Menge festgelegt, bezogen auf die vorhandene Flüssig-H₂-Menge von 220 cm³. Die dann im Falle einer H₂-Luft-Reaktion zu erwartenden Drücke erträgt das Rohr bei einer Betriebstemperatur von 90 °C ohne plastische Verformung, gemäß der in 6.7. behandelten Festigkeitsrechnung.

5.2.3.2. "N-O"-Reaktion

Die in 5.2.2. beschriebenen Reaktionen haben nach den Angaben im Schrifttum nirgends zu einer Beschädigung von Bauteilen geführt, deren Festigkeit mit der unseres Druckrohrs vergleichbar ist. Wir sind daher der Ansicht, daß das Druckrohr durch eine solche Reaktion nicht gefährdet ist.

5.2.4. Ausfall der Kühlung des Druckrohres

Bei Ausfall der Luftkühlung steigt die Temperatur des Druckrohres an, seine Festigkeit nimmt dadurch ab und somit sein Wert als Explosionsschutz. Deshalb wird diese Temperatur über die Meßstellen H-T5 und 6 überwacht. Wird ausgehend von einer Betriebstemperatur von ca. 70 °C /37/ ein Wert von 80 °C erreicht, so erfolgt Alarm. Wird die zulässige Temperatur von 90 °C (s. 6.7. -) überschritten, so wird eine H₂-Evakuierung eingeleitet. Außerdem wird bei zu hoher Druckrohrtemperatur bereits das Einspeisen von H₂ über die Ventile H-Ve 83 und 3 durch Verriegelung verhindert.

Bei einer Druckrohrtemperatur von 100 °C wird der Reaktor über die Meßstelle 4T66 automatisch durch Schnellschluß abgeschaltet.

Dies geschieht aus folgendem Grund: Bei zu großer und lang andauernder Erwärmung des Druckrohres tritt eine bleibende Entfestigung des Werkstoffes AlZnMgI ein. Aufgrund von Literaturangaben (zitiert in /18/) und Versuchen /38/ wurde eine zulässige Dauertemperatur von 100 °C ermittelt. Kurzzeitig darf der Werkstoff bis 150 °C erreichen, ohne daß eine merkliche Festigkeits- einbuße zu befürchten ist. Bei einer Ausgangs-Reaktorleistung von 44 MW wird bei Ausfall der Kühlluft und erfolgtem Reaktorschnellschluß die Druckrohrtemperatur wegen der nur langsam abklingenden nuklearen Aufheizung über den Abschaltwert von 100 °C ansteigen. Nach den vorliegenden Erfahrungen wird die Temperatur von 150 °C nicht erreicht.

Bei Reaktorbetrieb wird unabhängig vom Betriebszustand des Projektes der Kühlluftdurchsatz automatisch überwacht (Stör- signal von 4Q48) und die Druckrohrtemperatur mit einem Schreiber registriert.

5.2.5. Ausfall der Kühlung der H₂-Moderatorkammer

Fällt die He- bzw. N₂-Kühlung unbeabsichtigt aus, so könnte die thermisch vakuumisolierte Moderatorkammer nuklear auf eine derart erhöhte Temperatur aufgeheizt werden, daß eine Verformung oder sogar Zerstörung der Aluminiumkammer eintritt. Eine Überwachung mit H-T3 und 4 in 1 von 2-Schaltung sorgt deshalb dafür, daß bei einem Temperaturanstieg der Kammer auf 85 °C der Vakuumraum über V-Ve 58 und 59 automatisch mit He auf 5 Torr belüftet und gleichzeitig der Vakuumpumpsatz durch Schließen von V-Ve 61 abgetrennt wird. Die der Kammer zugeführte Wärmemenge kann so durch Wärmeleitung über das He-Gas an das Druckrohr abgegeben werden. Hierbei stellt sich an der Kammer eine Gleichgewichtstemperatur von ca. 80 °C ein /37/. Steigt die Temperatur trotzdem weiter an, weil durch einen technischen Fehler nicht genügend He eingeströmt ist, so wird der Vakuumraum bei 100 °C Kammertemperatur über ein weiteres Ventil V-Ve 60 mit He auf 0,12 atü belüftet und gleichzeitig das Programm H₂-Evakuierung eingeleitet. Der für die Belüftung erforderliche He-Vorrat im Zwischenspeicher V-Bh 18 wird über den Druck V-P22 automatisch überwacht. Erhöht sich die Temperatur der H₂-Kammer weiter, so erfolgt bei 110 °C ein automatischer Reaktorschnellschluß.

5.2.6. Ausfall der elektrischen Energieversorgung

Die Stromversorgung für diese Versuchsanlage besteht aus 3 Netzen. Entsprechend ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung sind die einzelnen Anlageteile an das Normalnetz, das Notstromnetz mit kurzzeitiger Unterbrechung (die Unterbrechung tritt bei Ausfall des Normalnetzes ein) oder das Notstromnetz ohne Unterbrechung angeschlossen (s. 3.7.3.).

Fällt das Normalnetz aus, so wird der Hauptkompressor der Kälteanlage stillgesetzt und somit die H₂-Moderatorkammer nicht mehr mit He gekühlt. Außerdem werden die Vakuumpumpe V-Vp⁴ am Pfropfen und der Pumpsatz V-Vp 5/6 abgeschaltet. Damit ist auch der Betrieb des Experiments unterbrochen. Eine automatische, mit Notstrom gespeiste Überwachung bewirkt, daß sicherheitstechnisch keine besonderen Gefährdungen auftreten.

Ist das Normalnetz ausgefallen und kommt der "Notstrom mit kurzzeitiger Unterbrechung" nicht wieder, so steigt beim Warmwerden der Kälteanlage der Druck im He-Kreislauf an, da der Rückförderkompressor nicht anläuft. Es ist mit dem Ansprechen des Hauptsicherheitsventils der He-Anlage zu rechnen, was zu einem gewissen He-Verlust führt. Interne Sicherheitsventile, die in eine Sammelleitung abblasen, verhindern weitergehende Schäden.

Beim Notstrom ohne Unterbrechung ist ein Ausfall kaum zu erwarten. Tritt jedoch trotzdem ein Versagen ein, so daß auch das 3. Netz stromlos ist, so öffnen die sicherheitstechnisch wichtigen Ventile, wie H-Ve 6 und 97 sowie V-Ve 59. Das H₂-System wird hierbei selbsttätig druckentlastet und die H₂-Kammer mit He gespült sowie der Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens mit He belüftet. Das H₂-System bleibt lediglich mit einem geringen H₂-Überdruck gefüllt. Obwohl hierbei auch die gesamten Meß- und Steuergeräte ausfallen würden und somit ein eventuelles H₂-Leck nicht detektiert sowie der H₂ nicht evakuiert werden könnte, ist eine Gefährdung nur denkbar, wenn außer dem Stromausfall gleichzeitig andere unabhängige Störungen, insbesondere im Zusammenhang mit der Anwesenheit von H₂ auftreten. Eine Gefahr für das Reaktorcore könnte auch hierbei nicht entstehen, da die Schutzfunktion des Druckrohres nicht beeinträchtigt wäre.

5.3. Gefährdungen in der Reaktorhalle

Die Hauptgefahr stellt das H₂-System dar. Weitere Gefahren sind die Aktivierung der Kreislaufmedien Wasserstoff, Helium und Stickstoff sowie die nukleare Strahlung aus dem Experimentierkanal.

5.3.1. Vermeidung einer H₂-Explosion2.....

Im H₂-System befinden sich max. 0,9 Nm³ Wasserstoff. Dies ist eine geringe Menge im Vergleich zum Luftinhalt der Reaktorhalle von ca. 30 000 m³, der stündlich durch Zwangsbelüftung ein- bis zweimal gewechselt wird.

Die H₂-Druckgasflasche mit maximal 10 Nm³ Inhalt ist zur Erhöhung der Sicherheit außerhalb der Rotunde aufgestellt (s. Abb. 7), wobei die einschlägigen Unfallverhütungsvorschriften beachtet wurden. Ein H₂-Leck außerhalb der Rotunde stellt keine Gefährdung für den Reaktor und seine Nebenanlagen dar. Dieser Störfall wird daher nicht besonders diskutiert. Das Abblasen des H₂ aus dem H₂-System ins Freie stellt ebenfalls keine Gefahr dar, da der Austritt der Abgasleitung im Süden der Rotunde 11,5 m über dem Erdboden liegt und vom gegenüberliegenden Gebäude 20 m entfernt ist.

Um eine H₂-Explosion in der Reaktorhalle mit Sicherheit zu vermeiden, sollen alle Umstände, die für das Zustandekommen einer Explosion gegeben sein müssen, einzeln vermieden werden.

Dies sind:

- 1) Ein Leck des H₂-Systems
- 2) Die Bildung eines zündfähigen Gemisches
- 3) Die Zündung des Gemisches

5.3.1.1. Leck des H₂-Systems

Es werden die Maßnahmen erläutert, welche das Vorhandensein bzw. das spätere Auftreten eines H₂-Lecks verhindern sollen.

Hohe Dichtheit des Systems:

Die H₂-Leitungen und deren Verbindungen (Hartlötstellen und Doppeldichtungen) sowie die eingebauten Meßgeräte und Armaturen wurden mehrfach mit dem He-Massenspektrometer auf Dichtheit geprüft und vorhandene Undichtheiten beseitigt. Bei der integralen Dichtprüfung nach der Montage war die Gesamtleckrate kleiner als 10^{-4} Torr l/sec bei einem Betriebsdruck von 4 atü.

Absicherung gegen Überdruck:

Die Zerstörung von Systemteilen durch zu hohen Druck wird mit Sicherheit vermieden durch die Drucküberwachung H-P2, welche die Magnetventile H-Ve 3, 83 und 6 steuert sowie durch die Berstmembranen H-Ve 4 und 5. Die Berstmembranen sprechen erst an, wenn die Drucküberwachung versagt. Das Sicherheitsventil H-Ve 98 schützt den vor H-Ve 3 liegenden Teil des Systems.

Mechanischer Schutz:

Gegen gewaltsame mechanische Beschädigung (z.B. abfallende Kranlast) wurden die Aufbauten am Reaktorblock durch ein Profileisengestell geschützt. Die Verbindungsleitungen vom Gestell zur Rotundenwand sind in einem stabilen Rechteckkanal verlegt, der teilweise zusätzlich in einem versenkten Kabelkanal verläuft. Der H₂-Schränk innen an der Rotundenwand ist mechanisch geschützt durch die darüberliegende Experimentierbühne.

5.3.1.2. Bildung eines zündfähigen H₂-Luft-Gemisches

Ein Gemisch ist zündfähig zwischen 4,0 und 75,6 Vol% H₂ in Luft /39/. Sollte trotz der in 5.3.1.1. angegebenen Maßnahmen ein Leck auftreten, so muß die Bildung eines zündfähigen Gemisches vermieden werden.

Folgende Vorkehrungen wurden getroffen:

Spülen mit Luft:

Die vom H₂-Schränk zum Strahlrohrpfropfen führenden H₂-Leitungen sind in einem Leitungskanal verlegt, welcher kontinuierlich durch das Gebläse H-Gbl4 gespült wird. Die Fördermenge des Gebläses ist ca. 15 m³/h, was etwa 300 Luftwechsel je Stunde ergibt; sie wird von H-Q3 überwacht, bei Abfall auf 70 % erfolgt ein Alarm.

Der H₂-Schränk wird von unten nach oben durch das Axialgebläse H-Gbl2 zwangsbelüftet, wobei die Spülluft in einen wenig gefährdeten Bereich der Reaktorhalle geblasen wird. Die Fördermenge beträgt 1200 m³/h und entspricht 600 Luftwechsel je Stunde. Unterschreitet die Fördermenge einen Grenzwert, so löst der Strömungswächter H-Q2 Alarm aus. Gegebenenfalls wird dann von Hand das Programm "H₂-Evakuierung" eingeleitet.

Bei dem angegebenen Spülluftstrom würde die untere Zündgrenze erst bei einem H₂-Leck von mindestens 10 Nl/sec erreicht, was praktisch nur bei einem Rohrbruch denkbar ist. Da das System mit hoher Sicherheit ausgelegt und zusätzlich mechanisch geschützt ist, ist ein solcher Rohrbruch nicht zu erwarten.

H₂-Detektion:

Tritt ein Leck auf, so wird der H₂ zusammen mit dem Spülluftstrom zum Detektor H-G1 gefördert, der bei mehr als 0,5 Vol% H₂ in Luft das Programm "H₂-Evakuierung" auslöst.

Drucküberwachung durch H-P2:

Unabhängig von der H₂-Detektion wird ein H₂-Leck auch durch die Drucküberwachung H-P2 im H₂-System detektiert. Hierdurch kann eine Gesamtleckage von ca. 100 Nl H₂ nachgewiesen werden. Wird dieser Wert erreicht, so erfolgt automatisch H₂-Evakuierung.

Weitere Maßnahmen:

Zwischen das H₂-System und die Abgasleitung ist ein He-Sperrgasraum geschaltet, um eine Luftrückströmung zu verhindern.

Das H₂-System kann nur nach vorausgegangener Evakuierung mit H₂ gefüllt werden. Hierzu ist das H₂-Einspeiseventil elektrisch so verriegelt, daß es nur bei einem Systemdruck unter 20 Torr geöffnet werden kann.

Für das Projekt wird ausgebildetes Personal eingesetzt. Es wird nach einem Betriebshandbuch arbeiten, in dem die durchzuführenden Maßnahmen detailliert aufgeführt sind.

5.3.1.3. Zündung des H₂-Luft-Gemisches

Zusätzlich zu den in 5.3.1.1. und 5.3.1.2. angegebenen Maßnahmen zur Vermeidung eines Lecks bzw. eines zündfähigen Gemisches sind auch Vorkehrungen getroffen worden, um eine Zündung auszuschließen.

Explosionsschutz:

Damit die im System eingebauten elektrischen Geräte nicht zur Zündung führen, wurden sie explosionsgeschützt ausgeführt. Für die einzelnen Geräte liegen Bescheinigungen vor über Baumuster- bzw. Sonderprüfungen durch die PTB.

Elektrostatistische Entladung /40, 41/:

Die unmittelbare Umgebung des H₂-Schranks ist als gefährdeter Bereich gekennzeichnet und abgesperrt. Der Zugang ist nur durch 2 leitende, gut geerdete Türen möglich, bei deren Öffnen statisch aufgeladene Personen sich entladen. Innerhalb der so gebildeten Sperrzone ist ein elektrisch leitfähiger PVC-Bodenbelag verlegt (Erdableitwiderstand $R_E < 10^6$ Ohm, gemessen nach DIN 51953). Die die Sperrzone betretenden Personen müssen leitfähige Schuhe tragen. Der H₂-Schränk ist geerdet (Widerstand $< 10^6$ Ohm). Die Keilriemen der Vakuumpumpe sowie der Schlauch zur Ableitung der Spülluft aus dem H₂-Schränk sind elektrisch leitfähig. Dem Gebläse H-Gbl4 am Rohrkanal ist ein Feinfilter nachgeschaltet, um die Gefahr einer elektrostatischen Aufladung der Spülluft zu verringern.

Weitere Zündquellen:

Sieht man trotz aller Maßnahmen ein plötzliches großes Leck im H₂-System als möglich an, dann kann am Austritt des Lüftungsschlauches vom Gebläse H-Gbl2 ein zündfähiges Gemisch auftreten. Das Ende der Schlauchleitung ragt etwa 4 m von der Rotundenwand entfernt in die Reaktorhalle (s. Abb. 6) und zwar in der Weise, daß keine elektrischen Geräte angeblasen werden oder sich nahe am Austritt befinden. Für die Reaktorhalle besteht Rauchverbot. Eine auffallende Beschilderung weist im Bereich des H₂-Systems auf die Verwendung von Wasserstoff hin.

Gutachten:

Die Gesamtanlage wurde hinsichtlich der Explosionsgefahr von der PTB begutachtet /26/. Es bestanden keine sicherheitstechnischen Bedenken gegen den Betrieb der Anlage. Das H₂-System und seine sicherheitstechnische Auslegung wurden auch mit den zuständigen Vertretern des Gewerbeaufsichtsamtes und des TÜV /42/ sowie der Berufsgenossenschaft diskutiert.

5.3.2. Gefährdung durch die Aktivierung der Kreislaufmedien

5.3.2.1. Aktivierung im N₂-System

Nach Abschnitt 4. wird bei "Betrieb mit Flüssig-H₂" das Neutronenfilter mit Flüssig-N₂ gekühlt; bei "Betrieb ohne Flüssig-H₂" wird das Neutronenfilter mit flüssigem, die Moderator-kammer mit dem vom Filter kommenden, gasförmigen N₂ gekühlt. Durch die im N₂ vorhandenen Verunreinigungen (besonders O₂ und Ar) ergibt sich eine gewisse Aktivierung des Kühlmediums durch die Reaktorstrahlung. Interessant ist nur das entstehende Isotop ⁴¹Ar, alle anderen Aktivitäten sind um mindestens eine Zehnerpotenz kleiner.

