



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH  
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG

Institut für Reaktorentwicklung

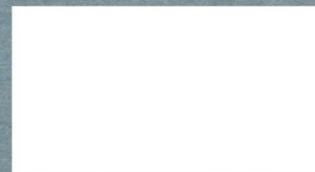
**Prozessdampferzeugung  
mit Hochtemperaturreaktoren**

von  
K. Kugeler

unter Mitarbeit von  
R. Schulten, M. Kugeler, H. Barnert, H.-P. Drescher

Jül - 870 - RG  
Juni 1972

Als Manuskript gedruckt





**Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 870**  
**Institut für Reaktorentwicklung Jül - 870 - RG**

Dok.: Steam - Reactor, Process Heat  
Process Steam - Reactor, Process Heat  
Reactor, Process Heat - Process Steam

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

# **Prozessdampferzeugung mit Hochtemperaturreaktoren**

von  
K. Kugeler

unter Mitarbeit von  
R. Schulten, M. Kugeler, H. Barnert, H.-P. Drescher

# GENERATION OF PROCESS STEAM BY HIGH-TEMPERATURE REACTORS

by

Kurt Kugeler

by the cooperation of

Rudolf Schulten

Manfred Kugeler

Heiko Barnert

Hans-Paul Drescher

## ABSTRACT

A reactor power plant is described for the production of process steam and for the electricity generation by a counter pressure turbine, and explained by general drawings and data lists. Particular emphasis is placed to reactor constructions, the characteristics of which are somewhat deviating from hitherto existing types (e.g. THTR), namely to the once-through then out loading scheme (OTTO), loop construction of the steam generators, the containment emplaced underground, and completely ceramic core construction.

This study was performed in close collaboration with STEAG Essen and with producers of reactor components. We want to express our gratitude to all of them.

Transl.:

A.C.W.

## PROZESSDAMPFERZEUGUNG MIT HOCHTEMPERATURREAKTOREN

von  
Kurt Kugeler

unter Mitarbeit von

Rudolf Schulten  
Manfred Kugeler  
Heiko Barnert  
Hans-Paul Drescher\*

### KURZFASSUNG

Es wird eine kurze Beschreibung einer Reaktoranlage zur Prozeßdampferzeugung und Gegendruckstromerzeugung anhand von Übersichtszeichnungen sowie Datenlisten gegeben. Die gegenüber bisherigen Reaktorkonstruktionen, z.B. THTR, abweichenden Merkmale wie Einwegbeschickung, Loopbauweise der Dampferzeuger, unterirdische Bauweise, vollkeramischer Coreaufbau, werden besonders herausgestellt.

Diese Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit der STEAG Essen und Komponentenherstellern durchgeführt. Ihnen allen sei an dieser Stelle unser Dank ausgesprochen.

---

\* jetzige Anschrift: BONNENBERG & DRESCHER GmbH  
5104 Eilendorf bei Aachen  
Josefstraße 62

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 ALLGEMEINE BEDINGUNGEN FÜR PROZESSDAMPFERZEUGUNG	1
2 ANLAGEBESCHREIBUNG PR 500	2
3 SPEZIELLE KOMPONENTEN DES NUKLEARTEILS	7
3.1 Brennelemente	7
3.2 Reaktordruckbehälter	9
3.3 Coreaufbau	13
3.3.1 Daten Coreaufbau	15
3.3.2 Konstruktiver Aufbau des Graphits und Kohlesteins	16
3.3.3 Werkstoffe	18
3.3.4 Stabilität des Aufbaus	19
3.3.5 Untere Kaltgassammelkammer	21
3.3.6 Trennfolie zwischen Graphit und Kohlestein	21
3.4 Dampferzeuger	22
3.5 Koaxialleitungen	26
3.6 Gebläse	28
3.7 Beschickungsanlage	31
3.8 Abschaltstäbe	38
3.9 Gasreinigungsanlage, Gaskreisläufe	39
3.10 Containment	42

## VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tab. 1: Daten Brennelemente	8
Tab. 2: Daten Koaxialleitungen	26

## VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

	Seite
Abb. 1: Anlagenübersicht	3
Abb. 2: Wärmeschaltbild	4
Abb. 3: Spannbetonbehälter	10
Abb. 4: Liner	12
Abb. 5: Coreaufbau PR 500	14
Abb. 6: Aufhängung der Coredecke	17
Abb. 7: Untere Kaltgaskammer	20
Abb. 8: Dampferzeuger	23
Abb. 9: Temperaturen im Dampferzeuger	25
Abb. 10: Koaxialleitung	27
Abb. 11: Gebläse mit Diffusorregelung	29
Abb. 12: Kennfeld des Gebläses mit Diffusorregelung	30
Abb. 13: Fließschema zur Beschickungsanlage	32
Abb. 14: Kugelabzug	35
Abb. 15: Brennelementwagen	36
Abb. 16: Schema der Gasreinigungsanlage	39
Abb. 17: Helium-Kreislauf mit Kühlwasserversorgung	40

## 1 ALLGEMEINE BEDINGUNGEN FÜR PROZESSDAMPFERZEUGUNG

Für die nukleare Erzeugung von Prozessdampf für die Chemische Industrie existieren Randbedingungen, die sehr verschieden von denen sind, mit denen üblicherweise bei der Erstellung von Kernkraftwerken zur Stromerzeugung zu rechnen ist.

- (1) Da Dampf über weitere Strecken nicht wirtschaftlich transportiert werden kann, muß der Standort einer derartigen Anlage mitten in einem Chemiebetrieb oder doch dicht neben diesem gewählt werden. Aus diesem Grunde sind an die Sicherheit einer solchen Anlage besondere Anforderungen zu stellen. Insbesondere ein Reaktor, der auch gegen heute nicht diskutierte Störfälle (totaler Kühlmittelverlust, Coreschmelzen, Sabotage, Flugzeugabsturz) sicher ist, dürfte unter diesem Gesichtspunkt besondere Chancen haben. Der im folgenden näher beschriebene Hochtemperaturreaktor PR 500 bietet wegen seines keramischen Coreaufbaus und wegen der Möglichkeit, ihn unterirdisch anzuordnen, große Vorteile.
- (2) Prozessdampf wird mit Temperaturen von 250 ... 300 °C und unter Druck von  $\approx 20$  at benötigt. Gleichzeitig wird üblicherweise Gegendruck- bzw. Vorschaltstrom mit hohem Wirkungsgrad ( $\approx 80$  %) erzeugt. Günstig ist also ein nuklearer Dampferzeuger, der Dampf von 530 °C/150 atü wie ein konventioneller Kessel erzeugen kann.
- (3) Die Einheitsleistung heutiger Kessel liegt bei  $\approx 500$  t/h. Bei wesentlich größeren Leistungen wird die Reservehaltung zum Problem. Im übrigen sind nur sehr wenige Verbraucher vorhanden, die größere Leistungen zubauen könnten.
- (4) Eine kontinuierliche Erzeugung ist wünschenswert, da die angeschlossenen chemischen Prozesse Auslastungen von mehr als 90 % aufweisen. Ein Reaktor, der kontinuierlich be- und entladen werden kann, wäre dem Betriebsablauf optimal angepaßt.

## 2 ANLAGEBESCHREIBUNG PR 500

Der Reaktor PR 500 ist konzipiert für die Erzeugung von Prozessdampf ( $\approx 265 \text{ }^\circ\text{C}/19,8 \text{ at}$ ) sowie Vorschaltstrom. Gemessen an den heute in der Kerntechnik üblichen Einheitsleistungen ist die hier gewählte thermische Leistung (500 MWth) des Reaktorcores sehr klein, jedoch dürfte aus den in der Einleitung erwähnten Gründen gerade an Kapazitäten von etwa 500 t Dampf/h Interesse auf Seiten der Verbraucher bestehen. (Siehe Abb. 2)

Beim Bestreben, die Anlage an die Bedürfnisse der Prozesswärmeerzeugung anzupassen, sie zu vereinfachen und evtl. ihre Kapitalkosten zu senken, haben sich folgende Modifikationen gegenüber bisherigen Projekten (z.B. THTR) als zweckmäßig herausgestellt:

- (a) Einwegbeschickung der Brennelemente.
- (b) Loopbauweise der Dampferzeuger, Aufstellung im Containment.
- (c) Unterirdische Unterbringung des Containments.
- (d) Verbindungen zwischen Reaktordruckbehälter und Dampferzeuger durch Koaxialleitungen
- (e) Gebläse direkt an den Dampferzeuger angeflanscht.
- (f) Verzicht auf thermischen Schild und Folienisolierung des Liners, Ersatz durch Kohlestein.
- (g) Keine Aktiv-Gasreinigung.

Abb. 1 zeigt den Aufbau des Reaktorcores sowie die Anordnung des Primärteils im Containment. Durch die freie Aufstellung der Dampferzeuger kann der Reaktordruckbehälter sehr klein gehalten werden; durch Verzicht auf die Umlaufbeschickung kann die Bauhöhe der gesamten Anlage begrenzt werden. Nur dadurch wird überhaupt erst eine unterirdische Anordnung wirtschaftlich vertretbar.