Mit einem Ar-Gehalt im N₂ von max. 0,2 % (gemessen: 0,09 bis 0,18 %) wurden für 44 MW Reaktorleistung folgende Aktivitätskonzentrationen errechnet /43/:

	"Betrieb mit Fl.-H ₂ "	"Betrieb ohne Fl.-H ₂ "
Fl.-N ₂ -Strom (l/h)	1	1,5
Aktivität pro (µCi/cm ³) cm ³ N ₂ -Gas	4 · 10 ⁻³	5 · 10 ⁻²

Freigrenze für ⁴¹Ar in Luft nach /44/: 4 · 10⁻⁸ µCi/cm³.

Nach der Strahlenschutzregelung /44/ sind die Aktivitätskonzentrationen zu groß, um das Kühlgas frei in die Reaktorhalle abblasen zu können. Es ist daher vorgesehen, das abströmende N_2 -Gas in das vorhandene Abgassystem für schwachaktive Gase (8000 m^3/h -Anlage) einzuleiten.

5.3.2.2. Aktivierung im He-Kühlkreislauf

Durch die Reaktion ${}^3\text{He} (n,p) \text{T}$ entsteht in dem zur Kühlung der Moderatorkammer abgezweigten Teilstrom des Gaskältekreislaufs kontinuierlich Tritium. Für einen He-Teilstrom von 75 Nm^3/h bei einer mittleren He-Temperatur in der Bestrahlungszone von 12,5 °K und einem thermischen Neutronenfluß von $4 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ wurden folgende Aktivitäten errechnet /45/:

Bestrahlungszeit	(sec) (h)	10^6 278	10^7 2780	$2 \cdot 10^7$ 5560
Gesamtaktivität im Kreislauf	(Ci)	$0,17 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$
Aktivitätskonzentration im He	($\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$)	$0,57 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$

Zur Beschränkung der Aktivität im Kreislauf wird jeweils nach einer Reaktorbetriebsphase (31 Tage = 744 h = $2,7 \cdot 10^6 \text{ sec}$) die T-Konzentration gemessen. Bei Überschreitung von $4,5 \cdot 10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$ wird das Kreislauf-He ausgetauscht oder durch Ausfrieren des Tritiums gereinigt. Im folgenden wird daher mit einer maximalen Konzentration von $4,5 \cdot 10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$ gerechnet, entsprechend einer Gesamtbestrahlungszeit von 10^7 sec .

Eine Gefährdung durch Tritium wäre im Falle eines Lecks denkbar; es werden 3 Fälle betrachtet:

- Leck in die Reaktorhalle
- Leck in den Raum R208 (Maschinenraum des He-Kreislaufs)
- Leck ins Kühlwasser des Niederdruckkompressors (PK-Gb7)

Nach der Strahlenschutzregelung /44/ beträgt die höchstzulässige Tritiumkonzentration in Luft $2 \cdot 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$. Bei dieser Konzentration ist noch ein Daueraufenthalt von 12 h/Woche zulässig. Bei einer T-Konzentration von $6 \cdot 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ist ein Aufenthalt von 40 h/Woche erlaubt.

Nach den ICRP-Empfehlungen /46/ können, da das Tritium gasförmig, gemischt mit He auftritt, Konzentrationen zugelassen werden, die um den Faktor 200 höher liegen.

Das einem Leck entströmende He vermischt sich mit der Luft des betreffenden Raums; die entstehende Tritiumkonzentration, deren Größe vom Raumvolumen abhängt, wird durch Zwangsbelüftung rasch vermindert.

In der Reaktorhalle werden selbst beim Austritt des gesamten Kreislauf-He nur lokal und kurzzeitig Konzentrationen auftreten, die über den in der Strahlenschutzregelung angegebenen Grenzen liegen. Auch bei ausgefallener Zwangsbelüftung oder bei Umluftbetrieb wird höchstens eine Gesamtkonzentration von $3,5 \cdot 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ erreicht. Ein Leck in der Reaktorhalle bringt also keine Gefährdung.

Bei einem Leck im Raum R208, bei dem in kurzer Zeit das gesamte Kreislauf-He freigesetzt wird, ergibt sich eine Anfangskonzentration von $7 \cdot 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$. Nach den ICRP-Empfehlungen /46/ besteht noch keine Gefährdung, nach der Strahlenschutzregelung sollten Personen den Raum möglichst bald verlassen. Bei drei Luftwechsel pro Stunde kann der Raum nach 25 min bereits wieder betreten werden. Bei der dann herrschenden Aktivitätskonzentration ist nach der Strahlenschutzregelung ein Aufenthalt von 12 h/Woche zulässig. Nach etwa 2 h liegt die Tritiumkonzentration bereits unter der Freigrenze von $2 \cdot 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$.

Bei kleineren Leckagen wird die zulässige Konzentration erst nach Zeiten erreicht, die zum Feststellen und Beseitigen der Lecks ausreichend lang sind.

Tritt bei einem Leck in den Zwischenkühlern des Niederdruckkompressors das gesamte Kreislauf-He ins Kühlwasser über und geht dort das gesamte Tritium in Lösung, dann ergibt sich eine T-Konzentration von $1,85 \cdot 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ Wasser. Die Freigrenze liegt nach der Strahlenschutzregelung bei $3 \cdot 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$; das Kühlwasser könnte also ohne Gefahr ins Regenabwassernetz geleitet werden.

Nimmt man umgekehrt an, daß kein Tritium im Wasser gelöst wird, sondern der gesamte Kreislaufinhalt in Blasen bis zum 3 m^3 -Behälter im Raum Z103 (Permutitanlage) transportiert wird und dort in den Raum strömt, dann ergibt sich eine Konzentration von $1,37 \cdot 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$, entsprechend einer zulässigen Aufenthaltsdauer von 18 h/Woche. Da immer ein Teil des Tritiums im Wasser gelöst wird, besteht dort keine Gefahr.

5.3.2.3. Aktivierung im H₂-System

Bei "Betrieb mit Flüssig-H₂" (s. 4.1.) wird der Inhalt des H₂-Systems im Störfall oder spätestens nach einer Reaktorbetriebsphase von 30 Tagen ins Freie abgeblasen. Die Abgasleitung führt durch die Wand der Reaktorhalle und endet 11,5 m über dem Erdboden.

Über die Reaktionen $D(n,\gamma)T$ und ${}^3\text{He}(n,p)T$ entsteht bei einer He-Verunreinigung des H₂ von 0,1 % und einem Fluß von $4 \cdot 10^{13}$ n/cm².sec in der Bestrahlungszone in 30 Tagen eine Aktivität von

$$1,9 \cdot 10^{-4} \text{ Ci} = 190 \text{ } \mu\text{Ci} \quad /45/$$

Dies entspricht dem doppelten Wert der Menge, die in der Strahlenschutzregelung /44/ als Freigrenze angegeben ist. Da die Abgabe in 11,5 m über dem Erdboden erfolgt, besteht keine Gefahr.

Falls als Moderator eine H₂-D₂-Mischung verwendet wird, werden die Verhältnisse ungünstiger: Im extremen Fall, daß 100 % D₂ eingesetzt wird, ergibt sich unter sonst gleichen Bedingungen eine Gesamtaktivität von

$$3 \cdot 10^{-2} \text{ Ci} = 30\,000 \text{ } \mu\text{Ci}$$

entsprechend einer Konzentration von $3 \cdot 10^{-2} \text{ } \mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3 \text{ D}_2$.

Mit den ungünstigen Annahmen, daß bei der Abgabe aus der Abgasleitung eine nur 10-fache Verdünnung erfolgt, daß das aktive Gas zu Boden gedrückt wird und dort etwa 200 sec erhalten bleibt, ergibt sich eine Strahlenbelastung für Personen von etwa 10^{-4} rem /45/.

Der Inhalt des H₂-Systems kann demnach nach einer 4-wöchigen Reaktorperiode auch bei D₂-Füllung ohne Bedenken über die Abgasleitung ins Freie abgeblasen werden.

Ist das Projekt außer Betrieb, dann befinden sich in der H₂-Kammer etwa 0,3 Nl He sowie im corenahen Teil des Strahlrohrpfropfens etwa 6 Nl He, die bei Wiederinbetriebnahme über dieselbe Abgasleitung ins Freie abgeblasen werden. Nimmt man eine Bestrahlungszeit von etwa 60 Tagen (zwei Reaktorbetriebsperioden) an, so entsteht eine Tritiumaktivität von insgesamt etwa $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ Ci} = 12\,000 \text{ } \mu\text{Ci}$. Diese Aktivität ist geringer als die oben für D₂ angegebene, die Abgabe also unbedenklich.

5.3.3. Gefährdung durch nukleare Strahlung am Strahlrohr

Nach Messungen an der in Betrieb befindlichen Anlage (1. Ausbaustufe des Projektes) wurden für die hier zu diskutierende 2. Ausbaustufe (44 MW Reaktorleistung) folgende Daten berechnet /43/:

		Strahlenblende offen	Strahlenblende geschlossen in Strahlrichtung
Gammastrahlung	(rem/h)	400	0,45
Schnelle Neutronen	(mrem/h)	180	1,8
Thermische Neutronen	(mrem/h)	360	0,04
		an der Oberfläche der Strahlenblende	
Gammastrahlung (Streuung)	(mr/h)	-	400

Durch die Experimentieraufbauten vor dem Kanal, besonders durch einen speziellen Strahlenfänger, wird die direkte Strahlung auf Werte unter der Toleranzgrenze abgeschirmt. Die bei geschlossener Strahlenblende auftretende Streu-Gammastrahlung wird durch eine im sog. R3-Gestell fest installierte Abschirmung auf tolerierbare Werte vermindert.

Bei Änderungen an der Abschirmung der Experimentieraufbauten müssen - auch bei geschlossener Strahlenblende - bewegliche Abschirmungen eingesetzt werden.

5.4. Größter glaubhafter Unfall

Als größter glaubhafter Unfall wird eine H₂-Luft-Reaktion in der Reaktorhalle angesehen, an der der gesamte Inhalt des H₂-Systems (ca. 1 Nm³) beteiligt ist. Es wird das Zusammentreffen der folgenden ungünstigen Umstände angenommen:

- Aus einem Leck des H₂-Systems ströme, bevor die automatisch eingeleiteten Sicherheitsmaßnahmen wirksam werden, der gesamte H₂-Inhalt in den Leitungskanal oder in den H₂-Schränk.
- Das Leck sei so groß, daß trotz der Zwangsspülung mit großen Luftmengen (s. 5.3.1.) ein zündfähiges H₂-Luft-Gemisch entsteht, das von den Spülgebläsen in die Reaktorhalle gefördert wird.

- Das Gemisch sei stöchiometrisch.
- Beim Austritt aus der Spülluftleitung in die Reaktorhalle werde das Gemisch gezündet, noch bevor es durch Mischung mit der Hallenluft weiter verdünnt wird.

Als Zündquellen sind allenfalls heiße Flächen, offene Flammen oder elektrische Entladungen denkbar. Durch diese kann nach Cassut /47/ höchstens eine explosionsartige Verbrennung ausgelöst werden, es sei denn, das Gemisch ist räumlich eingeschlossen, wie etwa in einem Behälter. Die im Vergleich zu dem betrachteten Gemischvolumen große Reaktorhalle stellt in diesem Sinne keinen Einschluß dar. Cassut registrierte bei solchen explosionsartigen Verbrennungen keine nennenswerten Überdrücke, sie lagen mit Sicherheit unter 1 m WS.

Nach Schardin /48/ kann ein Druck von 1 m WS bei senkrechter Reflexion an einer starren Wand auf etwa 2 m WS gesteigert werden.

Durch Drücke dieser Größe wird der Reaktor selbst nicht gefährdet. Personen und Experimentieraufbauten könnten Schaden erleiden.

Desgleichen könnte die Reaktorhalle gefährdet werden. Zur Beurteilung der Hallenfestigkeit im Falle einer H_2 -Luft-Reaktion wurde vom Hersteller der Stahlrotunde, Fa. Dingler, eine Berechnung /49/ durchgeführt. Nach dieser Berechnung erfolgt bei einer Belastung bis zu 2 m WS auf einer Angriffsfläche bis zu 10 m Durchmesser keine plastische Verformung der Reaktorhalle. Selbst bei ungünstiger Lage der Lastangriffsfläche sowie ungünstiger Stellung und Belastung des Krans werden die mechanische und die Dichtfunktion der Halle nicht beeinträchtigt.

Nach den in Abschnitt 5.2.3. dargelegten Sicherheitsbetrachtungen kann ein Bruch des im Corebereich befindlichen Druckrohres und damit eine Beschädigung des Cores mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden und stellt deshalb nicht den größten glaubhaften Unfall dar.

6. Vorversuche und Berechnungen

6.1. Zur Auslegung der H₂-Moderatorkammer

6.1.1. Wärmeübertragung

Für eine Reaktorleistung von 44 MW und mit vor dem R3-Kanal eingesetztem Brennelement BE 60/14 wurde eine nukleare Aufheizung für das Kammermaterial Al von 40 Watt und für den Flüssig-H₂ von 15 W ermittelt /17/. Durch Wärmestrahlung und -leitung werden der Kammer etwa 5 Watt zugeführt. Diese 60 W sind an das He-Kühlgas zu übertragen.

Der Wärmeübergang auf der H₂-Seite der Moderatorkammer konnte weder auf Grund der Literatur über Kalte Quellen und Flüssig-H₂ noch durch theoretische Überlegungen mit genügender Genauigkeit ermittelt werden, da die Angaben sehr streuten und auf unser Problem nur bedingt übertragbar waren. Es wurden deshalb Versuche mit einer Kammer durchgeführt, wobei der Flüssig-H₂ über eine Rohrschlange mit He-Gas gekühlt und die nukleare Einstrahlung in den H₂ durch eine elektrische Heizung simuliert wurde /21/. Die übrigen Verhältnisse, wie Größe der Versuchskammer, Drücke und Temperaturen entsprachen in etwa denen der jetzt eingebauten Kammer.

Die Versuche zeigten, daß die durch freie Konvektion des Flüssig-H₂ an die He-Kühlschlange übertragbare Wärme weit unter 15 Watt liegt und daher viel zu gering ist. Bei einem Füllgrad der Kammer von 90 % kann jedoch an der im verbleibenden Dampfraum unterzubringenden Kühlfläche die im H₂ entstehende Wärme durch Kondensation abgeführt werden. Die in das Kammermaterial eingestrahlte Wärme muß durch Wärmeleitung direkt an die Kühlschlange übertragen werden. Dabei müssen bei gegebener Wärmeleitfähigkeit des Kammermaterials die Wärmeleitstrecken so ausgelegt werden, daß an keiner Stelle die Siedetemperatur des Flüssig-H₂ überschritten wird.

Die eingebaute Moderatorkammer wurde auf Grund dieser Versuche ausgelegt, wobei die Wärmeaustauschflächen reichlich dimensioniert wurden, um die Ungenauigkeit der Messungen sowie der Werte für die nukleare Aufheizung auszugleichen /17/.

Da nach dem derzeitigen Beladungsschema für das FR2-Core die BE-Position 60/14 nicht besetzt werden soll, vermindert sich die nukleare Aufheizung merklich /17/, so daß die Temperaturdifferenz zwischen Kühl-He und Flüssig-H₂ verringert werden kann. Dies bedeutet, der Betriebsdruck im H₂-System kann gegenüber dem Auslegungswert von 3,15 atü (kalt) vermindert werden und damit erniedrigt sich (entsprechend der Dampfdruckkurve) die Temperatur des Flüssig-H₂. Alternativ kann auch eine Verringerung der Kühlfläche im Dampfraum zugelassen und damit ein höherer Füllgrad der Kammer erreicht werden. Die endgültigen Betriebswerte für Druck und Füllgrad werden bei den ersten Versuchen im Reaktor ermittelt. Wie rechnerische Abschätzungen zeigen, dürften die vorhandenen Wärmeübertragungsflächen auch für eine Reaktorleistung von 60 MW ausreichen; hierbei darf jedoch die BE-Position 60/14 nicht durch ein Brennelement besetzt werden.

6.1.2. Festigkeit

Die festigkeitsmäßige Auslegung der H₂-Kammer erfolgte nach den AD-Merkblättern für einen maximalen Betriebsdruck von 5 at gegen Vakuum bei 100°C. Eine Kammer derselben Abmessungen und desselben Werkstoffes wie die eingebaute (jedoch ohne die aufgelöteten Rohrschlangen an den beiden Böden, s. Abb. 10) wurde einem Abpreßversuch bei 20 °C unterzogen. Bis 12 atü war nur eine geringe elastische Verformung festzustellen, die bleibende Verformung setzte bei 15 atü ein. Bei 22 atü wurde die Kammer durch Ausstülpfen des konkaven Bodens zerstört, wobei die Lötung der H₂-Anschlüsse am Boden aufriß.

6.1.3. Abnahmeprüfungen

Die eingebaute Kammer wurde beim Hersteller eingehenden Prüfungen unterzogen. Ein bei der Vorprüfung festgestelltes Leck wurde durch Nachschweißen beseitigt. Bei Druckprüfungen über 24 h mit 5 atü und kurzzeitig mit 7 atü, jeweils bei 100 °C, sowie mit 8,5 atü bei 20 °C war die Kammer dicht und zeigte keine Veränderung ihrer Form /22/. Nach mehrmaligem Abkühlen auf 80 °K wurde die Kammer bei dieser Temperatur und bei 20 °C nach außen und ihre Gasräume gegeneinander bei Betriebsdruck auf Dichtheit geprüft. Hierbei war die Leckrate kleiner als 10⁻⁹ Torr l/sec. Die Schweißnähte wurden durch Röntgen geprüft und mit "brauchbar" beurteilt, wobei jedoch

aufgrund der ungünstigen Geometrie keine vollständige Auswertung möglich war. Nach dem Einbau wurden weitere Temperaturwechsellversuche sowie Dichtheitsprüfungen bei Betriebsbedingungen durchgeführt. Hierbei konnten ebenfalls keine Lecks festgestellt werden. Die durchgeführten Vorversuche, Berechnungen und Prüfungen lassen erwarten, daß die H₂-Moderatorkammer den Anforderungen im Betrieb standhält.

6.2. Zur Dichtheit und zum Betrieb des Strahlrohrpfropfens

Da sich im Vakuumraum des Strahlrohrpfropfens die mit Flüssig-H₂ gefüllte Moderatorkammer befindet, wurden an die Dichtheit des Pfropfens hohe Anforderungen gestellt. Es soll vor allem keine Luft eindringen, da sie an den kalten Einbauten ausfrieren und sich somit ansammeln kann.

Bereits während der Montage wurden deshalb alle Einzelteile des Pfropfens mit dem He-Massenspektrometer auf Dichtheit vorgeprüft. Besondere Aufmerksamkeit wurde hierbei der Dichtung zwischen Druckrohr und Pfropfen (s. Abb. 9) gewidmet. Über diese konische Metalledichtung lagen für die Paarung gleicher Werkstoffe bereits Untersuchungen über die Dichtheit in einem großen Temperaturbereich vor /50/. Da bei uns ungleiche Materialien mit verschiedenen Wärmeausdehnungszahlen, nämlich die Al-Legierung AlZnMg1 und der Stahl St52, miteinander verbunden wurden, wurde eine Verbindung mit dieser Werkstoffpaarung mit einem Dichtelement aus Al-Folie untersucht. Nach 50 Temperaturwechseln zwischen 20 und 100 °C war die Leckrate kleiner als 10^{-7} Torr l/sec, gemessen bei Raumtemperatur nach der Vakuummethode.

Nach Abschluß der Montage und mehreren Temperaturwechseln an den kalten Einbauten wurde die Dichtheit des gesamten Vakuumraumes einschließlich aller Anschlüsse bei Raumtemperatur und bei Betriebsbedingungen geprüft. Die integrale Leckrate, gemessen mit dem Massenspektrometer, war hierbei kleiner als 10^{-5} Torr l/sec. Außerdem wurden mehrere Prüfungen nach der Druckanstiegsmethode im Vakuumbereich durchgeführt. Hierbei wurde eine Leckrate (einschließlich Gasabgabe der Wände) von ca. $2 \cdot 10^{-4}$ Torr l/sec gemessen. Als zulässige Leckrate wurden von uns $5 \cdot 10^{-3}$ Torr l/sec festgelegt.

Der Strahlrohrpfropfen ist z.Zt. in der Reaktorhalle aufgebaut und an die verschiedenen Systeme angeschlossen. Erprobungen zusammen mit dem Vakuum- und dem Flüssig-N₂-System sowie der He-Kälteanlage zeigten die Funktionstüchtigkeit des Pfropfens, seiner Einbauten und der angeschlossenen Geräte. Die abschließende Prüfung erfolgt beim Out-of-pile-Test der Gesamtanlage.

6.3. Zur Funktion und Dichtheit des H₂-Systems

6.3.1. Funktionsprüfung

Die für den Betrieb des H₂-Systems wichtigen Füll-, Abblase- und Evakuierungszeiten bei Verwendung von Wasserstoffgas wurden ermittelt sowie gleichzeitig die Funktion der wichtigen Systembauteile geprüft.

Die Systemfüllzeit ist durch das Handventil H-Ve2.1 regulierbar. Sie beträgt bei der jetzt arretierten Einstellung ca. 4 min. Dem sicherheitstechnisch wichtigen Programm "H₂-Evakuierung" wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Der Einbau eines Rückschlagventils sowie einer Drosselstelle erwies sich als notwendig. Flattererscheinungen am Überströmventil H-Ve8 waren nach Verwendung einer Feder mit anderer Federkonstante nicht mehr festzustellen. Der H₂-Systemdruck baut sich im Störfall in ca. 30 sec auf 0,4 atü ab, in weiteren 6 min ist das System auf 0,05 ata evakuiert. Damit sich im Pufferbehälter H-Bh2 kein explosives Gemisch bilden kann, wird sofort Helium aus der Flaschenbatterie nachgespeist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß das H₂-System von der Funktion her die gestellten Anforderungen erfüllt.

6.3.2. Dichtheitsprüfung

Die Dichtheitsprüfungen gliedern sich in Prüfungen an Einzelteilen, Prüfungen nach der Montage der Einzelteile und Prüfungen nach der Aufstellung des H₂-Schranks in der Reaktorhalle.

Die Einzelteilprüfung erfolgte mit dem He-Massenspektrometer nach der Vakuum- bzw. der integralen Schnüffelmethode. Bei allen geprüften Teilen, die betriebsmäßig unter Wasserstoffgas stehen, war die Leckrate nach außen kleiner als $1 \cdot 10^{-6}$ Torr l/sec. Die integrale Dichtprüfung des H₂-Systems und der He-Druckgasversorgung wurde bei dem jeweiligen Betriebsdruck durchgeführt. Die gesamten Montage-Verbindungen waren somit geprüft.

Ermittelte Leckraten:

$L < 7,0 \cdot 10^{-5}$ Torr l/sec für das H₂-System

$L < 4,4 \cdot 10^{-4}$ Torr l/sec für die He-Druckgasversorgung.

In der Reaktorhalle wurde nach der Aufstellung des H₂-Schranks eine Druckstandsprobe durchgeführt, welche zeigen sollte, ob beim Transport Beschädigungen aufgetreten waren. Es wurde innerhalb von 22 Stunden bei Berücksichtigung von Raumtemperatur und Barometerstand kein Druckabfall festgestellt. Aufgrund der gegebenen Volumina, der Prüfzeit sowie der Meßgeräte, betrug die Nachweisgrenze hierbei etwa $6 \cdot 10^{-2}$ Torr l/sec.

Wie diese Prüfungen zeigten, ist das H₂-System ausreichend dicht und läßt dadurch einen sicheren Betrieb erwarten.

6.4. Erprobung der He-Kälteanlage

Die He-Anlage ist seit Anfang 1966 zeitweise in Betrieb. Beim Abnahmeversuch wurde die Kälteleistung gemessen. Dabei wurde die geforderte Leistung von 210 W bei einer mittleren Temperatur von 12,5 °K am Ende der etwa je 13 m langen Verbraucherleitungen erbracht. Der zulässige Druckverlust in der H₂-Moderatorkammer einschließlich Verbraucherleitungen konnte sogar von 0,8 auf 0,95 at erhöht werden, was eine geringe Leistungsreserve darstellt. Auch die verlangte Verflüssigungsleistung wurde um 10 % überschritten und erreichte 20 l/h Flüssig-He. Der Abnahmeversuch zeigte jedoch, daß die Betriebssicherheit einzelner, wichtiger Anlagenteile nicht befriedigte.

Nach dem Abnahmeversuch wurde daher die Anlage so oft wie möglich zur Probe gefahren und untersucht. Gleichzeitig wurden Vorversuche mit dem Strahlrohrpfropfen (H₂-Kammer, Lufteis Spiegel) bei tiefer Temperatur durchgeführt, He für Experimentatoren verflüssigt und Betriebspersonal ausgebildet.

Die beim Probetrieb aufgetretenen Schwierigkeiten führten zu einer Reihe von Verbesserungen, die vom Hersteller vorgenommen wurden. Es wurden insbesondere verschiedene Maßnahmen ergriffen, um die Zuverlässigkeit der Expansionsturbinen und des Trockenlaufkompressors zu erhöhen sowie das Kreislaufhelium vor Verunreinigungen zu schützen.

Außerdem konnte die Dichtheit der Anlage und die Regelung verbessert werden. Gewisse Unsicherheiten bestehen weiterhin bei der Lagerung der Turbine 2 und der Reinheit des Kreislaufgases. An diesen Problemen wird gearbeitet und es ist daher zu hoffen, daß die restlichen Mängel bis zum in-pile Betrieb der Versuchsanlage weitgehend behoben sein werden.

6.5. Meßtechnische Vorversuche

6.5.1. Vakuummeter V-P19, 20 u. 21

Penning-Vakuummeter V P19:

Zum Erreichen der Eigensicherheit (Ex)i der Meßröhre wurde ein strombegrenzender Widerstand unmittelbar an die Stromdurchführung in den Vakuumraum angelötet. Zusätzliche Schutzmaßnahmen gegen eine Zündung eventuell auftretender explosibler Gasgemische im Vakuumraum sind eine Eigenabschaltung bei Überschreiten eines Druckes von 5×10^{-3} Torr und eine Fremdabschaltung durch einen Druckschalter bei 1 Torr. Die Wirksamkeit dieser Schutzmaßnahmen wurde in Versuchen erprobt. Die Eichung mußte nach der Herabsetzung der Hochspannung neu vorgenommen werden. Sie erfolgte für Luft gegen ein Ionisationsvakuummeter. Die Anzeigeskala wurde danach umgezeichnet.

Pirani-Vakuummeter V-P20 und 21:

Die Geräte wurden zur Erreichung des Explosionsschutzes (Ex)i mit einer transistorisierten Strombegrenzung ausgerüstet, die die Meßgenauigkeit nicht beeinflußt. Insbesondere die Drift wurde in Langzeitversuchen festgestellt. Die Anzeigedrift infolge von Oberflächenänderungen in der Meßröhre beträgt auf den elektrischen Vollausschlag bezogen etwa 1,5 %.

6.5.2. Drucküberwachung H-P2

Das Rohrfedermanometer mit dem Meßbereich von -1,0 bis +6,0 atü und der Güteklasse 0,6 ist mit einem Ferngeber ausgerüstet. Die Grenzwerte sind auf $\pm 0,15$ at reproduzierbar. In diesem Wert sind Langzeitdriften des Verstärkers und der Grenzwerteinheit enthalten. Das bedeutet, daß die verschiedenen Grenzwerte in der gleichen Richtung driften, daß

die relative Reproduzierbarkeit eines Grenzwertes zum anderen also nur |0,15| at beträgt.

Für die Meßstelle H-P2 wird auch ein Grenzwert bei 20 Torr benötigt. Um einerseits den hohen Auslegungsdruck ohne Verminderung der Meßgenauigkeit aufnehmen zu können, andererseits eine gute Auflösung für die Grenzwertbildung zu erhalten, wurde ein überdrucksicheres Plattenfedermanometer mit Ferngeber eingesetzt, dessen Ausgangssignal auf den Bereich -1,0 bis 0 atü gespreizt wurde. Die Reproduzierbarkeit des auf 20 Torr eingestellten Grenzwertes ist besser als ± 10 Torr und genügt den Anforderungen.

6.5.3. H₂-Detektoren H-G1, V-G4 und 5
.....

V-G4 (Prinzip Wärmetönung):

Die Meßköpfe dieser beiden Geräte sind elektrisch gleich. Mechanisch unterscheiden sie sich dadurch, daß V-G4 innerhalb eines Rohrkreislaufs, H-G1 jedoch im offenen Luftstrom betreibbar ist. Für beide Meßstellen wurde der Nullpunkt eingestellt und die Drift über längere Zeit verfolgt. Sie ist kleiner als 0,5 % vom Vollausschlag, entsprechend 0,02 % H₂ in Luft. Die Kalibrierung der beiden Meßstellen wurde mit Hilfe verschiedener Prüfgase (1% und 2% H₂ in Luft) nachgeprüft. Eine Abhängigkeit der Anzeige von der Strömungsgeschwindigkeit des Meßgases wurde bis zu maximal erreichbaren Werten von 5 m/sec (im Abluftschlauch) nicht festgestellt.

V-G5 (Prinzip Wärmeleitung):

Da bei Betriebsbedingungen der Auspuffraum mit Stickstoff gespült sein wird, wurde dieser H₂-Detektor mit einem entsprechenden Prüfgas kalibriert (1% H₂ in N₂ für Vollausschlag, 100% N₂ für Nullpunkt). Der Nullpunkt ist in dem gemessenen Bereich von 25 bis 40 l/h vom Durchsatz und von 0,01 bis 0,3 atü vom Druck unabhängig. Nach einer Einschaltzeit von 1 h bleibt die elektrische Nullpunktdrift unter 0,5% des Vollausschlags.

6.5.4. Lufteisdetektor V-G6
.....

Zur Erprobung und Kalibrierung des Lufteisdetektors wurde bei kalten He-Leitungen durch ein corefern angebrachtes Dosierventil Luft in den Vakuumraum eingelassen. Es zeigte sich, daß es eine Belagstärke gibt, oberhalb der das Reflexionsvermögen der Spiegelanordnung nicht mehr abnimmt. Der angeschlossene Verstärker wurde so ausgelegt, daß dieser

Belag eine Anzeige von ca. 100% des Vollausschlags ergibt. Die zur Erzeugung dieses Belages erforderliche eingelassene Luftmenge hängt in gewissen Grenzen von der Leckrate, von der Temperatur der kalten Leitungen und vom Einlaßort (relativ zum Spiegel) ab und beträgt etwa 10 NL (bei gleichzeitiger Absaugung durch den Pumpstand V-Vp 3/4).

Die elektrische Nullpunktsdrift bleibt unter 2% des Vollausschlags. Der Nullpegel der Anzeige steigt im Laufe des Betriebs aufgrund der Gasabgabe der Wände leicht an, liegt jedoch in einer Betriebszeit von 1 Monat unter 20% des Vollausschlags. Abschließende Versuche über den genauen Einfluß der verschiedenen Parameter sind vorgesehen.

6.6. Versuche über die Reaktion von Flüssig-H₂ mit flüssiger Luft

Zur Bestimmung von Höhe und zeitlichem Verlauf der Drücke, die bei einer denkbaren Reaktion von Wasserstoff mit ausgefrorener Luft im Druckrohr auftreten können, wurden umfangreiche Versuche durchgeführt /15/. In einem Rohr von druckrohrähnlichen Abmessungen wurden definierte Mengen Flüssig-H₂ und flüssige Luft durch Zündung einer stets gleichgroßen Knallgasmenge zur Reaktion gebracht. Der zeitliche Druckverlauf an verschiedenen Stellen des Rohres wurde mit Spezialdruckgebern (Piezo-Quarze) gemessen und registriert. Variiert wurden Mengen und Mengenverhältnis der Reaktionspartner.

Die zu untersuchende Reaktion lief als Verbrennung ab, der einzelne, lokal begrenzte Teildetonationen überlagert waren. Dabei wurde der folgende, im Prinzip bei allen Versuchsvarianten gleiche Druckverlauf registriert: In einer Zeit von minimal 0,5 msec steigt der Druck im Rohr auf einen Höchstwert, hält einige msec an, um schließlich langsam abzufallen. Diesem "quasistatischen" Druck sind, besonders in der Anstiegsphase, einzelne ausgeprägte Druckspitzen überlagert ("dynamischer" Druck, Teildetonationen), deren Dauer 10 bis höchstens 100 μ sec beträgt und deren Höchstwert den des "quasistatischen" Drucks meist übersteigt. Die Höhe der Drücke hing von der Menge und dem Verhältnis der eingesetzten Flüssiggase ab. Quantitativ streuten die Meßwerte sehr stark. Zur Auswertung wurden die jeweils höchsten Meßwerte eingesetzt.

Die bei einer Flüssig-H₂-Menge von 250 cm³ (Auslegungsvolumen) der Moderator-kammer) maximal gemessenen Drücke sind in Abb. 15 über der Gemischzusammensetzung aufgetragen. Aus der Abbildung ist zu ersehen, daß beispielsweise mit einem "quasistatischen" Druck von maximal 245 at und mit lokalen Druckspitzen von höchstens 360 at zu rechnen ist, wenn 30 % der stöchiometrischen Luftmenge, das sind etwa 140 Nl Luft, mit 250 cm³ Flüssig-H₂ reagieren.

6.7. Zur Festigkeit des Druckrohrs

Das Vakuumrohr am corenahen Ende des Strahlrohrpfropfens soll im Falle einer H₂-Reaktion den auftretenden Druckkräften standhalten, es wurde daher als Druckrohr ausgebildet (s. 3.1.3. und Abb. 9).

Aus gepreßten Rohlingen (Vollmaterial) wurden zwei Rohre gleicher Abmessungen hergestellt und von der Abteilung Fertigungskontrolle auf Maßhaltigkeit, Werkstoffhomogenität und Dichtheit geprüft. Das Prüfungsergebnis war bei beiden Rohren positiv.

Hauptabmessungen an der schwächsten Stelle: $D_i = 94,4 + 0,2 \text{ mm}$
 $D_a = 113 + 0,2 \text{ mm}$

Rohrwerkstoff: AlZnMg1, warmausgehärtet

Festigkeitswerte nach Abnahmezeugnis gemäß DIN 50049, 3C, TÜV Frankfurt:

		bei 20 °C	bei 100 °C
Streckgrenze $\sigma_{0,2}$	(kp/mm ²)	40,8	32,9
Zugfestigkeit σ_B	(kp/mm ²)	44,7	36,2
Bruchdehnung δ_5	(%)	12	17

Diese Werte wurden an Längsproben der gepreßten Druckrohr-Rohlinge ermittelt. Der Festigkeitsrechnung /18/ wurden die etwas ungünstigeren Ergebnisse GfK-interner Zugversuche an Querproben /38/ zugrunde gelegt.