Die Brennelemente gehen bei diesem Reaktortyp, wie schon erwähnt, nur einmal durch das Core hindurch (sogenannte Einwegbeschickung, im Gegensatz zur Mehrfachdurchlaufbeschickung). Sie werden hierbei über ein Schleusensystem (siehe Kap. 3.7) oben in zwei Zonen ins Reaktorcore eingegeben, durchlaufen das Core (Aufenthaltszeit etwa 2,5 a), werden unten durch das Abzugsrohr und eine Entnahmevorrichtung entnommen und gelangen in einen unter Druck stehenden Transportwagen, der in bestimmten Zeitrhythmen gefüllt, abgeflanscht und dann zur Wiederaufarbeitungsanlage oder zur Endlagerung abgefahren wird.

Die Vorteile, die sich durch diese Konzeption gegenüber der Mehrfachbeschickung ergeben, sind folgende:

- (1) Da der Spaltstoffgehalt der Brennelemente beim Durchlauf durch das Core kontinuierlich abnimmt, findet die Leistungserzeugung im Reaktorcore praktisch nur in einer oberen aktiven Corezone statt. Die mittlere Leistungsdichte in diesem Bereich beträgt rund  $12 \text{ MWth/m}^3$ . Maximal werden in den

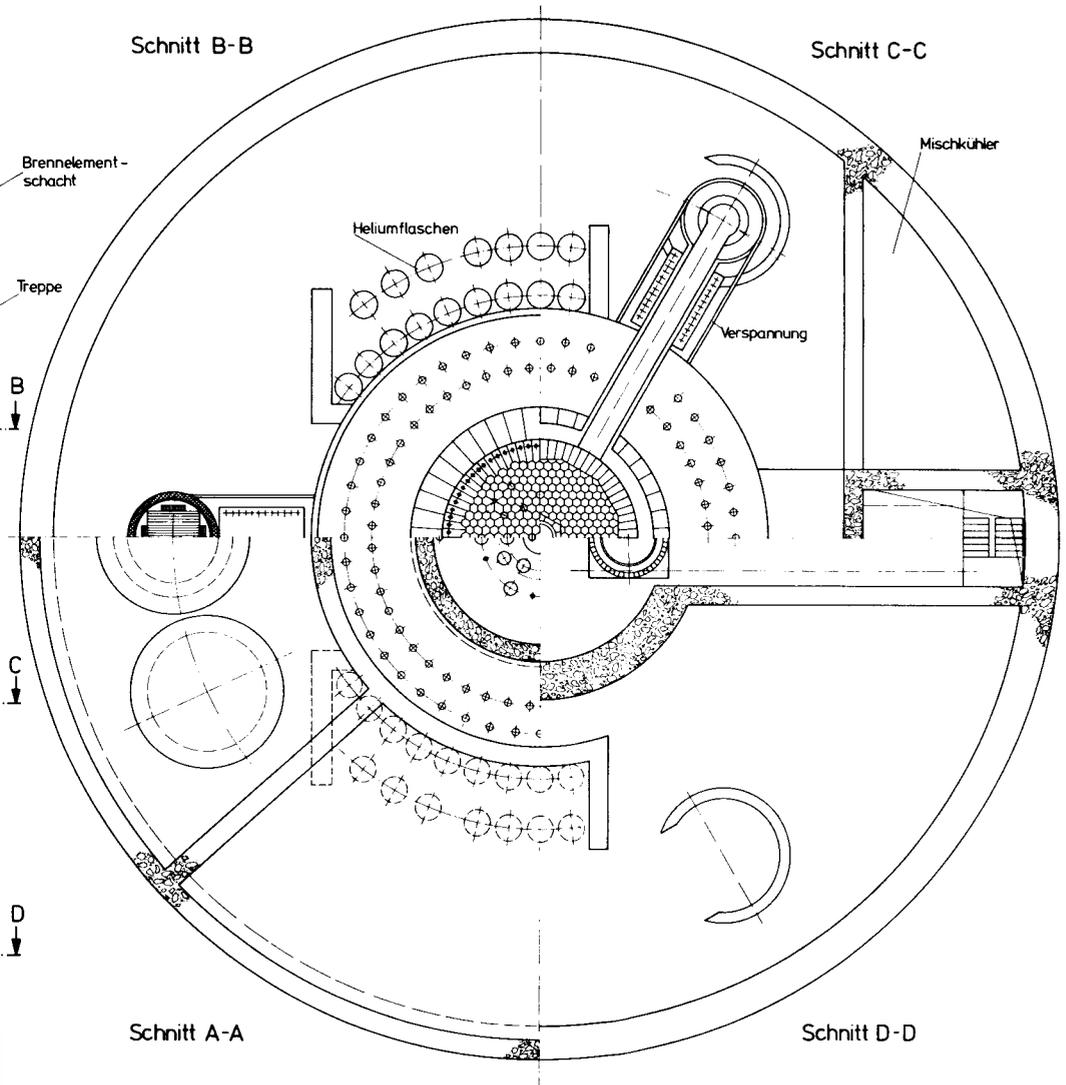
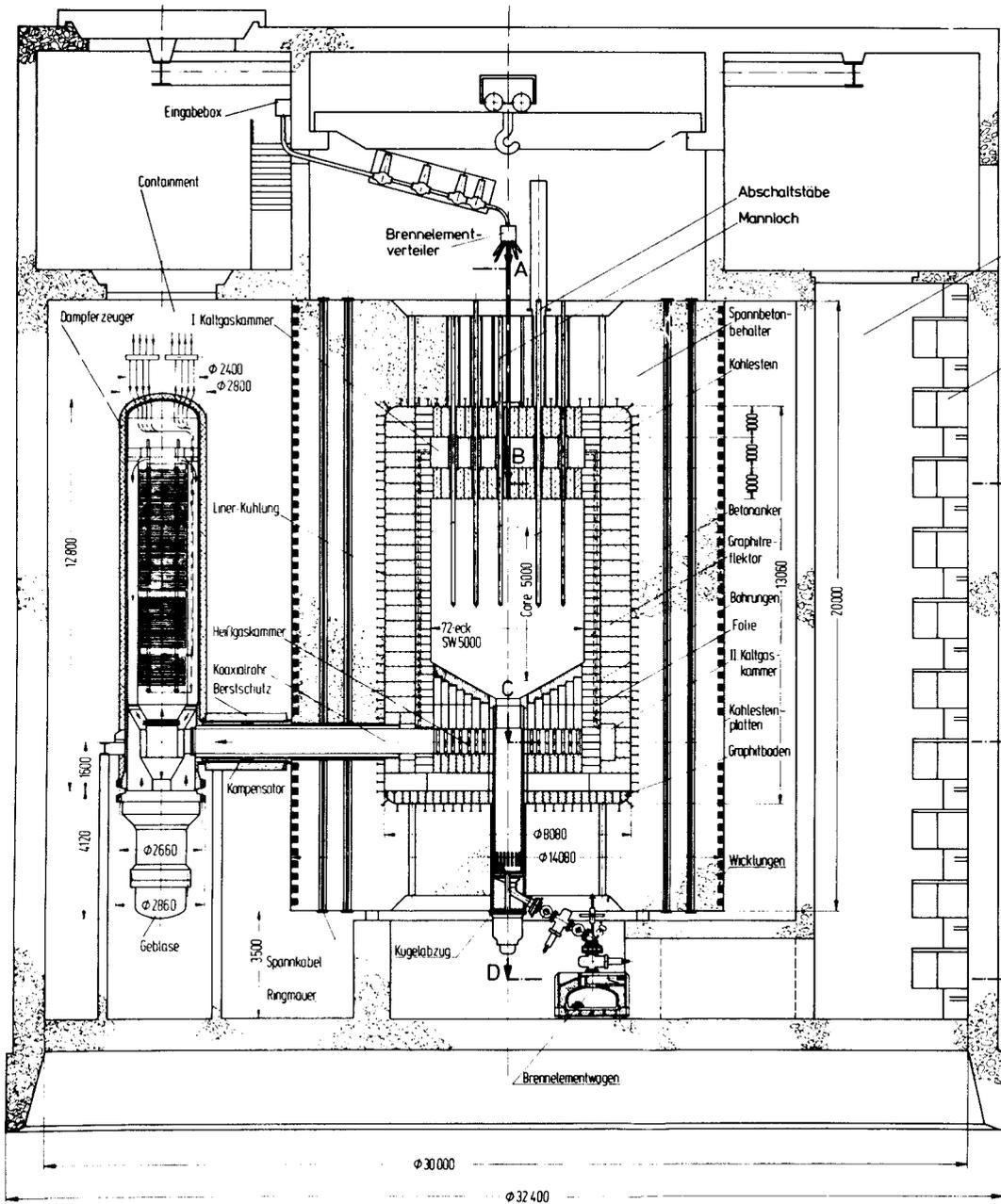
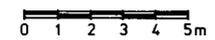