Nach den bekannten Beziehungen für dickwandige Rohre bei statischer Innendruckbelastung wurden für verschiedene Betriebstemperaturen die Innendrucke berechnet, bei denen Fließen am Rohrrinnenrand bzw. der vollplastische Zustand beginnt. Außerdem wurde mit einem vereinfachten analytischen Modell die Auswirkung der in 6.6. erwähnten Druckspitzen

("dynamischer" Druck) abgeschätzt unter der ungünstigen Annahme, daß diese nicht lokal begrenzt, sondern im ganzen Rohr zugleich wirken.

Die nach diesen Berechnungen ertragbaren Innendrucke sind in Abb. 15 über der Betriebstemperatur aufgetragen. Zum Vergleich sind die nach /15/ im Falle einer H_2 -Luft-Reaktion höchstens zu erwartenden Drucke eingezeichnet. Man sieht, daß die "statischen" Drücke bei jedem Luftanteil und die "dynamischen" Drücke bis zu einem Luftanteil von 30 % ohne plastische Verformung ertragen werden, wenn man Betriebstemperaturen bis $90^\circ C$ zuläßt. Zur Bestätigung der Berechnungen wurde eines der beiden Rohre bei Raumtemperatur durch statischen Innendruck bis zum Bersten belastet /51/. Dabei wurden Umfangs- und Axialdehnung an der Rohraußenfläche an verschiedenen Stellen mit Dehnungsmeßstreifen gemessen. Die Dehnungen entsprachen den berechneten Werten, der Berstdruck lag mit 715 at um etwa 30 at über dem Druck, bei dem laut Rechnung der vollplastische Zustand erreicht wird.

Das zweite, für den Einbau im Strahlkanal vorgesehene Rohr wurde einer Druckprobe bei 200 at unterzogen. Dabei blieben erwartungsgemäß alle Verformungen im elastischen Bereich.

Das Druckrohr ist am Strahlrohrpfropfen über eine Schraubverbindung befestigt (Abb. 9). Die Festigkeitsberechnung dieser Verbindung erscheint wegen der vielen erforderlichen Annahmen zu unsicher, daher wurden zwei Druckversuche durchgeführt. Bei beiden Versuchen versagte die Verbindung durch Herausspringen der Überwurfmutter aus dem Pfropfengewinde, einmal bei einem Innendruck von 750 at und einmal bei 900 at. Da selbst der kleinere Wert über dem Berstdruck des Rohres liegt, ist die Verbindung Druckrohr-Pfropfen nicht gefährdet.

7. Out-of-pile-Erprobung der Gesamtanlage

Die gesamte Versuchsanlage ist z.Zt. im Reaktorgebäude aufgebaut. Der Strahlrohrpfropfen befindet sich nicht im R3-Kanal, sondern ist zusammen mit dem Vakuum- und Flüssig- N_2 -System in der Reaktorhalle im Bereich des Lukendeckels (Pos.8, Abb.6) aufgestellt. Die übrigen Anlagenkomponenten, wie He-Anlage, H_2 -Schränk und Steuerwarte, befinden sich an ihrem endgültigen Platz (s.Abb. 7). Die Geräte sind mechanisch und elektrisch angeschlossen sowie auf Dichtheit und Funktion vorgeprüft.

Beim Out-of-pile-Test soll das Zusammenspiel der Anlagenteile und der Sicherheitseinrichtungen erprobt werden, wobei weitgehend die spätere Betriebsweise simuliert wird. Lediglich die nukleare Aufheizung wird nicht nachgeahmt, da dies für die H₂-Moderatorkammer bereits in Vorversuchen /21/ erfolgte und für das Druckrohr genügend Rechnungswerte vorliegen. Im einzelnen ist folgendes Programm vorgesehen:

7.1. Betrieb mit He

Aus Sicherheitsgründen wird die Anlage zuerst mit He statt H₂ im H₂-System gefahren. Hierbei werden die verschiedenen Betriebsphasen: Anfahren, Dauerbetrieb und Abstellen sowie die Umschaltungen vom Normalbetrieb auf andere Betriebsweisen (s. 4.) erprobt. Danach werden die im Alarmstellenverzeichnis (Abb. 13) enthaltenen Störungen simuliert und die hierdurch ausgelösten Sicherheitsmaßnahmen, insbesondere das Programm "H₂-Evakuierung" und das Signal "Reaktorschnellschluß", auf ihre einwandfreie Funktion untersucht. Sollte sich zeigen, daß Verbesserungen erforderlich sind, so werden sie durchgeführt und die betroffenen Anlagenteile erneut geprüft, bevor der Test mit H₂ erfolgt.

7.2. Betrieb mit H₂

Nun wird das erste Mal in der Reaktorhalle H₂ in die Anlage eingespeist und die Erprobung des Normalbetriebs entsprechend 4.1. mit Anfahren, Dauerbetrieb und Abstellen durchgeführt. Weitere Versuche schließen sich an, bei welchen die Störungen untersucht werden, die sich mit H₂ anders als beim Test mit He auswirken können. Außerdem werden besonders wichtige Sicherheitseinrichtungen nochmals geprüft. Zeigen sich hierbei keine Fehler, so ist damit der Out-of-pile-Test abgeschlossen.

Nach dem Einbau in den Reaktor erfolgen weitere Erprobungen. Insbesondere werden die Temperaturen der corenahen Teile des Strahlrohrpfropfens bei nuklearer Aufheizung und bei Störungen gemessen und mit den Rechnungswerten verglichen. Auch die thermodynamischen Eigenschaften der H₂-Moderatorkammer und der erreichbare Füllgrad werden untersucht. Danach können die ersten physikalischen Versuche mit der Kalten Neutronenquelle beginnen.

8. Literatur

- /1/ Egelstaff, P.A. (Editor): Thermal Neutron Scattering, Academic Press Inc., London (1965)
- /2/ Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids, IAEA, Vienna (1961, 1963, 1965)
- /3/ Butterworth, I., P.A. Egelstaff, H. London and F.J. Webb: The Production of Intense Cold Neutron Beams, Phil.Mag. 2, 917 (1957)
- /4/ Jacrot, B.: Refroidissement des Neutrons et Sources de Neutrons Froids, Rapport CEA n° 2169 (1962)
- /5/ Lacaze, A.: Modération des Neutrons aux Très Basses Températures, Rapport CEA n° 2012 (1963)
- /6/ Dingenen, W. van: Systematic Study of Some Cold Neutron Sources, Nucl. Instr. and Meth. 16, 116 (1962)
- /7/ Webb, F.J.: Cold Neutron Beams from Small Low-Temperature Moderators in Reactors, Nucl. Sc. and Eng., 9, 120 (1961)
- /8/ Webb, F.J. and D.G. Pearce: The Performance and Automatic Operation of the Liquid Hydrogen Cold Neutron Source in DIDO, Inel. Scattering of Neutrons in Solids and Liquids, S. 83, IAEA, Vienna (1963)
- /9/ Webb, F.J.: Cold Neutron Sources, Reactor Science and Technology (Journal of Nucl. Energy, Parts A/B) 17, 187 (1963)
- /10/ Tunkelo, E. and A. Palmgren: The Cold Neutron Facility at the FIRM, Nucl. Instr. and Meth. 46, 266 (1966)
- /11/ Doose, C.: Die Strahlrohreinbauten für die Kalte Neutronenquelle am FRJ-2 (DIDO), Int. KFA-Bericht, Jülich (1965)
- /12/ Hughes, D.J.: Pile Neutron Research, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1953)

- /13/ Ward, D.L., D.G. Pearce and P.J. Merrett: Liquid Hydrogen Explosions in Containment Vessels, AERE-R 4312 (Interim Report), Harwell (1963)
- /14/ Pearce, D.G., D.L. Ward and P. Hayes: Liquid Hydrogen Explosions in Containment Vessels, AERE-R 4584, Harwell (1966)
- /15/ Karb, E.H.: Versuche über die Reaktion von flüssigem Wasserstoff mit flüssiger Luft in einem Druckrohr KFK-Bericht 789, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1968)
- /16/ Koeppe, W.: On Thermal Problems connected with Solid Methane as Moderator for Cold Neutron Sources, Pure and Applied Cryogenics, Vol. 4, 341, Pergamon Press (1967)
- /17/ Haffner, H.: Unveröffentlicht
- /18/ Karb, E.H.: Unveröffentlicht
- /19/ Schneidmadl, E.: Die Herstellung hochwertiger Verbindungen zwischen Kupfer und Aluminium durch Abbrenn-Stumpfschweißung, Schweißen und Schneiden, 9, 59 (1957)
- /20/ Gehring: Prüfung von Al/Cu-Verbindungen, Prüfbericht Nr. 528, Linde AG, München (1964), (nicht veröffentlicht)
- /21/ Hildebrandt, U.: Erprobung einer H₂-Moderatorkammer, ETS-Bericht Nr. 3, Linde AG, München (1965), (nicht veröffentlicht)
- /22/ Kahn, W.: Gasdruckprüfung einer H₂-Moderatorkammer, Bescheinigung Nr. 022593 des TÜV-Bayern, München (1967), (nicht veröffentlicht)
- /23/ Al-Cu-Verbundmetall "Liotal", Werkstoffblatt Nr. B 502 A III 457 CA, VDM Frankfurt/M
- /24/ Sellmaier, A. und W. Straß: Versuchsanlage mit Helium-Entspannungsturbinen zur Kälteerzeugung bei sehr tiefen Temperaturen, Linde Bericht aus Wissenschaft und Technik, 17, 7 (1964)
- /25/ Maucher, E. und A. Rahn: Unveröffentlicht

- /26/ Gehm, K.-H.: Gutachten über die elektrische Anlage der "Kalten Neutronenquelle" des Projektes FR2/16 der Gesellschaft für Kernforschung, Abt. RB auf Explosionsschutz gemäß VDE 0171/2.65, PTB Nr. III B/E-16 576 U, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (1967), (nicht veröffentlicht)
- /27/ Maucher, E.: Unveröffentlicht
- /28/ Meißner, H. und W. Schilling: Eine einfache Methode zum Nachweis ausgefrorener Luft an gekühlten Flächen, Kerntechnik, 5, 252 (1963)
- /29/ Spath, F.: Unveröffentlicht
- /30/ Klipping, G. und W. Mascher: Vakuumerzeugung durch Kondensation an tiefgekühlten Flächen.
I. Kryopumpen, Vakuum-Technik, 11, 81 (1962)
- /31/ Bewilogua, L.: Kryopumpen, Kältetechnik-Klimatisierung, 19, 162 (1967)
- /32/ Gmelin: Handbuch der anorganischen Chemie, System Nr. 3, 0 (Sauerstoff), Lfg. 1-3, S. 694
- /33/ Cottrell, W.B.: Ozone Explosion in Irradiated Cryogenic Apparatus and Implications upon N.S. Savannah Gaseous Waste Disposal System. ORNL CF-58-7-97 (1958)
- /34/ Coltmann, R.R. et al.: Technology and Equipment Utilized in Low Temperature Reaktor Irradiation, Rev. of Sc. Instr., 28, 375, (1957)
- /35/ Marfaing, R.: Dispositif d'Irradiation dans l'Azote Liquide pour la Pile Ulysse. Rapport, présenté à EURATOM, Karlsruhe (Fevrier 1965)
- /36/ Heyne, L.: Die Sauerstoffkonzentration in Stickstoffkryostaten für Reaktorsbestrahlung, Bericht ZfK-WF 11 (1962)
- /37/ Leiling, W.: Unveröffentlicht
- /38/ Katheder, H.: Unveröffentlicht

- /39/ Nabert, K. und G. Schön: Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe, 2. Aufl., Erich Verlag GmbH, Berlin (1963)
- /40/ Freytag, H.H.: Handbuch der Raumexplosionen, Verlag Chemie Weinheim (1965)
- /41/ Richtlinien zur Verhütung von Gefahren durch elektrostatische Aufladungen, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (1966)
- /42/ Rahn, A.: Unveröffentlicht
- /43/ Hagen, S.: Unveröffentlicht
- /44/ Strahlenschutzregelung für das Kernforschungszentrum Karlsruhe, Stand 1.4.1963
- /45/ Comper, W.: Unveröffentlicht
- /46/ Radiation Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Problems, ICRP-Publication 2, Report of Committee II, Pergamon Press, New York (1959)
- /47/ Cassut, L.H.: Experimental Investigation of Detonation in Unconfined Gaseous Hydrogen-Oxygen-Nitrogen Mixtures, A.D. Little Inc., ARS-Journal, S. 1122 (August 1961)
- /48/ Schardin, H. et al.: Wirkungen von Spreng- und Atombomben auf Bauwerke, Zeitschr. Ziviler Luftschutz, H. 12, S. 283 (1954)
- /49/ Festigkeitsberechnung der Stahlrotunde des Forschungsreaktors FR2 in Karlsruhe für Explosionslastfälle, Dingler-Werke, Zweibrücken, (Mai 1967), (nicht veröffentlicht)
- /50/ Brymner, R. and W. Steckelmacher: Demountable Vacuum Seal for Operation at Temperatures from -180°C to 800°C , Journal of Sc. Instr., 36 278 (1956)
- /51/ Katheder, H. und Heine: Unveröffentlicht
- /52/ Haffner, H., H.Kapulla, H. Oehme, F.Spath: Die Kalte Neutronenquelle für den Reaktor FR2, RB-Bericht Nr. 1/1965, Vortrag auf der 9. Sitzung der Euratom-Arbeitsgruppe "Bestrahlungseinrichtungen" am 18./19.2.1965 im Kernforschungszentrum Karlsruhe.

9. Abbildungen

- Abb. 1 Vergleich Kalter Neutronenquellen
- Abb. 2 Maxwell-Verteilungen des Neutronenflusses bei verschiedenen Moderator-
temperaturen /9/
- Abb. 3 Streuquerschnitte von Materialien für Neutronenfilter
- Abb. 4 Blockschaltbild der Kalten Neutronenquelle am FR2
- Abb. 5 Fließschema der Gesamtanlage
- Abb. 6 Anordnung der Kalten Quelle am FR2 mit Core-Querschnitt
- Abb. 7 Aufstellungsplan zur Kalten Neutronenquelle am FR2
- Abb. 8 Schematischer Aufbau des Strahlrohrpfropfens
- Abb. 9 Corenaher Teil des Strahlrohrpfropfens
- Abb. 10 H₂-Moderatorkammer
- Abb. 11 Schema der Helium-Kälteanlage
- Abb. 12 T, s - Diagramme zur Helium Kälteanlage
- Abb. 13 Alarmstellenverzeichnis
- Abb. 14 Sicherheitseinrichtungen
- Abb. 15 Festigkeit des Druckrohres. Vergleich mit den Ergebnissen der
Explosionsversuche

Abb.1 Vergleich Kalter Neutronenquellen

		EL 3 / 4,5/	DIDO /8,9/	FR 2	FRJ-2 /11/
Reaktor	Typ	thermisch, D ₂ O-moderiert	thermisch, D ₂ O-moderiert	thermisch, D ₂ O-moderiert	thermisch, D ₂ O-moderiert
	Thermische Leistung (MW)	17,5	15	44	10
	Lage der Kalten Quelle	Reflektorkanal	Reflektorkanal	Reflektorkanal	Reflektorkanal
	Thermischer Fluß an der Moderatorkammer (n/cm ² s)	3 · 10 ¹³	4 · 10 ¹³	4,9 · 10 ¹³	8,9 · 10 ¹³
	Kälteanlage	H ₂ -Verflüssiger mit N ₂ -Vorkühlung	H ₂ -Verflüssiger mit N ₂ -Vorkühlung	He-Kälteanlage mit Expansions-turbinen	He-Kälteanlage mit Expansions-turbinen
Kalte Quelle	Moderator	H ₂ + D ₂	H ₂	H ₂	H ₂
	Moderatorkammer:				
	Durchmesser (mm)	106	76	86	145
	Moderatorschichtdicke (mm)	74	30	45	52
	Volumen (cm ³)	500	ca. 200	240	ca. 1000
	Werkstoff	Al 99,5	MgZr-Leg (Zw1)	AlMn	AlMg 3
	Nukleare Aufheizung :	(bei 15 MW)			
	im Wasserstoff (W/g)	1,23 ¹⁾	0,75 ¹⁾	0,91 ²⁾	1,95
	im Werkstoff (W/g)	0,14 ¹⁾	0,2 ¹⁾	0,18 ²⁾	0,47
	Abzuführende Wärme (W)	54	42	ca. 60	ca. 550
	Prinzip der Wärmeabfuhr	Verdampfung des H ₂	Wärmeübertragung	Wärmeübertragung, Wärmeleitung, Kondensation	Wärmeübertragung, Wärmeleitung, Verdampfung, ³⁾

1) Diese Werte wurden aus Literaturangaben /5, 9/ ermittelt

2) Werte mit vor dem R₃-Kanal eingesetztem BE 60/14, vergl./52 /

3) Die Wärmeübertragung vom H₂ auf das Kühlhelium geschieht in einem besonderen Kondensatortopf.