Abb. 1:  
Anlagenübersicht



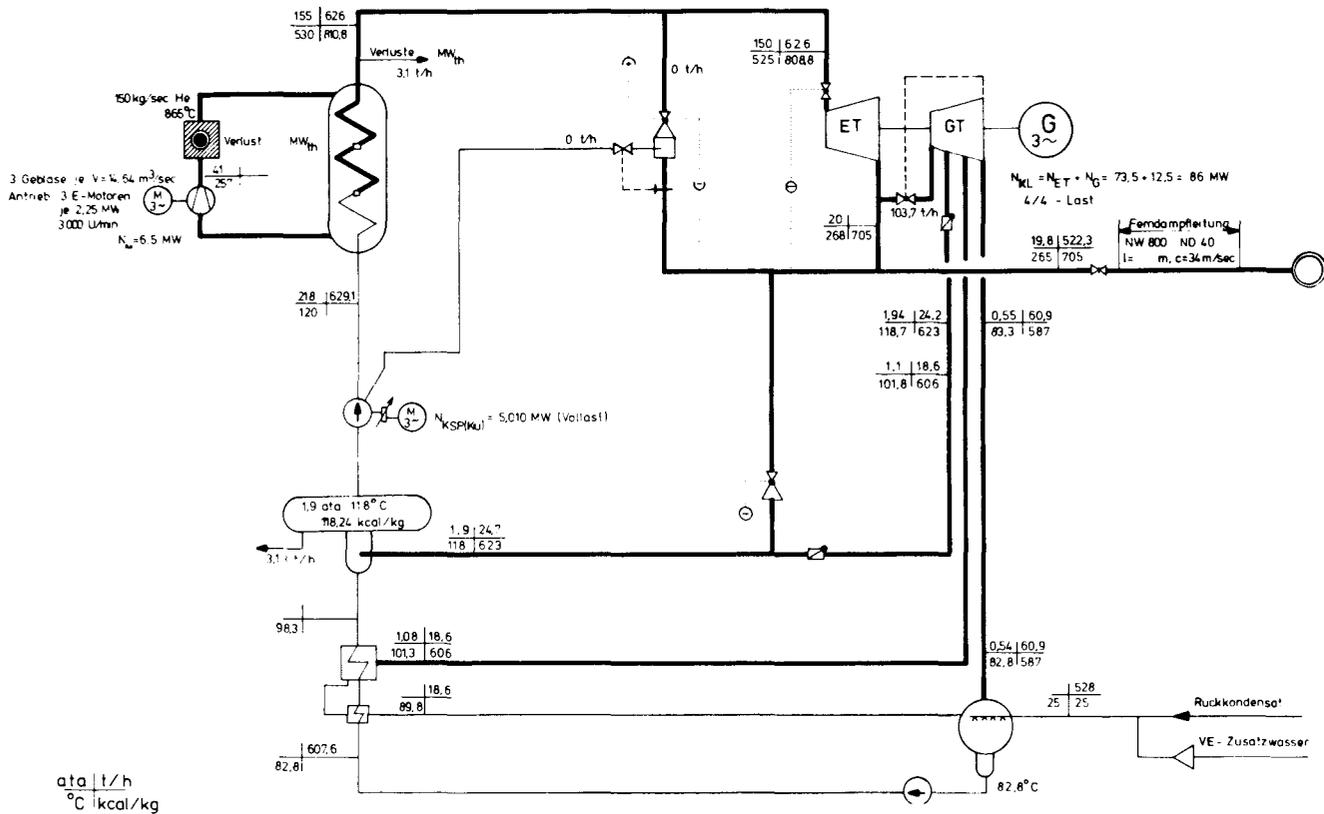


Abb. 2: Wärmeschaltbild

obersten Kugelschichten bis zu  $18 \text{ MWth/m}^3$  erzeugt. Die untere Reaktorzone wirkt als Abklingszone, die Leistungsdichte sinkt hier bis auf  $\approx 1 \text{ MWth/m}^3$  ab. Die Aufheizung des Kühlgases, das von oben her mit etwa  $265 \text{ }^\circ\text{C}$  ins Core einströmt, erfolgt praktisch in der oberen Hälfte des Reaktorcores. Die Temperaturdifferenzen zwischen Brennstoff und Kühlgas sind der Leistungsdichte proportional, daher kommt es im unteren Teil des Reaktors nur zu sehr kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Brennstoff und Kühlgas ( $\Delta T \approx 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Es zeigt sich, daß z.B. bei einer mittleren Austrittstemperatur des Kühlgases von  $865 \text{ }^\circ\text{C}$  die heute industriell garantierten Spezifikationen von  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  für den Brennstoff sowie  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  für die Brennelementoberfläche eingehalten werden können; für die Brennstofftemperatur ist dabei sogar noch eine Sicherheit von etwa  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  vorhanden. Auch für Austrittstemperaturen bis zu  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , die für andere Bereiche der Prozesswärmeerzeugung von Interesse sein können, ergeben sich bei dieser Art von Beschickung sehr günstige Aspekte.

- (2) Durch die weitgehende Entkopplung von Leistungserzeugung und Temperaturbelastung wird erreicht, daß heiße Komponenten des keramischen Coreaufbaus nur sehr niedrige Strahlendosen erhalten. Für die strahlungsmäßig hoch beanspruchten Teile des Reflektors (Decke und oberer Teil des Seitenreflektors) sind Graphite bei Bestrahlungstemperaturen von  $300$  bis  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  weitgehend erprobt.
- (3) Durch die Verschiebung der Leistungserzeugung, d.h. des Neutronenflusses in den oberen Teil des Cores, werden die Regel- und Abschaltvorgänge sehr erleichtert. Es reicht eine relativ geringe Anzahl von Stäben aus, weiterhin wird die Einfahrtiefe in den Kugelhaufen klein sein.
- (4) Bei dieser Art der Beschickung wird die Beschickungsanlage stark vereinfacht; es ist unter anderem keine Umwälzeinrichtung sowie keine schnell arbeitende Abbrandmeßanlage erforderlich.
- (5) Die Aktivität der aus dem Reaktor entnommenen Brennelemente ist schon stark abgeklungen, damit erübrigt sich ein Brennelementzwischenlager.

Das Kühlgas wird nach Durchgang durch die Kugelschüttung in der aus Graphitsäulen gebildeten Heißgaskammer gesammelt und durch 3 Koaxialleitungen zu den Wärmetauschern geleitet. Die zugehörigen Gebläse sind jeweils an den Wärmetauschern angeordnet. Das aus diesen Aggregaten zurückströmende Kaltgas ( $257 \text{ }^\circ\text{C}$ ) wird durch den äußeren Ringraum der Koaxialleitung zurück zum Reaktor ge-

führt und hier in einer unteren Kaltgassammelkammer, die ringförmig um die Heißgaskammer angeordnet ist, gesammelt. Durch Bohrungen im Seitenreflektor wird hierauf das Kühlgas in die obere Kaltgassammelkammer geleitet, von wo aus es wieder ins Core eintritt.

Beim Coreaufbau ist der Ersatz des thermischen Shieldees durch eine hinreichend dicke, entsprechend vergiftete Kohlesteinwand vorgesehen. Gleichzeitig wird durch diese Isolierschicht der Schutz des Behälters vor zu hohen Temperaturen gewährleistet, die Verwendung von Isolierfolien wird vermieden. Die Abschalt- und Regelstäbe werden von oben her in den Kugelhaufen eingefahren. Da die größten Eindringtiefen voraussichtlich unter 2 m liegen werden, sind keine nennenswerten Stabbelastungen und Kugelbruchraten zu erwarten.

Eine weitere Vereinfachung dieser Reaktorkonzeption besteht darin, daß die Gasreinigung nur  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  aus dem Kreislauf entfernt (über  $\text{CuO}$ -Betten und Molekularsiebe); auf die Reinigung von Spaltprodukten wird hier verzichtet, da für die Kreislaufaktivität aufgrund der beim AVR gewonnenen Erfahrungen sehr niedrige Werte erwartet werden.

Mögliche Störfälle, wie der Bruch einer Koaxialleitung oder Rohrreißer im Dampferzeuger, können mit den vorgesehenen baulichen Maßnahmen beherrscht werden. Der Spannbetonbehälter, die Wärmetauscher, die Koaxialleitungen sowie die Gebläse befinden sich in einem Containment. Dieser Raum ist mit  $\text{N}_2$  gefüllt und so groß dimensioniert, daß er im Störfall den gesamten Heliuminhalt des Primärkreises aufnehmen kann. Der Mischdruck überschreitet dabei nicht den Wert von etwa 2,1 atü. Die Inertgasfüllung  $\text{N}_2$  wird vorgesehen, um im Störfall (Bruch der Koaxialleitung) den Eintritt von Luft ins Reaktorcore zu verhindern. Das Containment wird mit einer Erdschicht von etwa 5 m Dicke überdeckt, so daß auch gegen Flugzeugabstürze und Flächenbrände Sicherheit besteht. Nach einem derartigen Störfall, der bekanntlich ausgesprochen unwahrscheinlich ist und daher heute bei Genehmigungsverfahren noch nicht diskutiert wird, kann das gesamte Primärkreisgasvolumen des Reaktors zusammen mit der Inert-Gasfüllung nach Durchgang durch einen Filter für feste Spaltprodukte über einen hinreichend hohen Kamin ohne Gefährdung für die Umgebung abgegeben werden. Ein intaktes Gebläse und ein Dampferzeuger reichen aus, um die Nachwärme des Reaktors abzuführen. Auch der zweite denkbare Störfall, das Reißen eines Rohres in einem Wärmetauscher, kann mit Hilfe eines Mischkühlers, in den der gesamte Gasinhalt des Reaktorkreislaufes zur Kondensation von Wasserdampf eingeblasen wird, beherrscht werden.

### 3 SPEZIELLE KOMPONENTEN DES NUKLEARTEILS

#### 3.1 Brennelemente\*

Die Brennelemente werden bei Einsatz der Einwegbeschickung kontinuierlich in zwei Zonen von oben ins Reaktorcore eingegeben. Während des Abbrennvorganges bewegen sie sich unter dem Einfluß der Schwerkraft zum Kugelabzug. Aufgrund des axial stark unsymmetrischen Neutronenflussprofils findet die Leistungserzeugung praktisch nur im oberen Teil des Reaktorcores statt. Hier treten auch die größten Temperaturgradienten im Brennelement auf. Diese Größe ist hier der limitierende Faktor bei der Brennelementauslegung.

Im unteren Teil des Reaktorcores findet ein Nachbrennen der Brennelemente statt. Der Abbrand weist voraussichtlich bei Entnahme aus dem Reaktor nur eine Streuung von  $\pm 5\%$  auf.

In Tab. 1 sind die für die nukleare Auslegung wichtigsten Daten zusammengestellt.

Ein Entwicklungspotential der kugelförmigen Brennelemente, die Verringerung der Graphitschalendicke von 1 cm auf 0,5 cm ist bei dieser Auslegung noch nicht ausgeschöpft. Insbesondere bei der Erhöhung der Leistungsdichte wird dies von Interesse sein. Bezüglich der Freisetzungsraten von Spaltprodukten brauchen bei den für diesen Reaktortyp benötigten Brennelementen keine anderen Spezifikationen gefordert zu werden als beim THTR (R/B-Rate für  $Xe^{133}$   $6 \cdot 10^{-5}$ ). Da die mechanischen Beanspruchungen der Brennelemente (nur einmaliger Durchgang, keine Manipulation bestrahlter Brennelemente in der Beschickungsanlage, geringe Eindringtiefen der Stäbe) sehr viel kleiner sein werden als bei bisherigen Kugelhaufenreaktorprojekten, beinhaltet die Auslegung sehr große Sicherheitsfaktoren.

---

\* Einzelheiten hierzu siehe:

JÜL-858-RG, Mai 1972

E. Teuchert, V. Maly, K.A. Haas: Basisstudie zum Kugelhaufenreaktor in OTTO-Beschickung

Thermische Leistung des Cores	500 MW
Mittlere Leistungsdichte	5 MW/m <sup>3</sup>
H/D-Verhältnis	≈ 1
Kühlgasdruck	40 at
Mittlere Kühlgasaustrittstemperatur	865 °C
Maximale Kühlgasaustrittstemperatur	950 °C
Kühlgaseintrittstemperatur	265 °C
Maximale Oberflächentemperatur	970 °C
Maximale Coated-Particle-Temperatur	1000 °C
Maximale Leistung	3,2 kWth/Kugel
Mittlere Leistung	≈ 0,9 kWth/Kugel
Schwermetalleinsatz	10,74 g/Kugel
Anreicherung frischer Kugeln, innen	5,25 % U-235
außen	8,5 % U-235
Spaltstoffeinsatz über Core gemittelt	≈ 0,33 kg/MWth
Abbrand innen	56.000 MWd/t
außen	78.000 MWd/t
Durchlaufzeit innen	670 d
außen	890 d
Schnelle Dosis (E > 0,1 MeV) max.	2,65 · 10 <sup>21</sup> n/cm <sup>2</sup>
Zerdrückfestigkeit	2000 kp
Radius der Kugeln	3 cm
Radius der Brennstoffzone	2 cm
Schüttdichte im Core	0,61
Kernradius des Coated Particle	3 · 10 <sup>-2</sup> cm
Dicken der beiden Coatingschichten	8,5 · 10 <sup>-3</sup> bzw. 8 · 10 <sup>-3</sup> cm
UO <sub>2</sub> -Dichte	10,8 g/cm <sup>3</sup>

TAB. 1: Daten Brennelemente

### 3.2 Reaktordruckbehälter (siehe Abb. 3)

Da der Reaktordruckbehälter nur die Reflektoreinbauten, den keramischen Coreboden, die Kohlesteinisolierung sowie eine metallische Kaltgassammelkammer enthält, sind die Abmessungen klein. Er wird üblicherweise als Spannbetondruckgefäß mit Wicklungen und axialen Spannkabeln ausgeführt. Die gasdichte Auskleidung wird durch den Liner gewährleistet. Die Kühlung dieses Liners erfolgt auf der Betonseite durch aufgeschweißte Vierkantrohre, die Wärmeisolation zum Core hin wird durch eine allseitige Kohlesteinauskleidung übernommen. Die großen Behälteröffnungen (3 Koaxialrohre, 1 Mannloch, 1 Kugelabzug) werden mit Panzerrohren ausgekleidet. Die Verbindung der Panzerrohre mit dem Liner erfolgt durch Schmiedestücke, so daß einwandfreie, gut prüfbare Schweißverbindungen gewährleistet sind. Die Panzerrohre für die Abschaltstäbe sowie die Brennelementzuführungsrohre sind direkt so an den Liner geschweißt, daß eine einwandfreie Prüfung erfolgen kann. Die Aufhängung der Deckensteine erfolgt an in den Liner eingeschraubten Haken (Einzelheiten siehe 3.3). Die Verankerung des Liners im Beton wird durch Bolzen von  $\approx 25$  cm Länge erreicht. Das Raster ist hinreichend eng, so daß Verbeulungen des Liners verhindert werden. Die gegenüber bisherigen Reaktorkonzepten (z.B. THTR) hohe thermische Linerbelastung ( $\approx 6$  kW/m<sup>2</sup>) resultiert aus der Wärmeproduktion im Kohlestein, die naturgemäß zum Teil zur Außenseite des Liners abgeführt werden muß.

Der Spannbetonbehälter wird auf eine Ringwand aufgesetzt, Neopren-Lager ermöglichen eine gewisse Bewegung, um Schwankungen von Druck und Temperatur ausgleichen zu können.

#### Daten Spannbetonbehälter

Innendurchmesser	8080 mm
Innenhöhe	13060 mm
Betondicke (Zylinder)	3000 mm
Betondicke (Boden und Decke)	3500 mm
Wanddicke des Liners	20 mm
Isolierdicke (Kohlestein)	1000 mm
Betriebsdruck	39 atü
Störfalldruck	46 atü
Prüfdruck	50 atü
Linerkühlleistung	2,5 MW
Linerwärmebelastung	6 kW/m <sup>2</sup>
Maximale Liner-temperatur	50 °C
Maximale Temperaturdifferenz im Beton	20 °C
Kühlwassereintrittstemperatur	30 °C
Aufwärmung des Kühlwassers	5 °C
Kühlwassermenge	430 m <sup>3</sup> /h

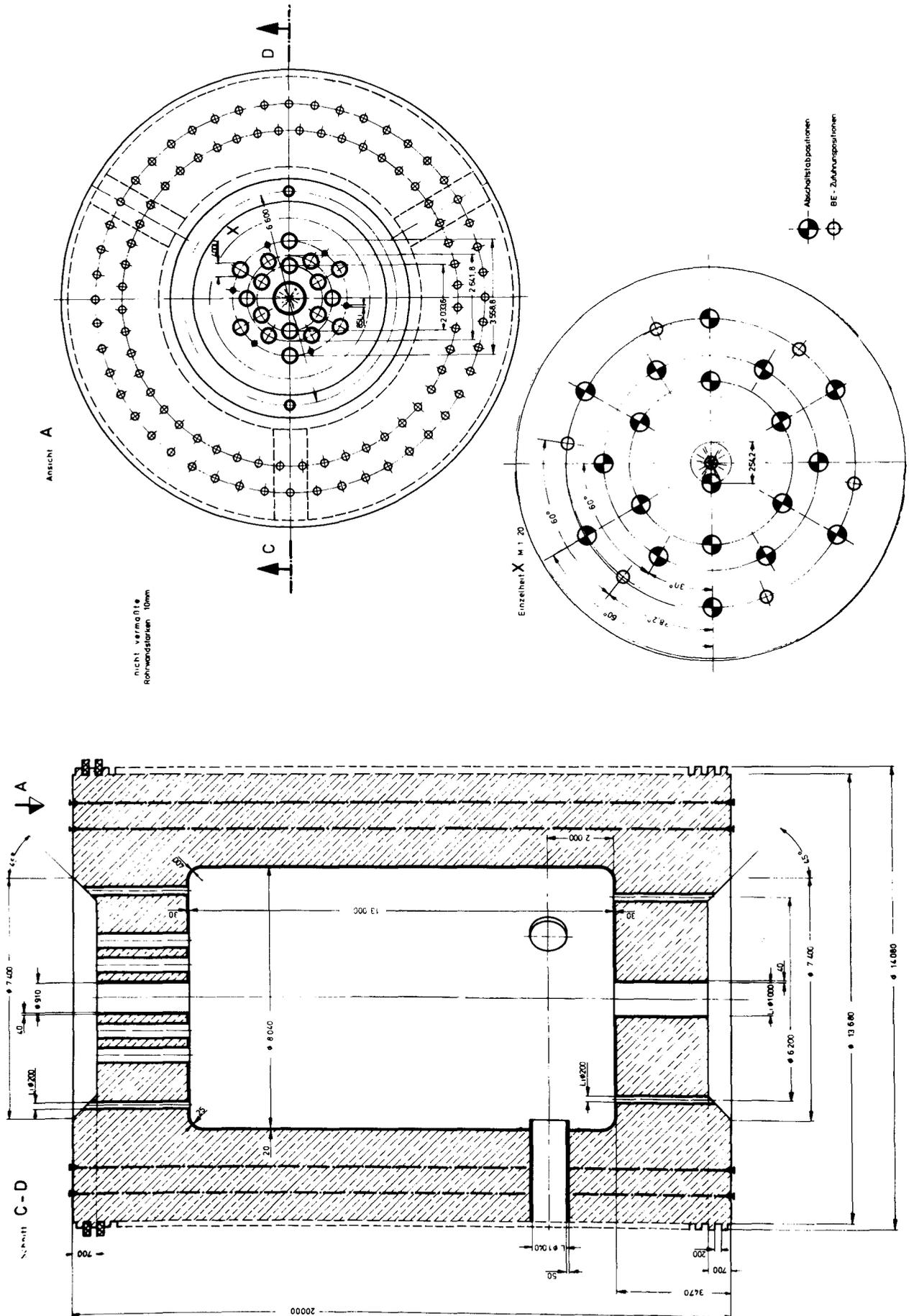


Abb. 3: Spannbetonbehälter

Daten Liner (siehe Abb. 4)