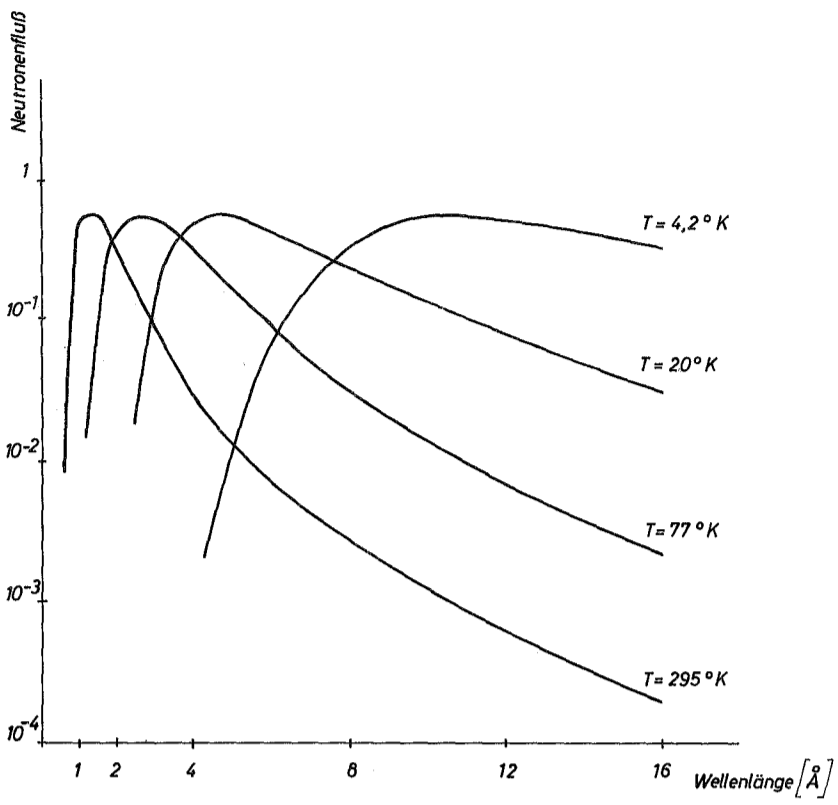


Abb. 2 Maxwell-Verteilungen des Neutronenflusses bei verschiedenen Moderator-temperaturen.

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Abt. Reaktorbetrieb, Proj. 16

(RB-Z. Nr. P016-0-6-2)

Sept. 67 Jb. 68

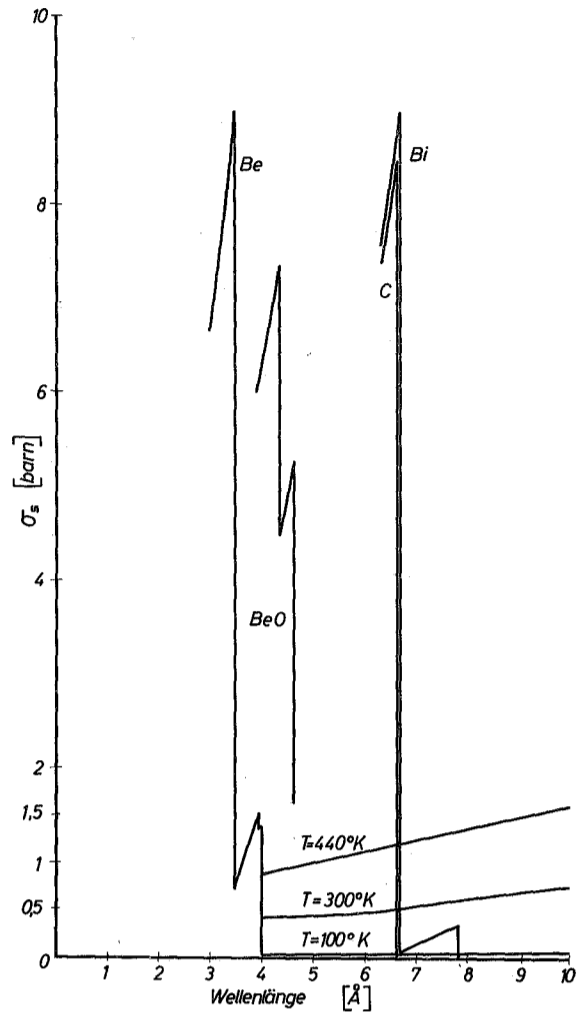


Abb. 3 Streuquerschnitte von Materialien für Neutronenfilter /12/.

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Abt. Reaktorbetrieb, Proj. 16

(RB-Z. Nr. P016-0-6-3)

Sept. 67 Jb. 68

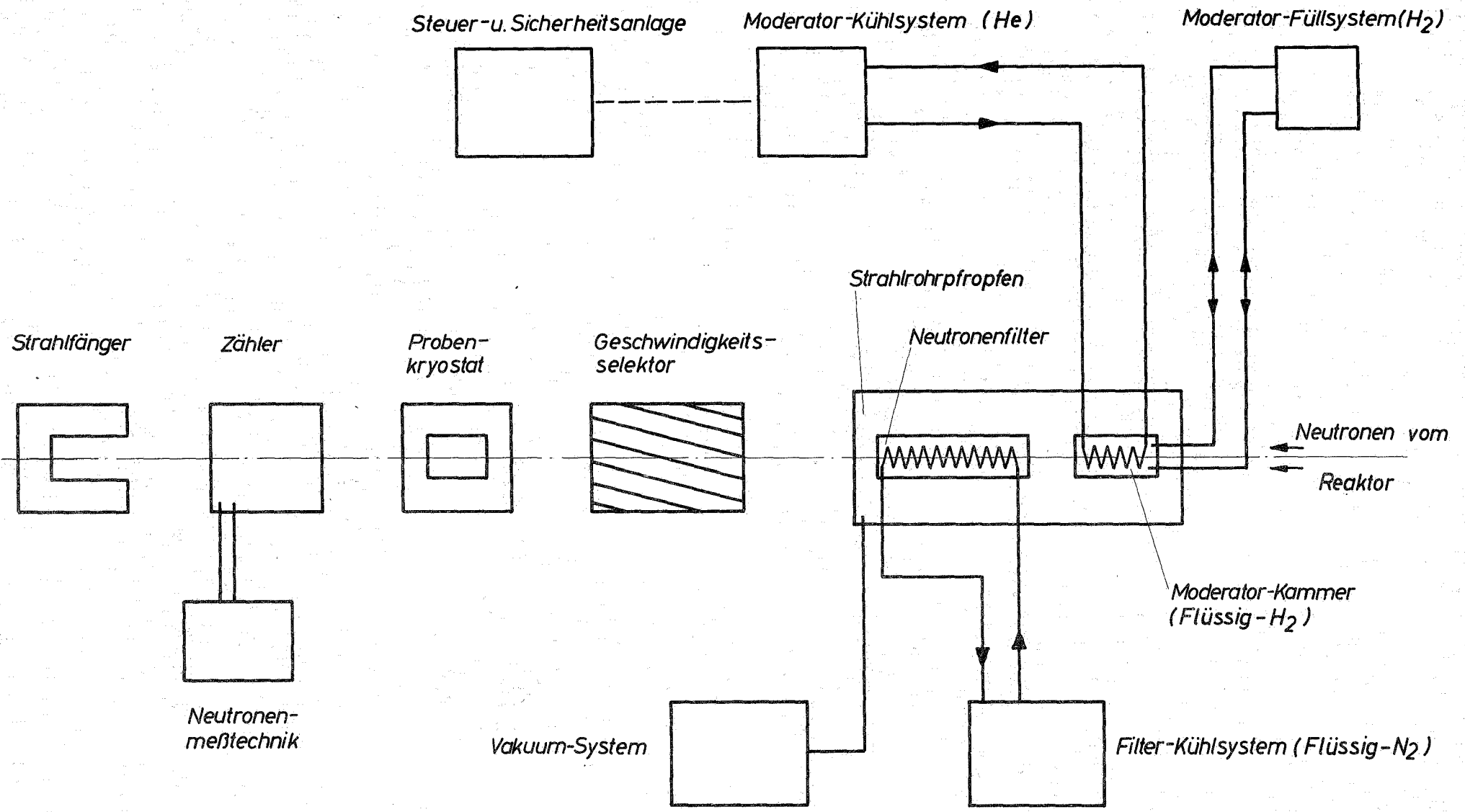
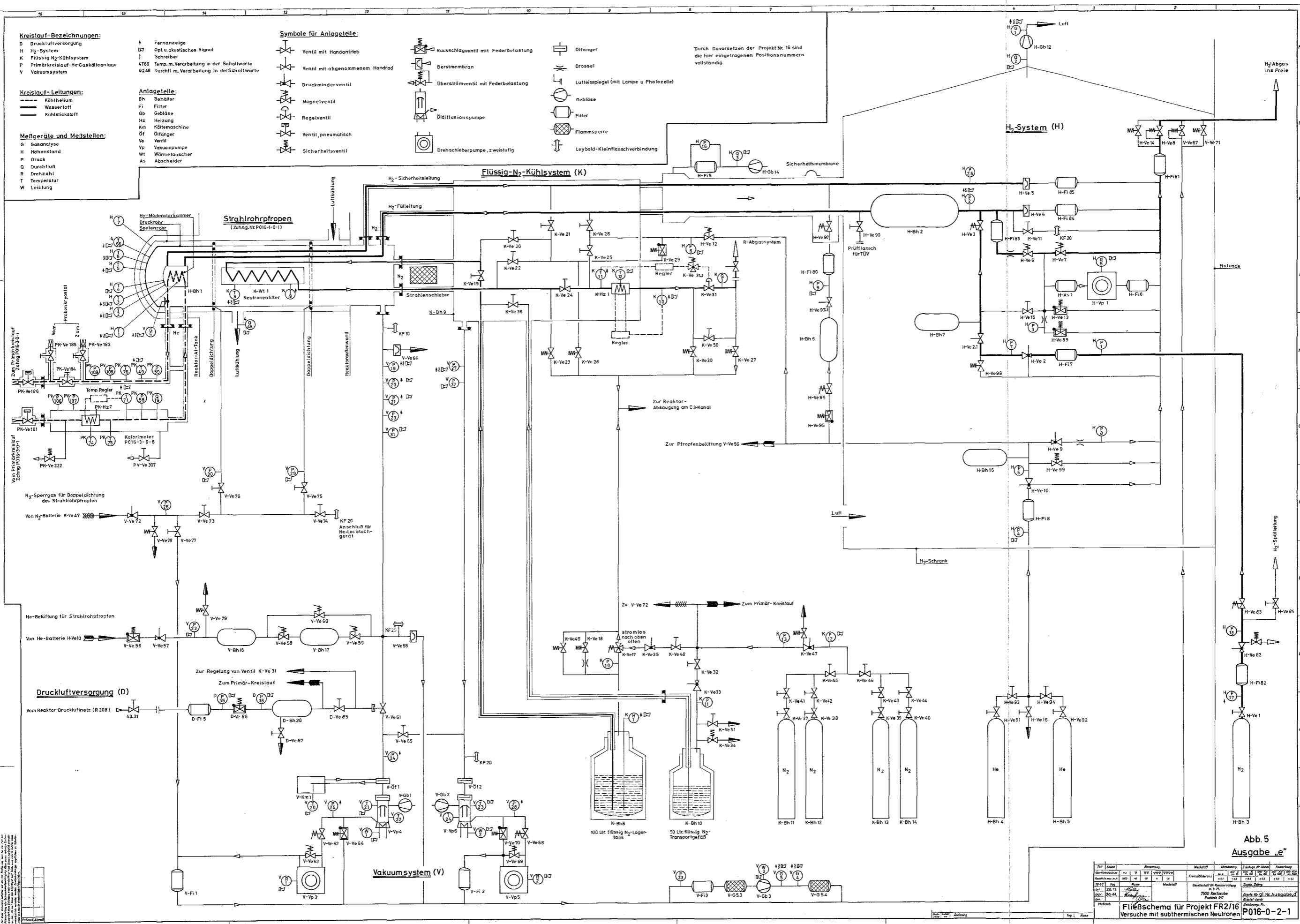


Abb. 4 Blockschnittbild der Kalten Neutronenquelle am FR2

Kernforschungszentrum Karlsruhe
 Abl. Reaktorbetrieb, Proj. 16

(RB-Z.Nr. P016-0-6-4)

Sept. 67 Jülich



- Kreislauf-Bezeichnungen:**
- D Druckluftversorgung
 - H H₂-System
 - K Flüssig N₂-Kühlsystem
 - P Primärkreislauf-He-Gaskälteanlage
 - V Vakuumsystem
- Kreislauf-Leitungen:**
- Kühlluft
 - Wasserluft
 - Kühllaststoff
- Meßgeräte und Meßstellen:**
- G Gasanalyse
 - H Höhenstand
 - P Druck
 - Q Durchfluß
 - R Drehzahl
 - T Temperatur
 - W Leistung
- Symbole für Anlagenteile:**
- Ventil mit Handantrieb
 - Ventil mit abgenommenem Handrad
 - Druckminderventil
 - Magnetventil
 - Regelventil
 - Ventil, pneumatisch
 - Sicherheitsventil
 - Rückschlagventil mit Federbelastung
 - Berstmembran
 - Überströmventil mit Federbelastung
 - Öldiffusionspumpe
 - Drehschiebepumpe, zweiseitig
 - Ölfänger
 - Drossel
 - Luftleispiegel (mit Lampe u. Photozelle)
 - Gebälse
 - Filter
 - Flamm Sperre
 - Leybold-Kleinflaschverbindung
- Anlagenteile:**
- Bh Behälter
 - Fi Filter
 - Gb Gebälse
 - HZ Heizung
 - Km Kältemaschine
 - Of Ölfänger
 - Ve Ventil
 - Vp Vakuumpumpe
 - Wt Wärmetauscher
 - As Abscheider
- Fernanzeige:**
- DZ Opt. akustisches Signal
 - Schreiber
 - 4766 Temp. Ver. in der Schaltwarte
 - 4Q48 Durchfl. Ver. in der Schaltwarte

Durch Davorsetzen der Projekt Nr. 16 sind die hier eingetragenen Positionsnummern vollständig.

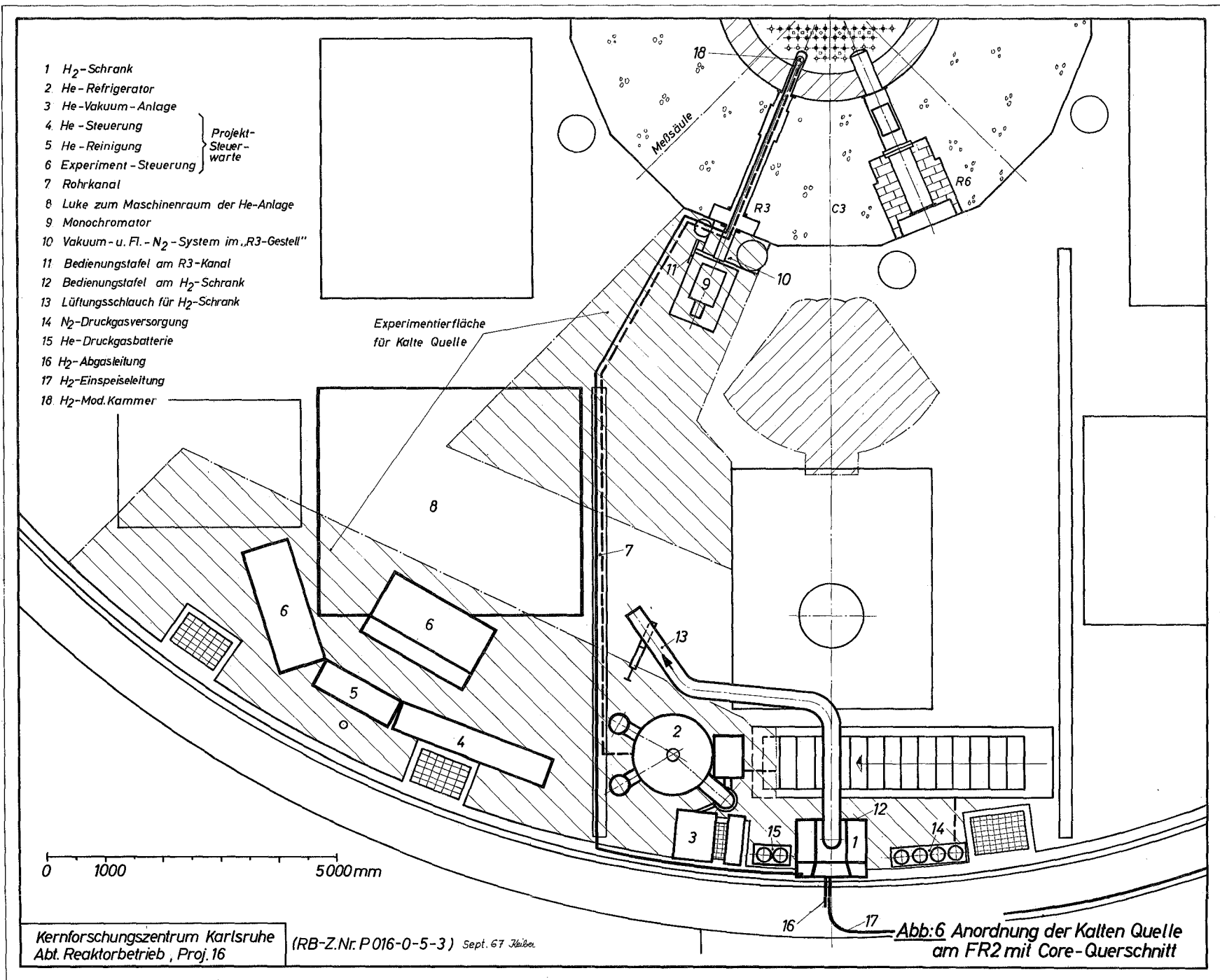
Abb. 5
Ausgabe „e“

Tag	Displ.	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zustand, Nr. Norm	Eintragung
19.11.50	100	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	100	100
19.11.50	101	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	101	101
19.11.50	102	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	102	102
19.11.50	103	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	103	103
19.11.50	104	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	104	104
19.11.50	105	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	105	105
19.11.50	106	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	106	106
19.11.50	107	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	107	107
19.11.50	108	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	108	108
19.11.50	109	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	109	109
19.11.50	110	Freiherren	St 3	100 x 100 x 10	110	110

7900 Korlarben
Pulver 90

Erste Nr. gl. Nr. Ausgabe
Einer durch
Zustimmung Nr.