Zylinder

Linerhöhe ohne Torusstücke	12.200 mm
Linerdurchmesser licht	8.040 $\emptyset$ mm
Linerwandstärke	20 mm

Deckel

Durchmesser ohne Torusstück	7.240 $\emptyset$ mm
Wandstärke	30 mm

Boden

Durchmesser ohne Torusstück	7.240 $\emptyset$ mm
Wandstärke	30 mm

Torusstücke

Krümmungsradius	400 mm
Wandstärke	25 mm

Öffnungen für Panzerrohre

3 Koaxialrohre am Zylinder	1.040 mm Li $\emptyset$
18 Abschaltstabpositionen am Deckel	370 mm Li $\emptyset$
1 Mannloch am Deckel (enthält 1 Abschaltstab und 1 Beschickungsrohr)	910 $\emptyset$ mm
6 Beschickungsrohre am Deckel	85 mm Li $\emptyset$
2 Thermoelementdurchführungen am Deckel	200 mm Li $\emptyset$
1 Abzugsrohr am Boden	1.000 mm Li $\emptyset$
2 Gasreinigungsanschlüsse am Boden	200 mm Li $\emptyset$

Reaktordruck 40 atm

Störfalldruck 48 atm

Kaltgastemperatur 260 °C

max. Linertemperatur 50 °C

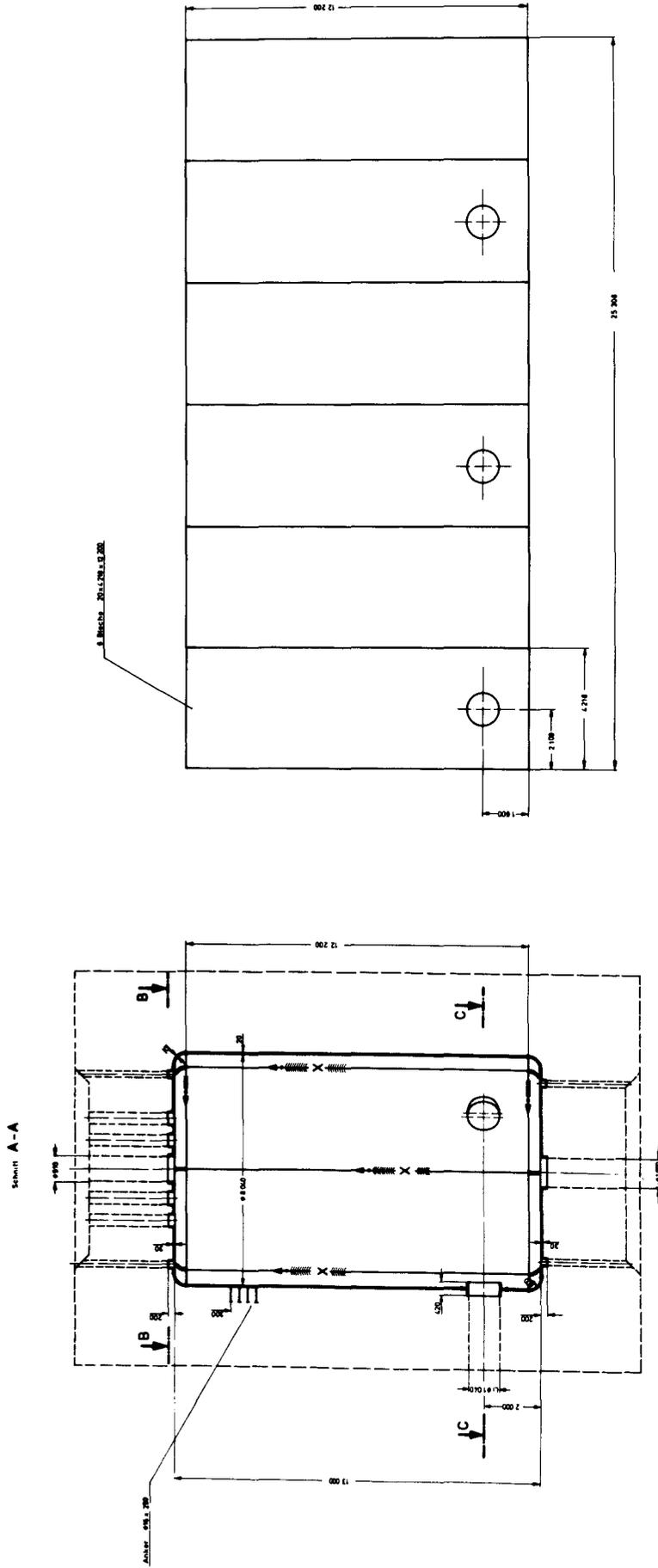
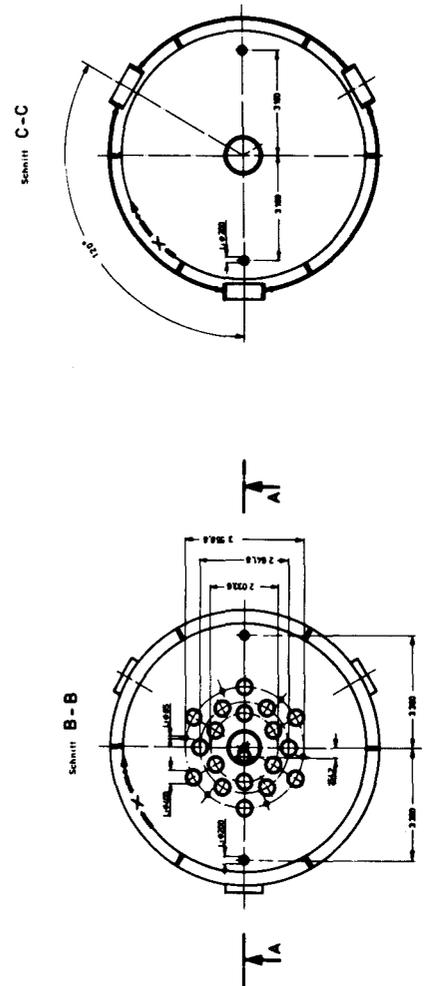


Abb. 4: L i n e r



### 3.3 Coreaufbau (siehe Abb. 5)

Die Reaktoreinbauten bestehen aus folgenden Komponenten:

- (1) einer allseitigen Kohlesteinauskleidung des gesamten Spannbetonbehälterinneren,
- (2) dem Graphitaufbau, der sich folgendermaßen zusammensetzt:
  - aus dem Seitenreflektor,
  - der konischen Bodenkonstruktion,
  - der darunterliegenden Heißgaskammer (gebildet aus Graphitsäulen),
  - einer Heißgaskammer-Bodenplatte aus Graphit,
  - einer Reaktorbodenschicht aus Graphit (Anpassung an den Bodenliner),
  - dem Deckenreflektor,
  - dem Kugelabzugsrohr aus Graphit,
  - 19 Graphitführungsrohren für die Abschaltstäbe.
- (3) der unteren ringförmigen metallischen Kaltgassammelkammer,
- (4) Eisenstangen für die Aufhängung der Deckenisolierung und des Deckenreflektors,
- (5) einer metallischen, mehrbeschichteten Trennfolie zwischen Graphit und Kohlestein.

Funktion des Kohlesteins ist die Wärmeisolation des Spannbetonbehälters sowie der Abbau von Neutronen- und Gammaflüssen.

Neben der Aufgabe der Neutronenreflexion nimmt die Graphitkonstruktion die Kugelschüttung auf und sorgt für eine Führung des Gasstromes im Core. Weiterhin bewirkt sie einen Abbau der Neutronen- und Gammaflüsse. Beide Bauteile stellen darüber hinaus bei sehr schweren Störfällen eine große Wärmekapazität dar.

Die Kaltgassammelkammer hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Sie dient als Sammelraum für das durch die Koaxialleitungen von den Wärmetauschern zurückströmende Gas.
- Sie sorgt für eine Verteilung des Gasstromes, der durch die Reflektorbohrungen zur oberen Kaltgassammelkammer geleitet wird.
- Sie dient als Stützkonstruktion für den Kohlesteinaufbau.
- Im Bereich der Kaltgassammelkammer werden die durchgeführten Heißgasrohre durch Bypassströmungen gekühlt.



Die Trennfolie zwischen Graphit und Kohlestein verhindert Gasströmungen zum Liner hin und bewirkt eine Trennung zwischen dem Hauptstrom des Kühlgases und einem Bypass, der aus dem Kohlestein abgezogen und der Gasreinigungsanlage zugeführt wird.