Fließschema für Projekt FR2/16
Versuche mit subthermischen Neutronen P016-0-2-1



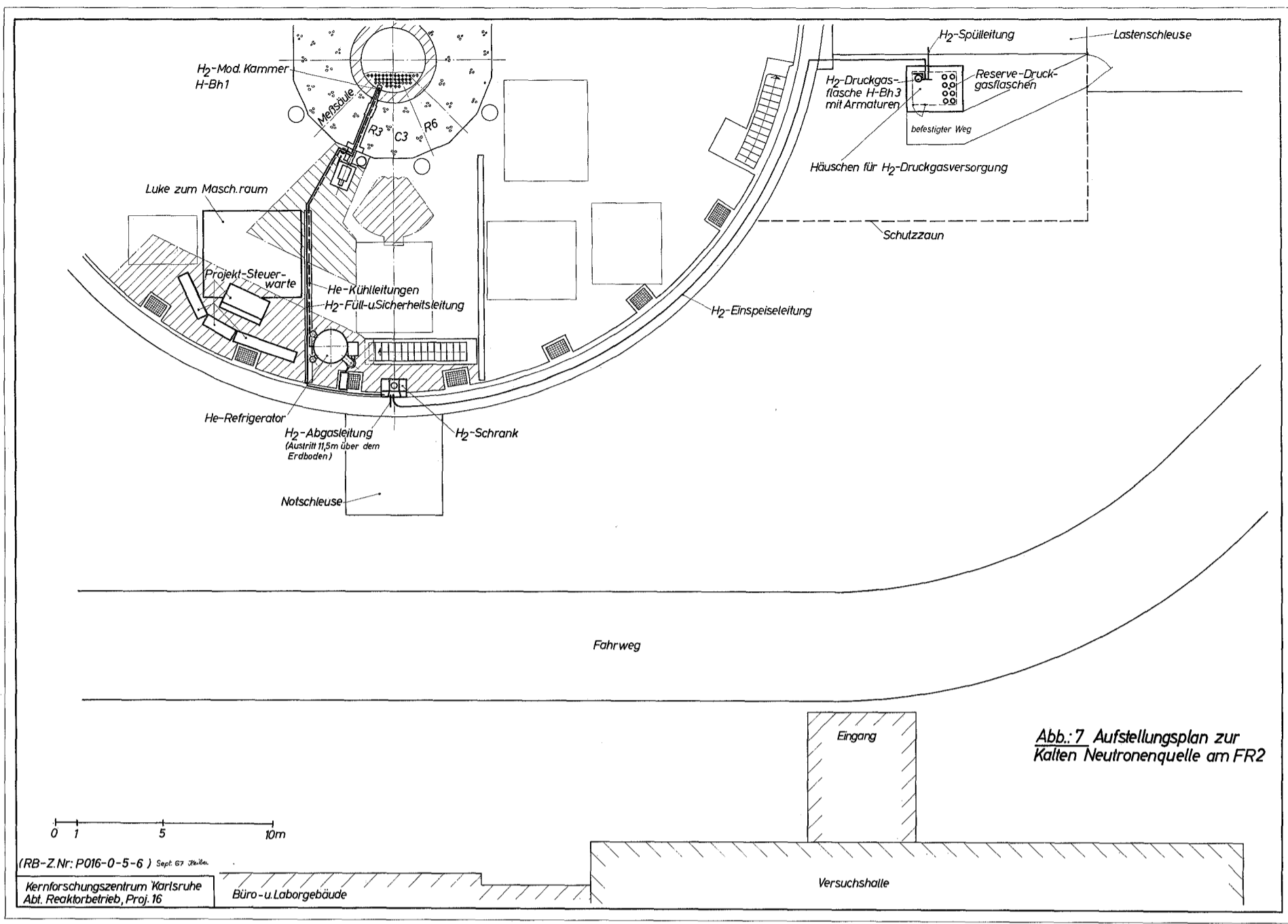


Abb.:7 Aufstellungsplan zur Kalten Neutronenquelle am FR2

(RB-Z.Nr: P016-0-5-6) Sept. 67 26.10.67
 Kernforschungszentrum Karlsruhe
 Abt. Reaktorbetrieb, Proj. 16

Büro- u. Laborgebäude

Versuchshalle

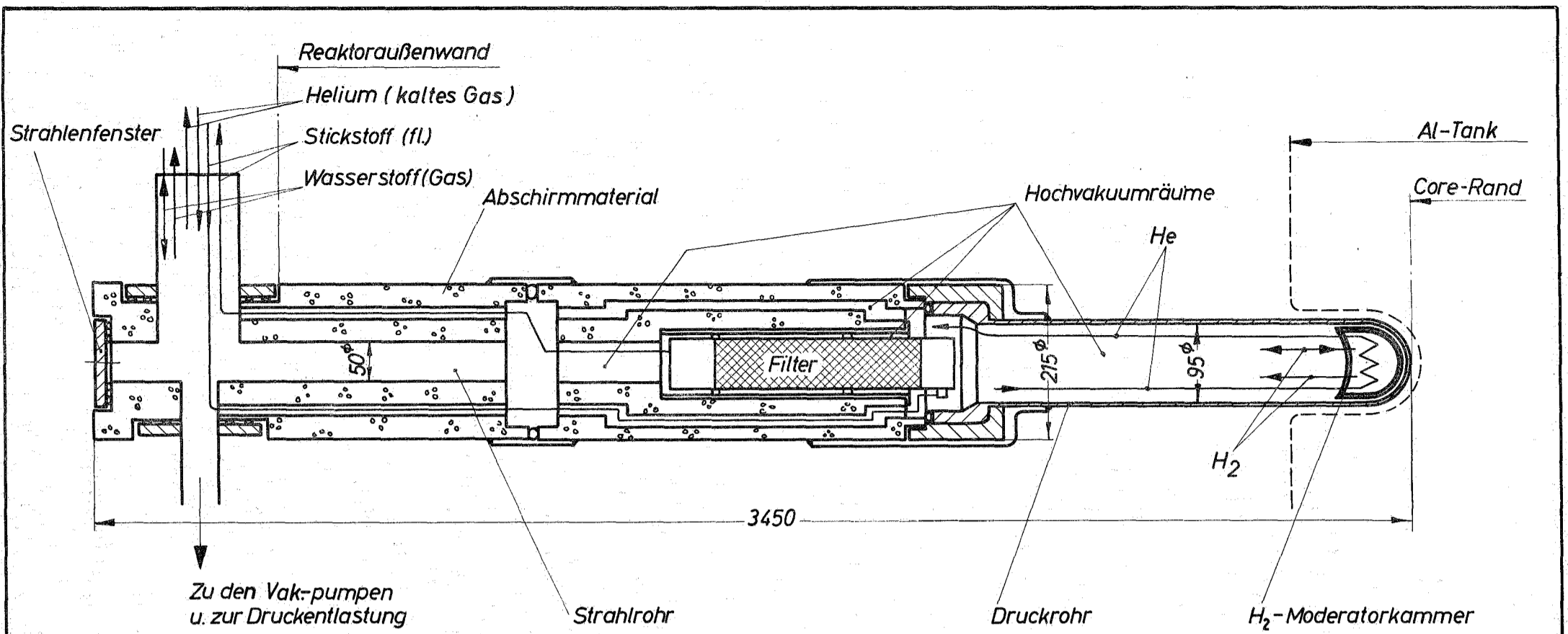


Abb. 8 Schematischer Aufbau des Strahlrohrpfpfens

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Abt. Reaktorbetrieb, Proj. 16

(RB-Z.Nr. P016-0-6-5)

Sept. 67 Heiler

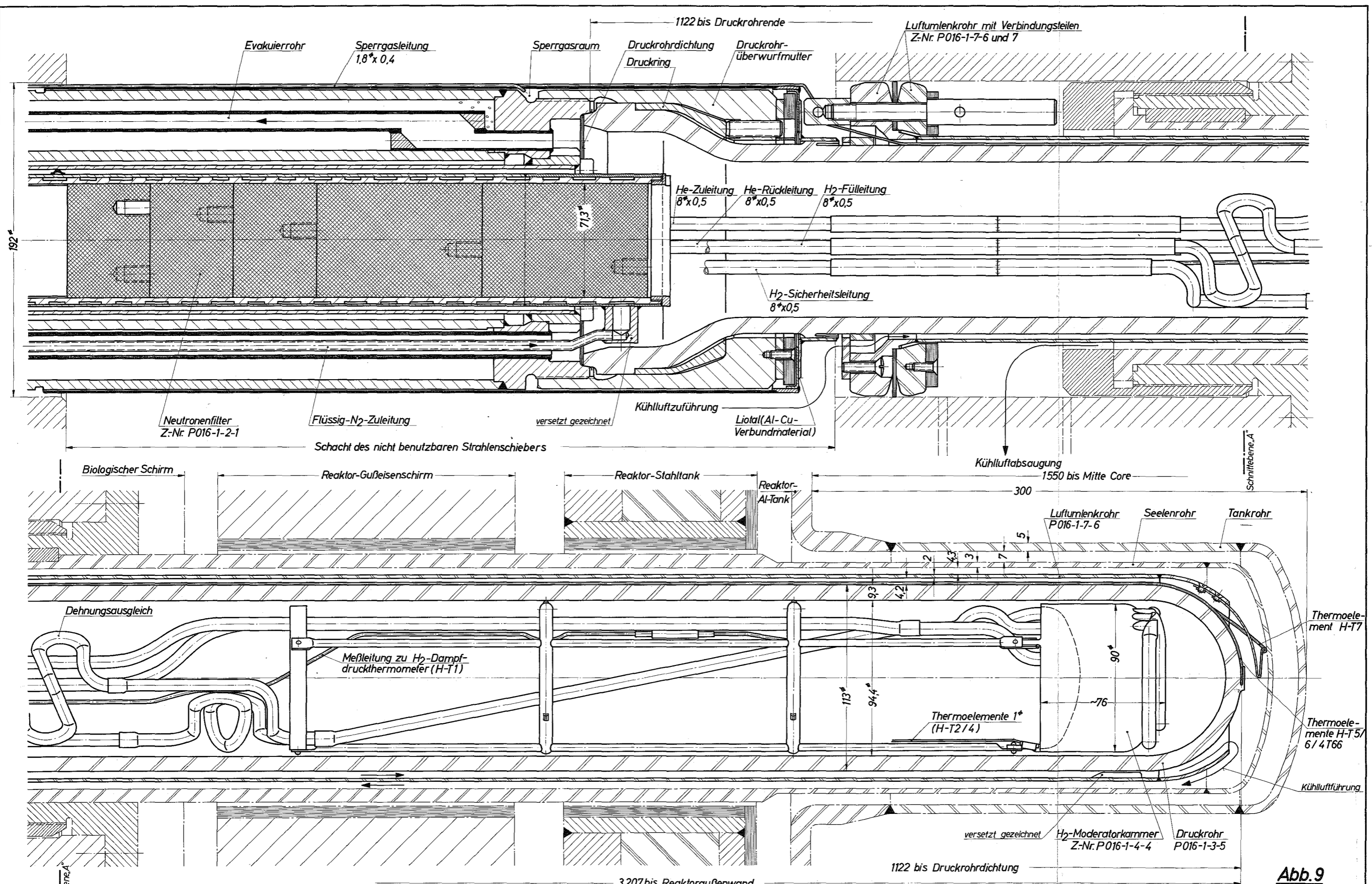
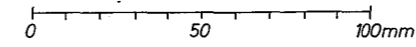


Abb. 9

1967 gez. gpr.	Datum 11.7. 1977	Name Johel Jandl	Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe Reaktorbetrieb	Z.-Nr. P016-1-0-8
1:1	Strahlrohrpfropfen (Zusammenstellung des corenahen Teils)		Zugeh. Z.-Nr. P016-1-2-1 P016-1-4-4 P016-1-3-1	



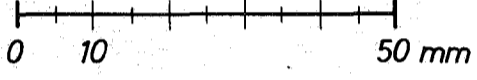
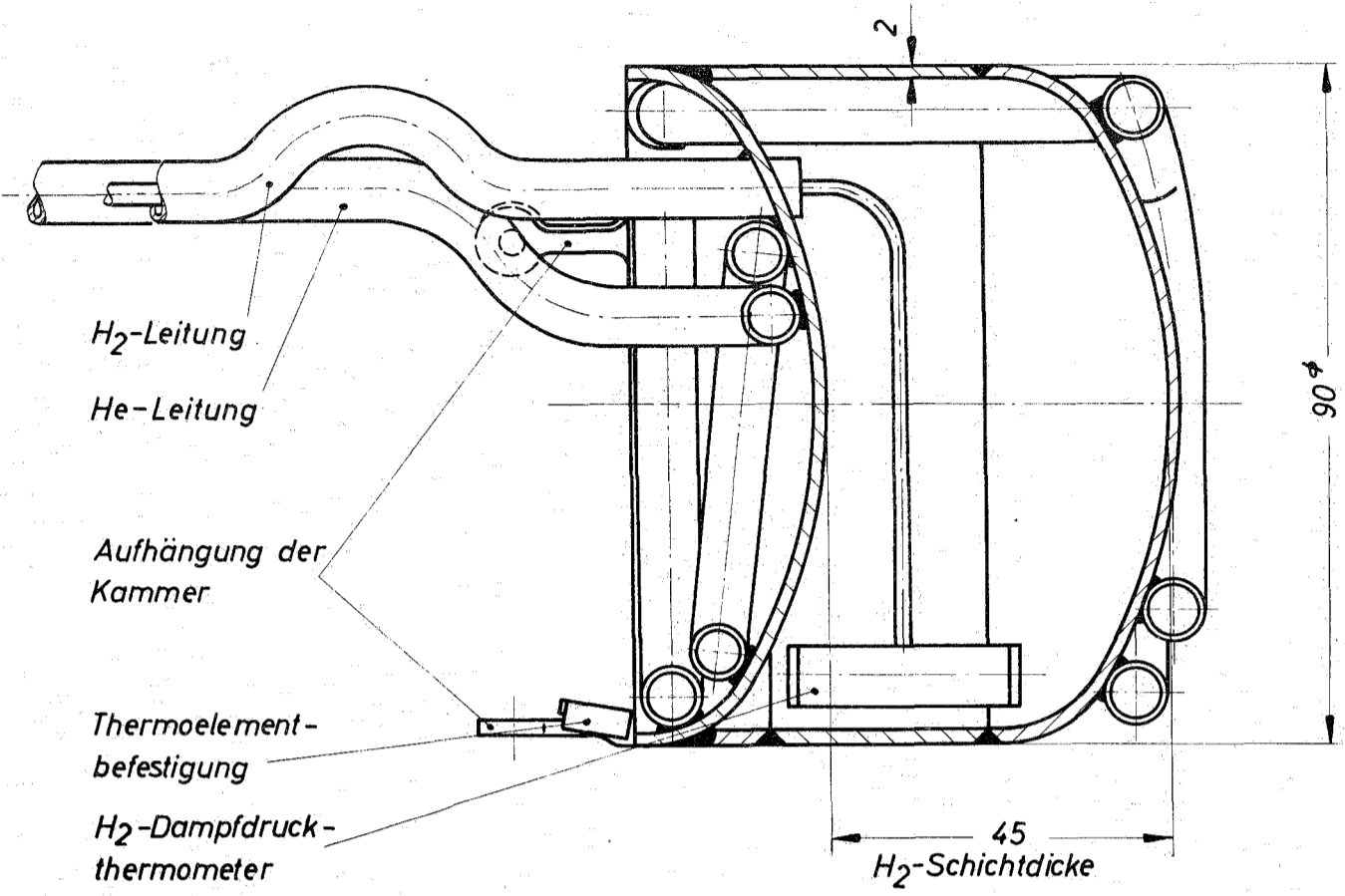
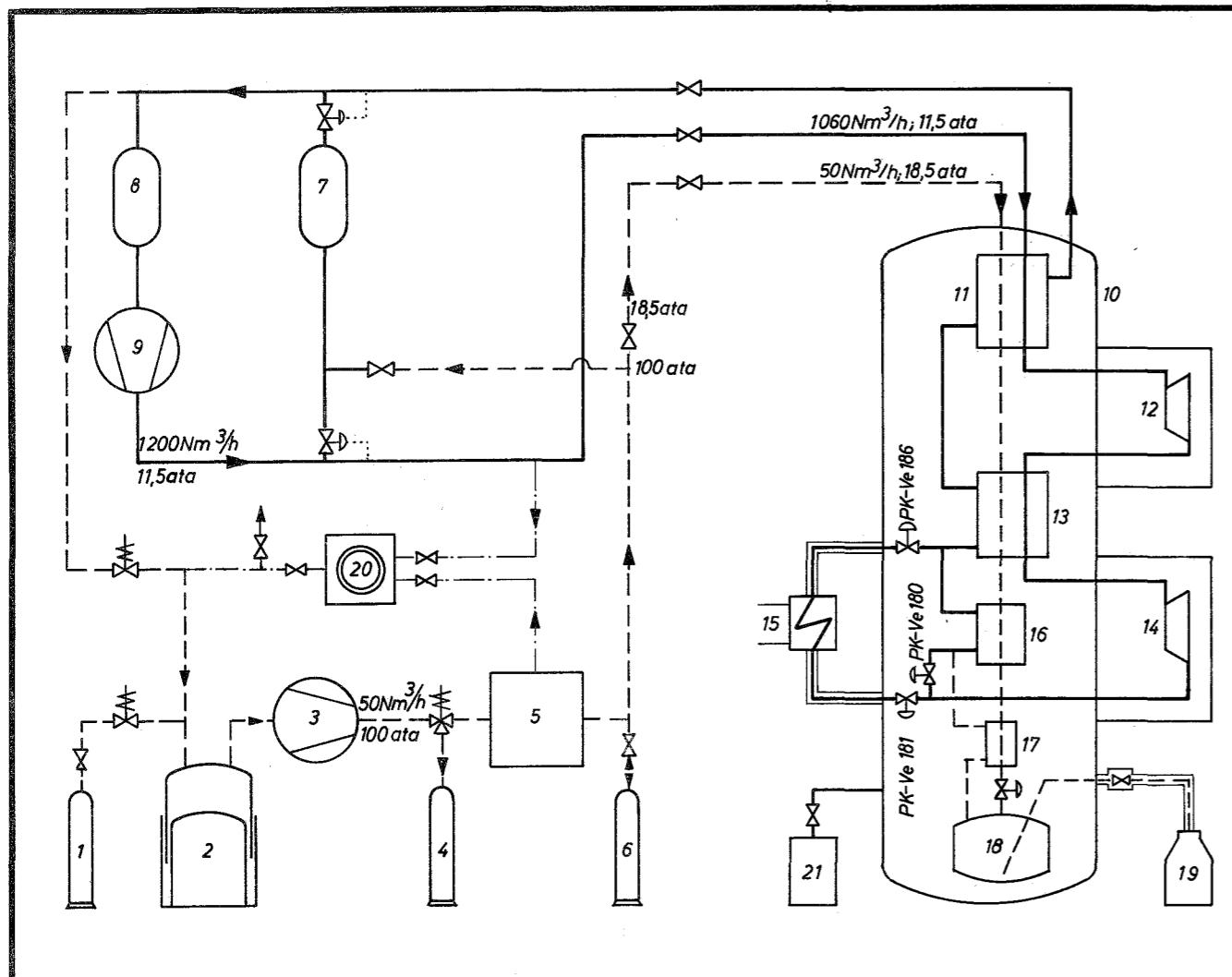