### 3.3.1 Daten Coreaufbau

#### Abmessungen des Graphitaufbaus

Seitenreflektor	
Höhe	11 m
Dicke	0,5 m
Innerer Durchmesser	5 m
Deckenreflektor	
Durchmesser	5 m
Dicke	1 m
Konische Corebodenkonstruktion	
Durchmesser innen	1 m
Durchmesser außen	5 m
Höhe in Mitte	1 m
Neigungswinkel	30°
Heißgaskammer	
Durchmesser	5 m
Höhe	0,8 m
Bodenlage in Heißgaskammer	
Dicke	0,6 m
Durchmesser	5 m
Reaktorboden (Anpassung an Liner)	
Dicke	0,4 m
Durchmesser	8 m
Kugelabzugsrohr (3 Teilstücke)	
Länge	3,2 m
Innendurchmesser	0,8 m
Außendurchmesser	1 m

#### Abmessungen des Kohlesteinaufbaus

Seitenisolierung	
Innendurchmesser	6 m
Außendurchmesser	8 m
Höhe	12,6 m
Deckenisolierung	
Durchmesser	6 m
Dicke	1 m
Bodenisolierung	
Durchmesser	6 m
Dicke	0,6 m

#### Abmessungen der Kaltgassammelkammer

Höhe	1,2 m
Außendurchmesser	7 m
Innendurchmesser	6 m
Wandstärke	0,02 m

### 3.3.2 Konstruktiver Aufbau des Graphits und Kohlesteins

Der untere Boden des Reaktors ist aus sechskantigen Graphitsäulen von 400 mm Länge und 253,8 mm Schlüsselweite aufgebaut. Auf dieser Schicht liegt eine Kohlesteinschicht von 0,6 m. Auf dieser unteren Isolierschicht befindet sich eine metallische Trennfolie sowie eine Lage von 60 cm Graphit, die der Auskleidung der Heißgaskammer zum Schutz gegen Korrosion dient. Die Heißgaskammer wird aus runden Säulen von 80 cm sichtbarer Höhe ( $\emptyset$ : 10 cm) gebildet, auf diesen Säulen baut sich die Reflektorbodenkonstruktion auf. Sie besteht aus Sechskantsäulen mit einer Schlüsselweite von 253,8 mm. Durch entsprechende Bohrungen in dieser Konstruktion wird der Gasfluß vom Core zur Heißgaskammer ermöglicht. In der Mitte des Corebodens befindet sich die Durchführung für den Kugelabzug, die ebenfalls als Graphitrohr ausgeführt ist. Im unteren Teil ist dieses Rohr innen durch einen Metallzylinder verstärkt. Auf die untere Graphitlage ist der Seitenreflektor aufgesetzt. Jede Lage besteht aus 72 Segmentsteinen, die sich nach innen hin verjüngen. Die Höhe jeder Lage beträgt 25 cm. Um eine Führung des Kaltgases von der unteren Kaltgassammelkammer zum oberen Kaltgassammelraum zu ermöglichen, ist jeder dieser Steine mit einer Bohrung versehen. Diese Bohrung befindet sich am Außenrand des Segmentes. Zur Gewährleistung der mechanischen Stabilität des Graphitaufbaus werden die Steine außen untereinander durch Paßfedern verbunden.

Im untersten Bereich des Graphitreflektors liegt die ringförmige, metallische Kaltgassammelkammer. Sie besitzt am oberen Deckel 72 Öffnungen mit Anschlußstutzen, aus denen heraus das Kaltgas in die Reflektorbohrungen eingeleitet wird (siehe Abb. 7).

Weiterhin sind in den untersten Schichten des Seitenreflektoraufbaus 3 Öffnungen von 80 cm Durchmesser für den Austritt des Heißgases aus der Heißgaskammer vorgesehen. Hierfür sind Gewölbekonstruktionen aus Graphitsteinen vorgesehen.

An der Außenseite der Seitenreflektorkonstruktion befindet sich zunächst eine Metallfolie, die für annähernde Gasdichtigkeit sorgt.

Die Wärmeisolierung und Abschirmung der stehenden Linerringwand wird durch eine 1 m dicke Kohlesteinschicht gewährleistet. Sie besteht in jeder Lage aus 42 Segmentsteinen mit 1 m Länge, 0,5 m Höhe und 0,6 m Außenkantenlänge. Diese Kohlesteine werden in radialer Richtung zum Liner hin mit vorgefertigten Graphitplatten angepaßt. In azimuthaler Richtung erfolgt die Anpassung durch bearbeitete Schlußsteine.

Die Deckenisolierung sowie der Deckenreflektor werden aus hexagonalen Kohlestein- bzw. Graphitblöcken ausgeführt. Sie sind durch einen Stahlstab miteinander verbunden und mit Hilfe eines Hakens

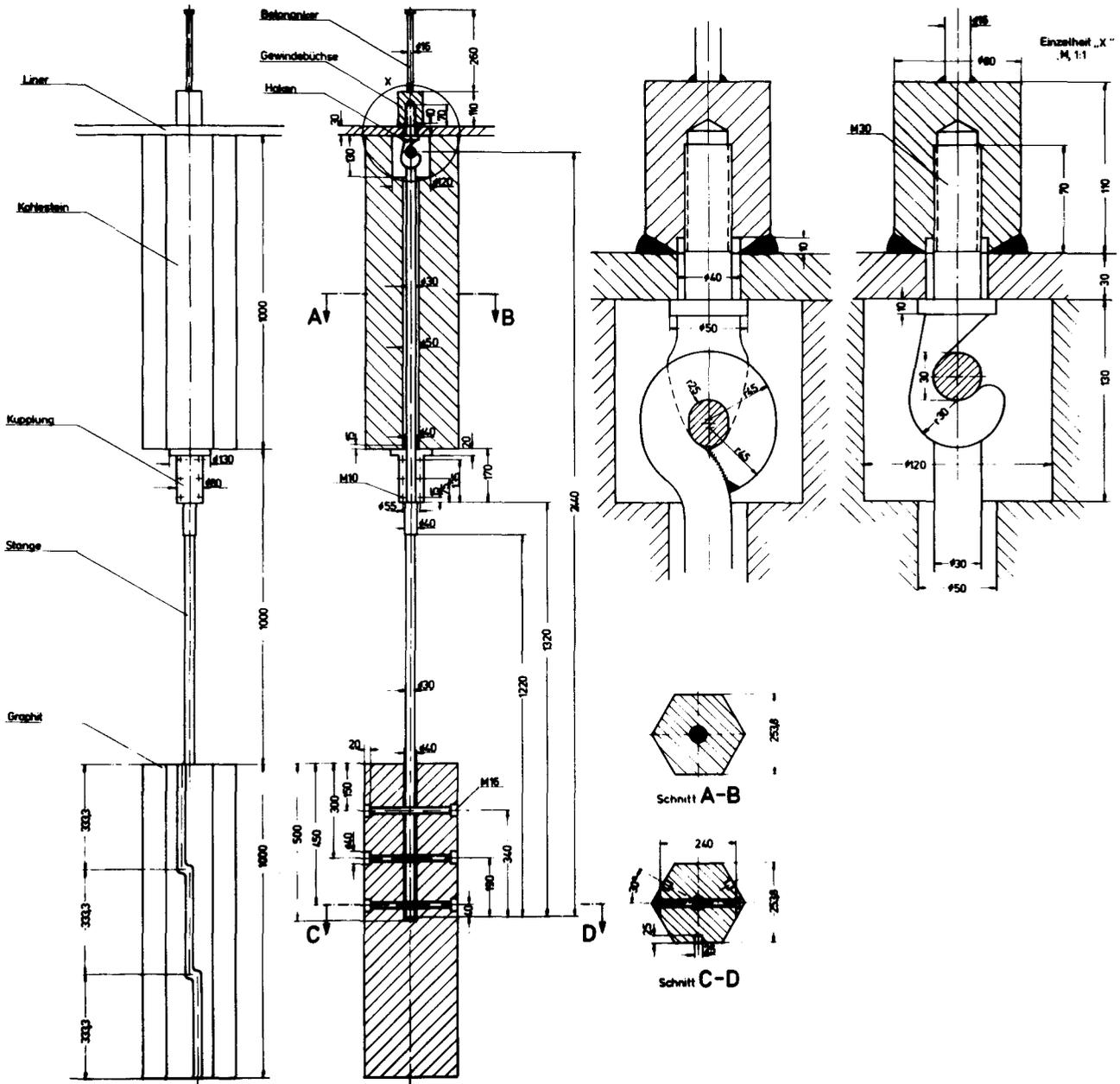


Abb. 6: Aufhängung der Coredecke

und einer Öse an der Unterseite des Deckenliners aufgehängt. Der Graphitblock ist mit Hilfe mehrerer Querbolzen an diesem Stahlstab aufgehängt. Die Anordnung der Stahlteile wird hierbei so gewählt, daß durch Einhaltung einer stahlfreien Graphitzone zum Core hin keine unzulässigen schnellen Neutronendosen auftreten können (s. Abb.6).