Abb. 10 H₂-Moderatorkammer

Kernforschungszentrum Karlsruhe
 Abt. Reaktorbetrieb, Proj. 16

(RB-Z Nr P016-0-6-6)

Sept. 67 Heiler



- | | |
|---|--|
| 1 Helium — Einspeisung | 11;13;16;17 Wärmetauscher |
| 2 Öl — Gasometer (2m ³) | 12;14 Expansionssturbinen |
| 3 vierstufiger luftgekühlter Hochdruckkompressor (50 Nm ³ /h von 1 auf 100 ata) | 15 Verbraucher (H ₂ -Moderatorkammer H-Bh1) |
| 4 10 He — Druckgasflaschen (unrein) | 18 Sammelgefäß für flüssiges Helium (75l) |
| 5 Reiniger mit 2 Tieftemperaturadsorbentien | 19 Transportbehälter für flüssiges Helium |
| 6 6 He — Druckgasflaschen (rein) | 20 Vakuumpumpe zur Evakuierung der Kreisläufe und Reiniger (Regenerierung) |
| 7 Mitteldruckpuffer (2m ³) | 21 Hochvakuumzustand |
| 8 Niederdruckpuffer (2m ³) | |
| 9 dreistufiger ölfreier Teflon — Kolbenkompressor (1200 Nm ³ /h von 1 auf 11,5ata) | |
| 10 Vakuumbehälter | |

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Abt. Reaktorbetrieb, Proj. 16

(RB-Z.Nr. P 016-0-6-7) Sept 67 Jb/Lea

Abb.11 Schema der He-Kälteanlage
(vereinfacht dargestellt)

[°K]

300
200
100
50
20
10
5

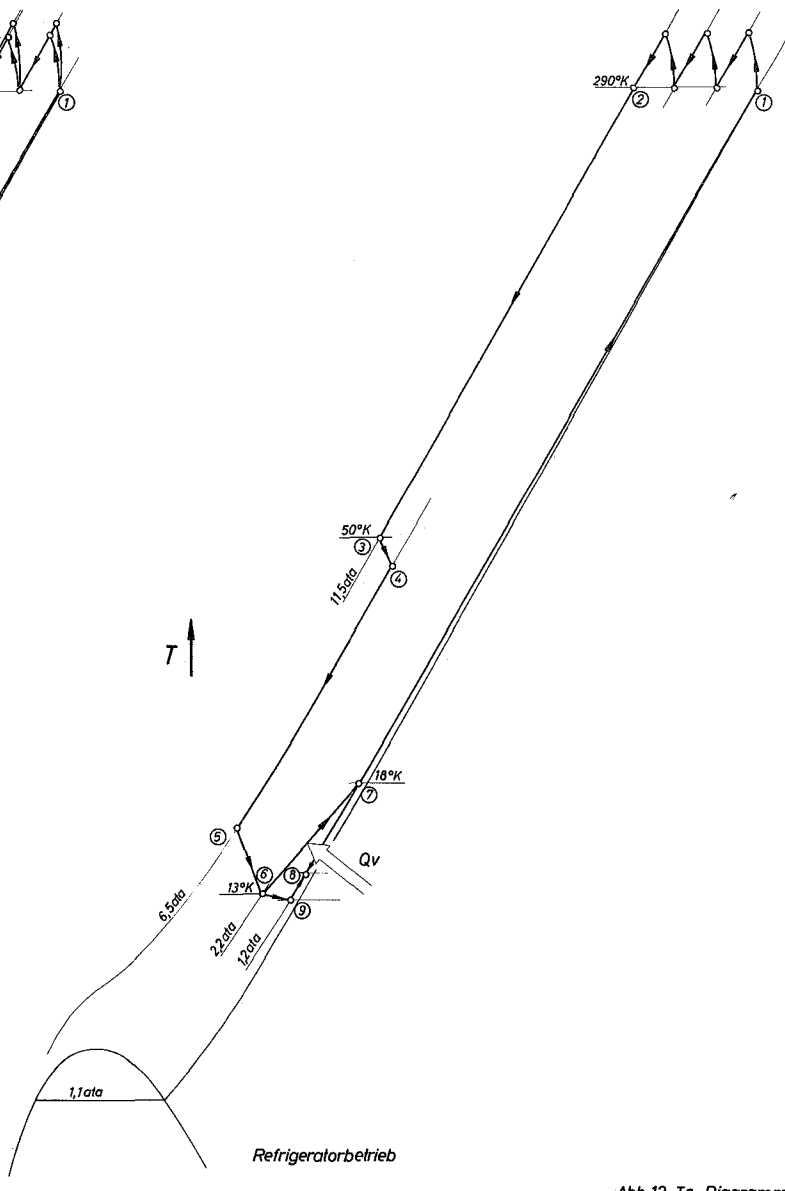
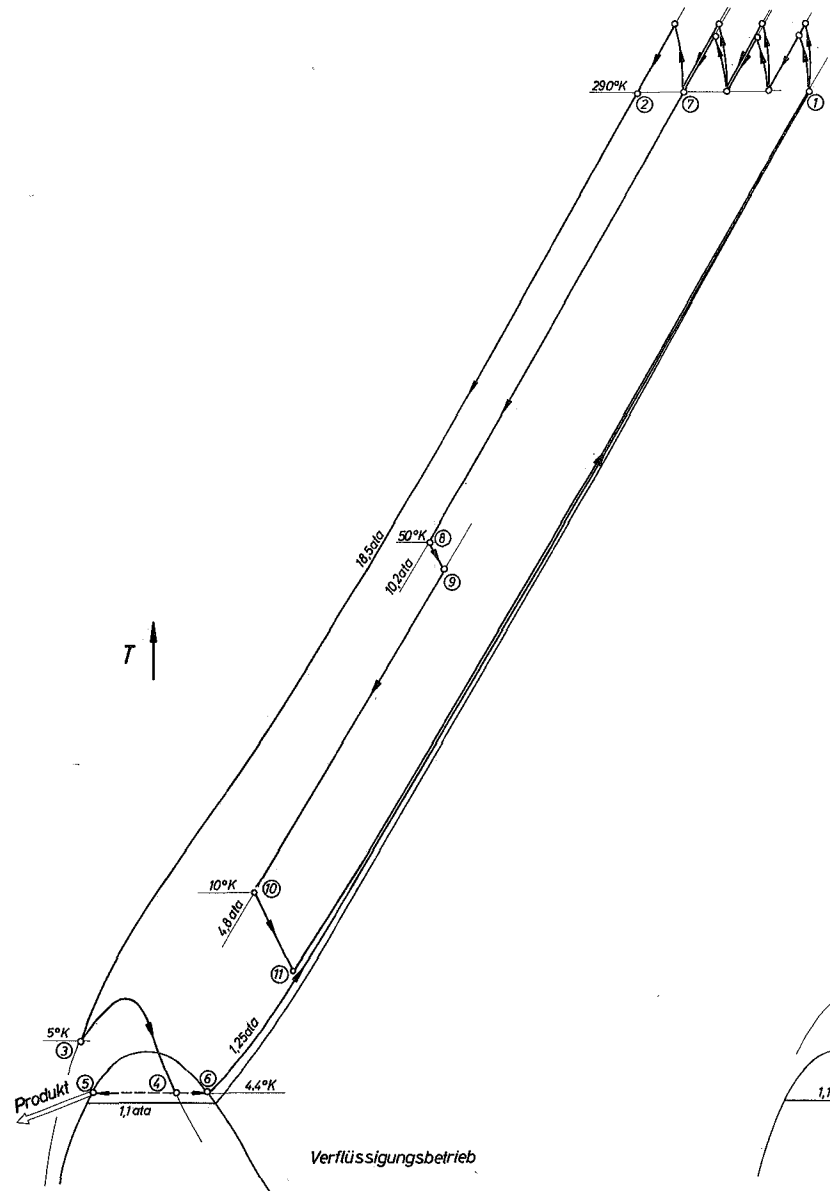


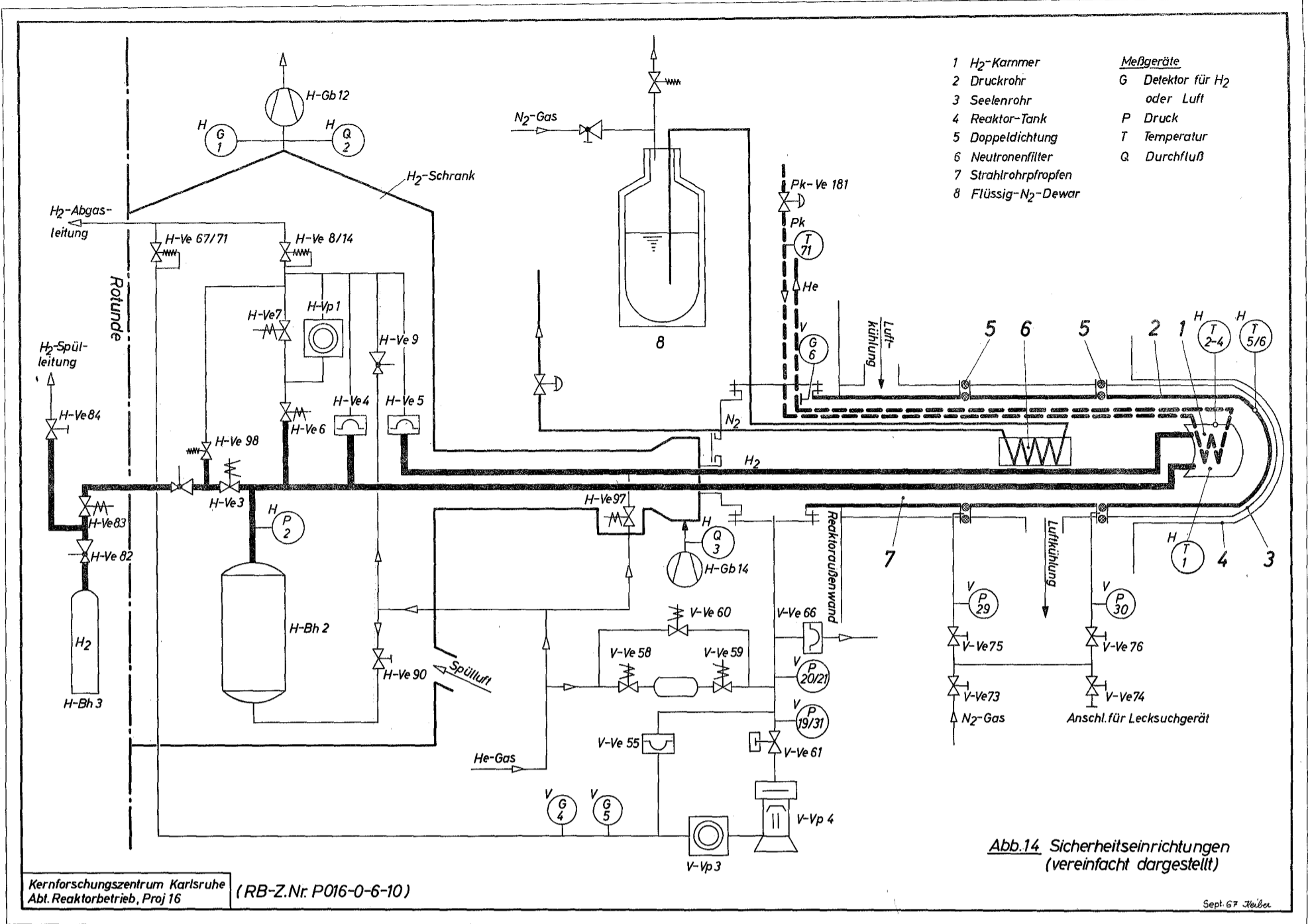
Abb.12 T,s-Diagramme zur He-Kälteanlage

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Abt. Reaktorbetrieb, Proj. 16