Der hexagonale Kohlesteinblock besitzt eine zentrale Bohrung. Er kann auf den Stahlstab geschoben werden und dann mit einer Kuppelung gegen den Liner angepreßt werden. Diese Konstruktion, bestehend aus 1 m dicker Kohlesteinisolierung,  $\approx$  1 m freiem Raum für die Gassammlung und Beruhigung sowie 1 m Graphit als oberem Deckenreflektor, erfordert keine Anpassung zwischen Seiten- und Deckenreflektor. Die Graphitblöcke erhalten, um einen Kühlgasfluß zu ermöglichen, versetzt angeordnete Ausfräsungen an den Oberflächen. Durch die Deckenkonstruktion werden 19 Abschaltstabpositionen sowie 7 Brennelement-Zugaberohre durchgeführt. Hierdurch bedingt sind an den jeweiligen Stellen die umgebenden Graphit- und Kohlesteinblöcke anzufräsen. Im Bereich des oberen Gassammelraumes sind für jede Position Führungsrohre vorgesehen.

### 3.3.3 Werkstoffe

Da die Anlage für eine Standzeit von etwa 20 Jahren ausgelegt ist und eine Reparaturmöglichkeit für die Einbauten im allgemeinen nicht gegeben sein dürfte, sind hohe Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe zu stellen. Beim Graphitaufbau sind diese Beanspruchungen besonders durch Temperatur, Bestrahlung, Druck und Korrosion gegeben.

Die sich aufgrund der Bestrahlung ergebenden Spannungen und Schrumpfungen sind im wesentlichen nur im obersten Teil des Seitenreflektors sowie im Deckenreflektor von Interesse, da nur hier hohe Dosen auftreten. Durch den hier gewählten Konstruktionsaufbau und da die bestrahlten Einbauten auf niedriger Temperatur liegen (300 ... 400 °C) können diese Effekte gut beherrscht werden. Eine Korrosion der Graphitaufbauten durch Wasser, CO<sub>2</sub> und andere Gasverunreinigungen wird durch Einhaltung der Spezifikationen auf die zulässige Oxidationsrate beschränkt.

Mechanische Beanspruchungen des Coreaufbaus treten hauptsächlich durch das Eigengewicht des Seitenreflektors sowie durch das Gewicht der Kugelschüttung auf. Weiterhin müssen die Kräfte, die durch den Druckabfall des Kühlgases, das Einfahren der Abschaltstäbe sowie durch Dehnungen im Aufbau beim An- und Abfahren hervorgerufen werden, berücksichtigt werden. Die Druck- und Biegefestigkeiten der verwandten Materialien reichen zur Aufnahme dieser Beanspruchungen jedoch bei weitem aus, weiterhin ist durch die gewählte Anordnung der Coreaufbauten dafür Sorge getragen, daß alle Kräfte auf die Liner-, d.h. Spannbetonkonstruktion, übertragen werden.

Hohe Forderungen an die Strahlenresistenz des Graphits sind nur im oberen Bereich des Seitenreflektors ( $\approx 3$  m Höhe) und im Bereich des Deckenreflektors zu stellen ( $\int \phi dt \approx 4 \cdot 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> (E > 0,1 MeV)). Ansonsten können normal erprobte Reflektorgraphitqualitäten mit den üblichen Spezifikationen eingesetzt werden.

$$\rho \approx 1,7 \text{ g/cm}^3$$
$$\sigma_a \approx 4,5 \text{ m b}$$

Oxidationsrate  $\approx 0,15$  mg/cm<sup>2</sup>h bei 900 °C (10 h 1 Vol.% H<sub>2</sub>O in He von 1 at)

"  $\approx 0,7$  " " " 1000 °C "

$\lambda \approx 105$  Kcal/mh°C (20 °C)

$\alpha \approx 4 \cdot 10^{-6}$  °C<sup>-1</sup>

$\sigma$  Biege  $\approx 200$  kp/cm<sup>2</sup>

$\sigma$  Druck  $\approx 600$  kp/cm<sup>2</sup>

Bruchdehnung  $\approx 0,2$  %

E  $\approx 10^5$  kp/cm<sup>2</sup>

### 3.3.4 Stabilität des Aufbaus

Durch unterschiedliche Wärmedehnungen sowie Schrumpfungen unter Bestrahlung treten Dimensionsänderungen im Aufbau auf. Die hier gewählte Konstruktion vermeidet die sich hieraus ergebenden Zwangskräfte dadurch, daß eine ausreichende Bewegung der Einzelkomponenten zugelassen wird. Günstig für den Aufbau ist besonders, daß strahlungsinduziertes Schrumpfen der Vorderkanten der Seitenreflektorsteine nur in den obersten Schichten zu erwarten ist. Im unteren Teil und besonders im Coreboden liegen die Dimensionsänderungen unter 0,5 %. Dadurch ist z.B. ein Neigen aller Säulen des Corebodens auszuschließen. Der tragende Teil des Seitenreflektors hat nur stabil gegenüber thermischen Dehnungen zu sein, dies wird durch Verkeilen und Vorgabe ausreichender Toleranzen erreicht. Ein unzulässiger Preßdruck auf die Kohlesteinwand wird dadurch verhindert, daß zwischen Graphit und Kohlestein im kalten Zustand ein ausreichender Abstand vorhanden ist.

Die Seitenkräfte, die im wesentlichen beim Einfahren der Abschaltstäbe auf die Konstruktion ausgeübt werden, werden durch die Graphit- und Kohlesteinwand auf die Behälterinnenwand übertragen. Im übrigen sind diese Kräfte relativ gering, da nur eine Einfahrtiefe von  $\approx 2$  m in den Kugelhaufen erforderlich ist.



### 3.3.5 Untere Kaltgassammelkammer (siehe Abb. 7)

An der Außenseite der Kammer sind um  $120^\circ$  versetzt 3 Kaltgasrohrsysteme angeschweißt, deren innerer Durchmesser 1000 mm beträgt. An der nach innen gekehrten Seitenwand der Kammer befinden sich 72 Bohrungen von jeweils 10 cm Durchmesser, von denen aus über kurze eingeschweißte Rohrkrümmer das Kaltgas in die Reflektorbohrungen eingeleitet wird. Im Bereich der 3 Kaltgasrohre befinden sich Rohrstützen für die Durchführungen der Heißgasrohre. Diese Rohrstützen sind mit Abstandsstegen an das Kaltgasrohr angeschweißt. Gegenüber statischen und dynamischen Lasten im Betrieb ist die Konstruktion mit einer Wandstärke von 2 cm stark überdimensioniert. Als Werkstoff wird 13 CrMo 44 gewählt. Die thermischen Dehnungen beim Anfahrvorgang (Aufheizen der Konstruktion von  $20^\circ\text{C}$  auf  $250^\circ\text{C}$ ) werden dadurch beherrscht, daß die Metallkonstruktion im kalten Zustand entsprechende Bewegungsfreiheit im Graphit- und Kohlesteinaufbau besitzt.

Aufgrund der Methode der Einwegbeschickung treten im Bereich der Kaltgaskammer im Laufe der Lebenszeit der Anlage nur Bestrahlungsdosen auf, die unter  $10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> liegen, d.h. zu keiner Strahlenschädigung des Materials führen.

### 3.3.6 Trennfolie zwischen Graphit und Kohlestein

Als annähernd gasdichte Trennung zwischen seitlichem Reflektorgraphit und seitlicher Kohlesteinisolierung fungiert eine metallische Konstruktion, die in Form eines Paketes aus mehreren dünnen Metallfolien zusammengeschweißt und in Stücken von  $1\text{ m}^2$  aneinandergeschweißt wird. Ihre Aufgabe ist es, dafür Sorge zu tragen, daß die Gasreinigung ständig mit Gas aus dem Bereich des Kohlesteins versorgt wird und daß insbesondere der Hauptkühlgasstrom nicht mit dem Kohlestein in Berührung kommt. Hierdurch wird die Effektivität der Gasreinigungsanlage erhöht und dafür gesorgt, daß vorhandene Verunreinigungen praktisch direkt in der Gasreinigungsanlage entfernt werden. Auch die Tritiummenge im Kühlkreislauf, die auf die Umwandlung des im Kohlestein enthaltenen  $\text{Li}^6$  durch (n, $\alpha$ )-Reaktion zurückgeführt wird, kann durch diese Trennung von Graphit und Kohlestein begrenzt werden.

Die Folie wird am unteren Ende an die Oberkante der Kaltgaskammer angeschweißt. Aufgrund ihrer Verformbarkeit ist sie in der Lage, Dimensionsänderungen der keramischen Aufbauten bei An- und Abfahrvorgängen zu gewährleisten. Die Gesamtabmessungen der Folienkonstruktion sind 6 m Durchmesser, 9 m Höhe, 0,5 cm Dicke. Im Bereich der Reaktorbodenkonstruktion befindet sich aus den schon erwähnten Gründen der Gastrennung zwischen der Graphitlage in der Heißgaskammer und der nach unten daran anschließenden Kohlesteinisolierung ebenfalls eine Metallfolie, die jedoch praktisch keiner Bestrahlung ausgesetzt ist.

### 3.4 Dampferzeuger (siehe Abb. 8)

Durch die Loopbauweise der Dampferzeuger mit freier Aufstellung im Containment wird ein erheblicher Freiheitsgrad in der Anordnung und Gestaltung der Heizflächen sowie der Gasführung gewonnen. Unter den Gesichtspunkten einfacher Fertigung und leichter Prüfbarkeit erscheint die Mäander-Dampferzeugerbauart für den vorliegenden Fall optimal. Diese Heizflächenanordnung ist aus dem konventionellen Kesselbau sowie von den AGR-Anlagen her bekannt und erprobt.