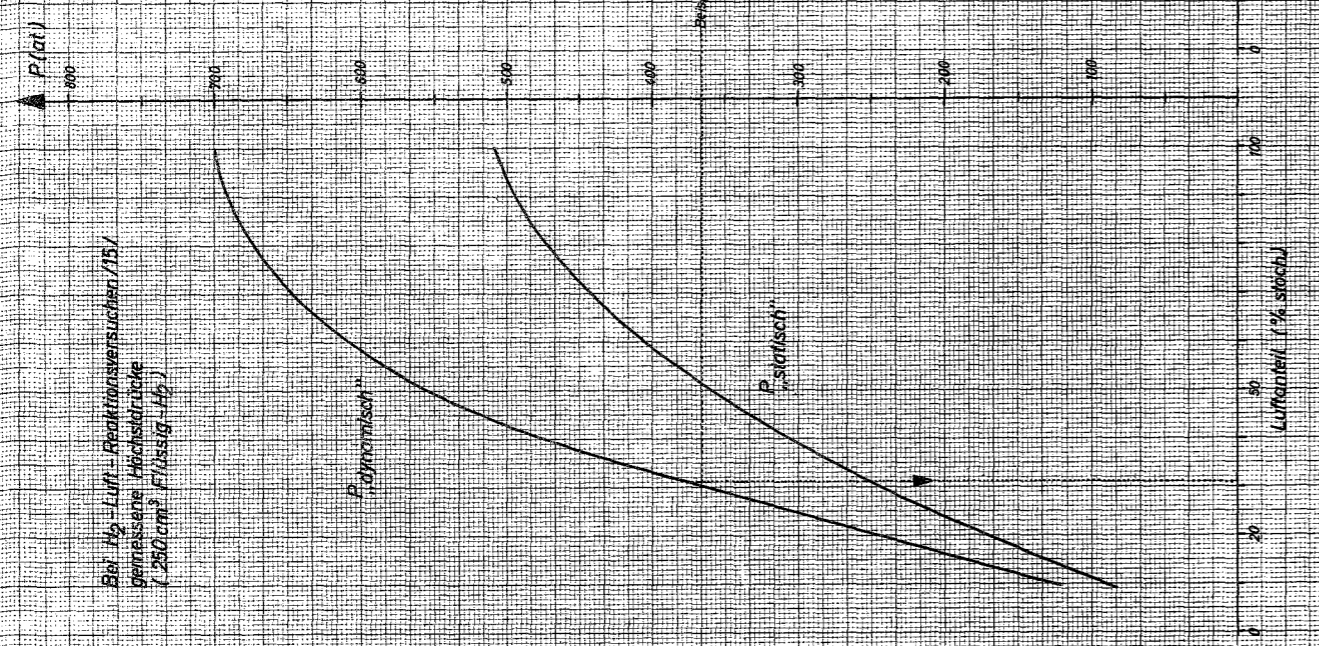
(RB-Z.Nr. P016-0-6-8) Sept. 67 36/86

Meßgröße	Pos.-Nr.	Gerät	Meßstelle	Grenzwert	Stör-signal	mögl. Ursache	Maßnahme, Schaltbefehl, Bemerkungen
<u>H₂-System (H)</u>							
H ₂ -Anteil	H-G1	H ₂ -Detektor	H ₂ -Schrank	G > 0,5 % H ₂ in Luft	X	Leck im H ₂ -System	H ₂ -Evakuierung (Programm siehe 5.1.)
				G > 3,0 % H ₂ in Luft	X	Leck im H ₂ -System	H-G1 (Meßkopf) aus
H ₂ -Systemdruck	H-P2	Manometer mit Ferngeber	Pufferbehälter H-Bh2	P < 20 Torr		H ₂ -System ist evakuiert	H-Ve3 kann geöffnet werden
				P > 4 atü		H ₂ -System gefüllt	H-Ve83 und H-Ve3 zu
				P > 4,2 atü	X	Ventil undicht	H ₂ -Evakuierung
				P > 3,4 atü	X	He im H ₂ bei kalter Kammer	Betriebsdruck: warm 4,0 atü, kalt 3,2 atü
				P < 3,0 atü	X	Leck im kalten H ₂ -System	H ₂ -Evakuierung
				P < 380 Torr	X	Evakuierung	Reaktorschnellschluß, falls H ₂ -Evakuierung defekt (siehe 5.1)
He-Gasdruck	H-P4	Kontaktmanometer	He-Flaschenbatterie	P < 20 atü	X	Gas-Entnahme	umschalten auf H-Bh4 bzw. H-Bh5
	H-P6	Druckschalter	He-Sperrgasleitung	P > 4,5 atü		Sperrgasdruck erreicht	H-Ve12 zu
				P < 4,2 atü	X	Ventil undicht	H-Ve12 auf, H-Ve3 und 83 zu
	H-P9	Druckschalter	He-Puffer H-Bh6	P > 4,0 atü		Puffer gefüllt	H-Ve96 zu
				P < 3,7 atü	X	Einspeisung ins H ₂ -System	H-Ve96 auf, H-Ve3 und 83 zu
H ₂ -Temperatur	H-T1	H ₂ -Dampfdruckthermometer	Moderatorkammer	T > 27 ⁰ K	X	Regelverhalten der He-Anlage	He-Anlage von Hand nachregeln
				T < 20 ⁰ K	X	Reaktor abgestellt	He-Anlage von Hand nachregeln
Wandtemperatur H-Bh1	H-T2	Thermoelement	Moderatorkammer	T < 120 ⁰ K	X	großer N ₂ -Durchsatz	bei Betrieb ohne H ₂ : K-Ve31 zu
	H-T3	Thermoelement	Moderatorkammer	T > 85 ⁰ C	X	Ausfall der He-Kühlung	Pfropfenbelüftung mit He
				T > 100 ⁰ C	X	Pfropfenbelüftung nicht erfolgt	H ₂ -Evakuierung, V-Ve61 zu, V-Ve60 auf, V-Vp3/4 aus
	H-T4	Thermoelement	Moderatorkammer	T > 85 ⁰ C	X	Ausfall der He-Kühlung	Pfropfenbelüftung mit He
				T > 110 ⁰ C	X	Pfropfenbelüftung nicht erfolgt	H ₂ -Evakuierung, Reaktorschnellschluß
Druckrohrtemperatur	H-T5	Thermoelement	Druckrohr	T > 80 ⁰ C	X	Luftkühlung ausgefallen	
				T > 90 ⁰ C	X	Luftkühlung ausgefallen	H ₂ -Evakuierung
	H-T6	Thermoelement	Druckrohr	T > 80 ⁰ C	X	Luftkühlung ausgefallen	
				T > 90 ⁰ C	X	Luftkühlung ausgefallen	H ₂ -Evakuierung
	4-T66	Thermoelement	Druckrohr	T > 100 ⁰ C	X	Luftkühlung ausgefallen	Reaktorschnellschluß
Kühlluftdurchsatz	4-Q48	Normblende	R3-Kanal	Q < 300 m ³ /h	X	Luftkühlung ausgefallen	bei 4-T66 90 ⁰ C Reaktor von Hand abschalten
Drehzahl	H-R5	Drehzahlwächter	Pumpe H-Vp1	R < 400 U/min	X	Motor ausgefallen	H-Vp1 aus, H-Ve7 auf
Durchfluß	H-Q2	Strömungswächter	Ventilator H-Gb12	Q < 0,7 Q ₀	X	Motor ausgefallen	} Prüfen ob Luftströmung vorhanden, bei Verneinung H ₂ -Evakuierung von Hand einleiten
Durchfluß	H-Q3	Strömungswächter	Gebläse H-Gb14	Q < 0,7 Q ₀	X	Motor ausgefallen	
<u>Vakuumsystem (V)</u>							
H ₂ -Anteil	V-G4	H ₂ -Detektor	Abgasleitung	G > 0,5 % H ₂ in Luft	X	H ₂ -Leck im Pfropfen	H ₂ -Evakuierung
				G > 3 % H ₂ in Luft	X	H ₂ -Leck im Pfropfen	V-G4 (Meßkopf) aus
	V-G5	H ₂ -Detektor	Abgasleitung	G > 0,5 % H ₂ in Luft oder N ₂	X	H ₂ -Leck im Pfropfen	H ₂ -Evakuierung
				G > 1 % H ₂ in Luft oder N ₂	X	H ₂ -Leck im Pfropfen	V-G5 aus
Pfropfenleckage	V-G6	Lufteisdetektor	Pfropfen-Vakuum-Raum	50 % Vollausschlag	X	Leck in den Vakuumraum	
				100% Vollausschlag	X	Leck in den Vakuumraum	H ₂ -Evakuierung
Vakuum	V-P19	Balzers-Penning	Strahlrohrpfropfen	P > 2.10 ⁻⁵ Torr	X	Leck in den Vakuumraum	
				P > 5.10 ⁻³ Torr	X	Leck in den Vakuumraum	Selbstabschaltung V-P19
	V-P20	Edwards-Pirani	Strahlrohrpfropfen	P > 8.10 ⁻⁴ Torr	X	Leck in den Vakuumraum	
				P > 5.10 ⁻³ Torr	X	Leck in den Vakuumraum	H ₂ -Evakuierung, K-Ve31 zu
	V-P21	Edwards-Pirani	Strahlrohrpfropfen	P > 8.10 ⁻⁴ Torr	X	Leck in den Vakuumraum	
				P > 5.10 ⁻³ Torr	X	Leck in den Vakuumraum	H ₂ -Evakuierung, K-Ve 31 zu

Meßgröße	Pos.-Nr.	Gerät	Meßstelle	Grenzwert	Stör-signal	mögl. Ursache	Maßnahme, Schaltbefehl, Bemerkungen
Vakuum	V-P27	Edwards-Pirani	Ventilkasten K-Bh9	$P > 10^{-5}$ Torr	X	Leck in K-Bh9	H ₂ -Evakuierung; V-P19, 20, 21 und V-Vp4 aus V-P23, 24 und 25 aus V-P27, 28 und V-Vp6 aus V-Vp3 ein nicht mögl., kein autom. Abschalten von V-Vp3
	V-P31	Druckschalter	Pfropfenanschluß	$P > 1$ Torr	X	Leck in den Vakuumraum	
	V-P32	Druckschalter	Ventilkasten K-Bh9	$P > 70$ Torr	X	Leck in den Vakuumraum	
He-Gasdruck	V-P22	Druckschalter	He-Belüftung	$P < 0,08$ atü	X	He-Gasdruck zu gering	V-Vp3 ein nicht mögl., kein autom. Abschalten von V-Vp3
N ₂ -Gasdruck	V-P29	Druckschalter	Pfropfendichtung	$P < 0,25$ atü	X	Leck an den Pfropfen- doppeldichtungen	
	V-P30	Druckschalter	Pfropfendichtung	$P < 0,25$ atü	X		
Drehzahl	V-R1	Drehzahlwächter	Vorpumpe V-Vp3	$R < 400$ U/min	X	Motor ausgefallen	V-Ve61 und 62 zu, V-Vp3 und 4 aus, verzög. V-Ve63 auf V-Ve68 zu, verzög. V-Ve69 auf, V-Vp5 und 6 aus
	V-R2	Drehzahlwächter	Vorpumpe V-Vp5	$R < 400$ U/min	X	Motor ausgefallen	
Temperatur	V-T20	Thermoschalter	Kältemasch. V-Km1	$T > -30^{\circ}\text{C}$	X	V-Km1 defekt	V-Vp4 aus Lüfter V-Gb1 ein V-Vp6 aus Lüfter V-Gb2 ein
	V-T21	Thermoschalter	V-Vp4 (oben)	$T > 90^{\circ}\text{C}$	X	V-Gb1 defekt	
	V-T22	Thermoschalter	V-Vp4 (unten)	$T > 50^{\circ}\text{C}$		Heizung in Betrieb	
	V-T23	Thermoschalter	V-Vp6 (oben)	$T > 90^{\circ}\text{C}$	X	V-Gb1 defekt	
Heiz-Leistung	V-T24	Thermoschalter	V-Vp6 (unten)	$T > 50^{\circ}\text{C}$		Heizung in Betrieb	
	V-W1	Stromrelais	Heizung V-Vp4	$J < 0,6 \cdot J_N$	X	Heizung defekt	
	V-W2	Stromrelais	Heizung V-Vp6	$J < 0,6 \cdot J_N$	X	Heizung defekt	
	V-W3	Stromrelais	Gebälse V-Gb3	$J < 0,6 \cdot J_N$	X	Gebälse defekt	V-Gb3 aus
Kühlsystem (K)							
Höhenstand	K-H1	Silometer SM3A	N ₂ -Tank K-Bh8	$H < 20\%$ $H > 90\%$	X	Flüssig-N ₂ -Verbrauch	K-Bh8 nachfüllen von Hand von Hand K-Ve36 und K-Ve32 zu, K-Ve51 auf K-Ve17 auf K-Ve17 zu
N ₂ -Druck	K-P10	Druckschalter	N ₂ -Tank K-Bh8	$P > 0,4$ atü $P < 0,3$ atü	X	N ₂ -Tank voll Auffüllen mittels K-Bh10 Abblasen beendet	
N ₂ -Temperatur	K-P12	Kontaktmanometer	N ₂ -Flaschenbatterie	$P < 20$ atü	X	N ₂ -Verbrauch	umschalten von Hand auf K-Bh12/13 bzw. K-Bh11/12 3-Punkt-Regelung von K-T10 über K-Hz1 PI-Regelung von K-T11 über K-Ve31 bei Betrieb <u>mit</u> Flüssig-H ₂ PI-Regelung von K-T11 über K-Ve31 bei Betrieb <u>ohne</u> Flüssig-H ₂
	K-T8	Thermoelement	Neutr.-Filter K-Wt1	$T > 90^{\circ}\text{K}$	X	Kühlung ausgefallen	
	K-T10	Thermoelement	N ₂ -Leitg. nach K-Hz1	$T = 30^{\circ}\text{C}$			
	K-T11	Thermoelement	N ₂ -Leitg. vor K-Hz1	$T = 85^{\circ}\text{K}$ $T = 250^{\circ}\text{K}$			
Druckluftsystem (D)							
Luftdruck	D-P35	Kontaktmanometer	Druckluftbeh. D-Bh20	$P < 5,5$ atü	X	Ausfall Druckluftversorgung	Gesamtanlage von Hand abstellen
	D-P36	Kontaktmanometer	Druckluftbeh. D-Bh20	$P < 3,5$ atü	X	Ausfall Druckluftversorgung	
Primärkreislauf (P)							
He-Temperatur	PK-T49	Pt-Widerstandsthermom.	Kalte He-Rückleitung	$T > 20^{\circ}\text{K}$ $T < 16^{\circ}\text{K}$	X	He-Anlage defekt	Reaktor abgestellt PI-Regelung von PK-T71 bei Betrieb <u>mit</u> Flüssig-H ₂ über PK-Hz 7 He-Anlage defekt Regelung defekt Temp.-Änderung nach Turbine 2 kein He-Durchfluß
	PK-T71	Pt-Widerstandsthermom.	Kalte He-Zuleitung	$T = 14^{\circ}\text{K}$ $T > 15^{\circ}\text{K}$	X		
	PK-T73	H ₂ -Dampfdruckthermom.	Kalte He-Zuleitung	$T < 13^{\circ}\text{K}$ $T > 13^{\circ}\text{K}$	X		
	PK-T74	Thermoelement	Kalte He-Zuleitung	$T < 10^{\circ}\text{K}$ $T > 100^{\circ}\text{C}$	X		



Bei H_p = Luft - Reaktortransversuchen / 15 /
gemessene Höchstströme
(280 am³ Flüssig- H_p)



Druckgrenzwerte für das
Druckrohr nach Z-Nr. P 016-1-0-8, Abb. 9
© 715 at; im Druckversuch ermittelte Berstdruck 751/

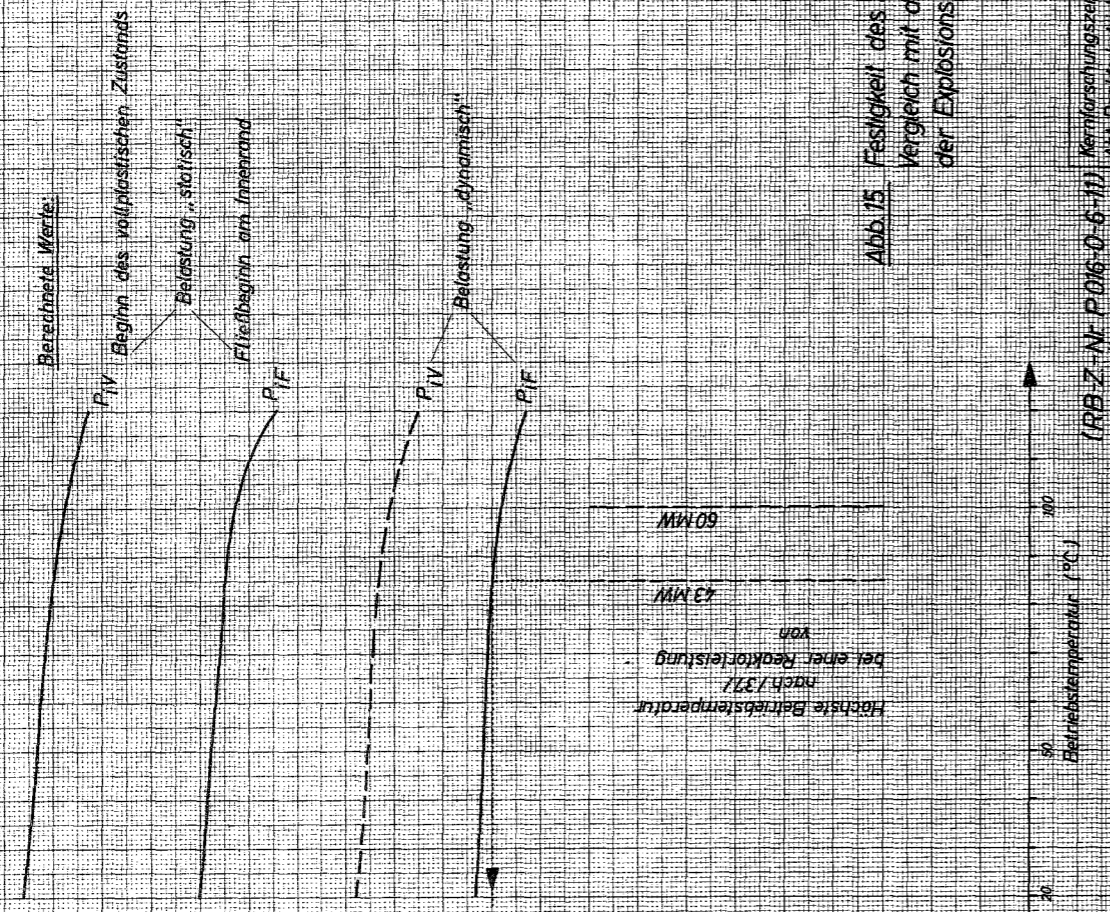


Abb. 75 Festigkeit des Druckrohrs.
Vergleich mit den Ergebnissen
der Explosionsversuche

(RBZ-Nr. P 016-0-6-11) Kernforschungszentrum Karlsruhe
Abt. Reaktorbetrieb, Proj. 16
Sept. 57, 2004