Die drei Dampferzeugereinheiten sind um  $120^\circ$  versetzt um den Spannbetonbehälter herum angeordnet. Die Verbindung zum Reaktordruckgefäß erfolgt durch eine Koaxialleitung sowie durch mechanische Halterungen, die die Gaskräfte in den Spannbetonbehälter einleiten. Die Dampferzeugerdruckbehälter sind auf Betonsockeln fest verankert. An jeden Dampferzeuger ist ein Gebläse angeflanscht. Das Wärmeübertragungsmedium Helium strömt zunächst aus der Heißgaskammer kommend durch das Heißgasrohr der Koaxialleitung und tritt sodann durch eine trichterförmige Gasleitblechkonstruktion in den zentralen Bereich des Dampferzeugers, in dem die Heizflächen liegen, ein. Das Helium wird im gesamten Bereich der Heizflächen durch einen quadratischen Gasleitblechkörper nach oben geführt. Die Rohrpakete sind sämtlich an den Speisewasserzuleitungsrohren aufgehängt bzw. angeschweißt. Überhitzer und Verdampfer sind im Gleichstrom geschaltet, während der Economizer im Gegenstrom betrieben wird.\* Durch den oberen Deckel des Druckbehälters werden jeweils 40 Speisewasserzuführungen sowie 40 Heißdampfausführungen durchgeführt. Der Dampferzeugerdruckbehälter wird durch den abwärtsströmenden Heliumstrom von  $250^\circ\text{C}$  gekühlt. Die Fertigung und Prüfung dieses Druckbehälters unterliegt ähnlichen Bedingungen, wie sie heute aus der Technik der Wasserreaktordruckgefäße bekannt sind.

---

\* Durch ein hohes Temperaturgefälle zwischen Helium- und Wasserseite in allen Teilen des Dampferzeugers wird eine relativ hohe Heizflächenbelastung ermöglicht. (Siehe Abb. 9)



## DAMPFERZEUGERDATEN

Zahl der Dampferzeuger	3 Stück
<u>Daten auf der Wasserseite:</u>	
Thermische Leistung	166,66 MW
Zwischenüberhitzung	keine
Dampfzustand	530 °C/155 at
Speisewassereintritt	120 °C/175 at
Dampfmenge	209,7 t/h
<u>Daten auf der Heliumseite:</u>	
Heliumeintrittstemperatur	850 °C
Heliumaustrittstemperatur	250 °C
Heliumeintrittsdruck	39,3 at
Heliumaustrittsdruck	38,9 at
Heliumdurchsatz	52,9 kg/sec
<u>Daten der Heizflächen:</u>	
Ecofläche	475 m <sup>2</sup> /DE
Verdampferfläche	150 m <sup>2</sup> /DE
Überhitzerfläche	140 m <sup>2</sup> /DE
Zahl der Stränge pro DE	40 (80 innere zu 40 zusammengefaßt)
Abmessungen der Rohre:	
Überhitzer	26,9 · 3,6 je 50 % mm 26,9 · 5,6
Verdampfer	26,9 · 3,6 mm
Eco	26,9 · 3,6 mm
<u>Daten für Druckbehälter:</u>	
Maximaltemperatur	300 °C
Maximaldruck	48 at
Innendurchmesser	2264 mm
Innenhöhe gesamt	12750 mm
Wandstärke	50 mm (im unteren Bereich 68 mm)
<u>Betriebsbedingungen:</u>	
Lastbereich	70 - 100 %
Lastwechsel	500 mal an- und abfahren
Materialien	keine nuklearen Be- dingungen (keine Strah- lung, d.h. keine Werk- stoffbeschränkungen)
Nachwärmeabfuhr	mit einem DE

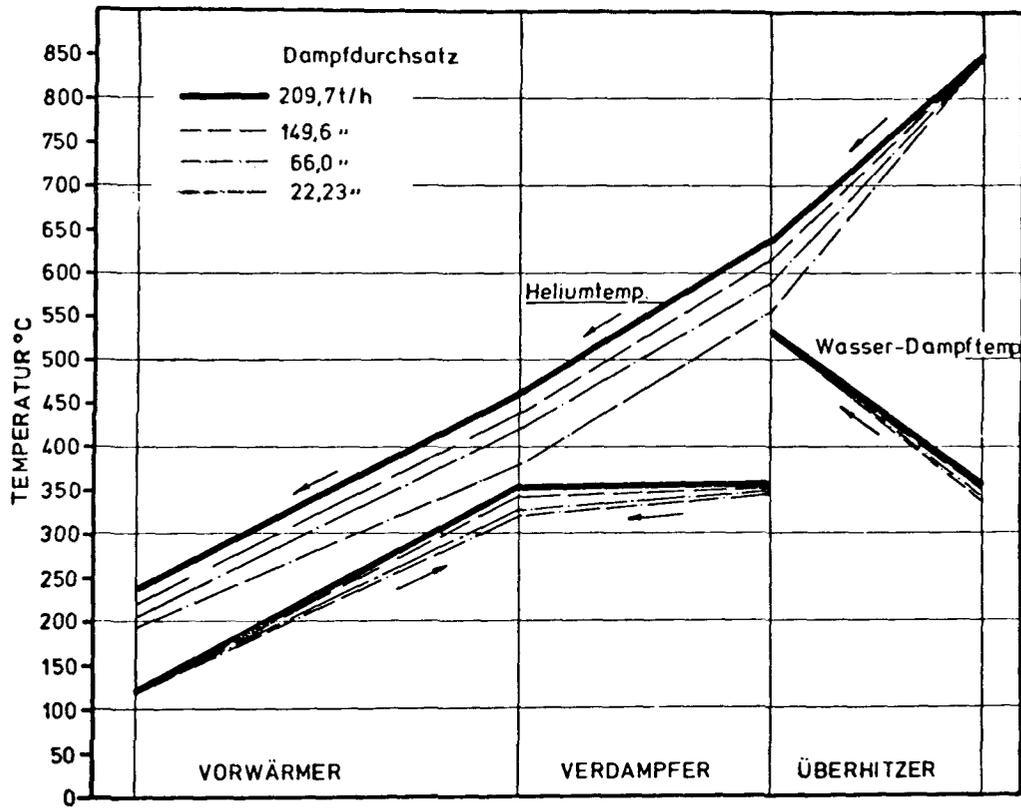


Abb. 9: Temperaturen im Dampferzeuger

### 3.5 Koaxialleitungen (siehe Abb. 10)

Diese Bauelemente sind in der Kerntechnik keine völlig neuartigen Komponenten. Bei den ersten AGRs sowie im Peach Bottom sind ähnliche Rohrleitungen bereits zum Einsatz gekommen.

Da die Dimensionen hinreichend klein sowie die Druckschwankungen im Primärkreis sehr gering sind, ist das Rohrsystem für die vorliegenden Belastungen sicher auslegbar. Es muß jedoch dafür Sorge getragen werden, daß die Heliumfüllung des Primärsystems bei Schäden am Koaxialrohr nicht schlagartig, d.h. in wenigen Sekunden verloren gehen kann. In einem derartigen Störfall wären Schäden an den übrigen Koaxialrohren, die für die Abfuhr der Nachwärme bereitstehen müssen, nicht auszuschließen. Es wird daher eine Strömungsbegrenzung vorgesehen, die dafür sorgt, daß bei Schäden am Koaxialrohr das Gas durch Öffnungen von zusammen nur  $\approx 30 \text{ cm}^2$  ausströmen kann. In diesem Fall bleiben die zeitlichen Druckgradienten tolerabel.

Technisch verwirklicht werden kann diese Strömungsbegrenzung durch ein innen im Kaltgasrohr angeordnetes zweites Rohr, das im Normalbetrieb drucklos ist und eine freie Querschnittsfläche von  $\approx 30 \text{ cm}^2$  zum drucktragenden Kaltgasrohr hin besitzt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, diese Strömungsbegrenzung mit entsprechenden freien Strömungsquerschnitten außen um das Kaltgasrohr herum anzuordnen und mit dieser Konstruktion den ohnehin erforderlichen Splitterschutz zu kombinieren. In Tab. 2 sind die wichtigsten Auslegungsdaten für die Koaxialleitungen zusammengestellt.

Zahl der Koaxialrohre	3 Stück
Außendurchmesser des Heißgasrohres	810 mm
Innendurchmesser des Heißgasrohres	800 mm
Länge des Heißgasrohres	8,25 m
Außendurchmesser des Kaltgasrohres	1120 mm
Innendurchmesser des Kaltgasrohres	1040 mm
Länge des Kaltgasrohres	2,6 m
Heliumeintrittstemperatur für Heißgasrohr	865 °C
Heliumaustrittstemperatur für Heißgasrohr	850 °C
Heliumeintrittstemperatur für Kaltgasrohr	257 °C
Heliumaustrittstemperatur für Kaltgasrohr	275 °C
Heliumdruck im Heißgasrohr	39,5 at
Heliumdruck im Kaltgasrohr	40 at
Mittlere Wandtemperatur Heißgasrohr	$\approx 480 \text{ °C}$
Mittlere Wandtemperatur Kaltgasrohr	$\approx 250 \text{ °C}$
Druckbelastung des Heißgasrohres	0,5 at
Druckbelastung des Kaltgasrohres	40 at
Zeitlicher Druckgradient im Störfall	$\approx 1 \text{ at/sec}$

TAB. 2: Daten Koaxialleitungen

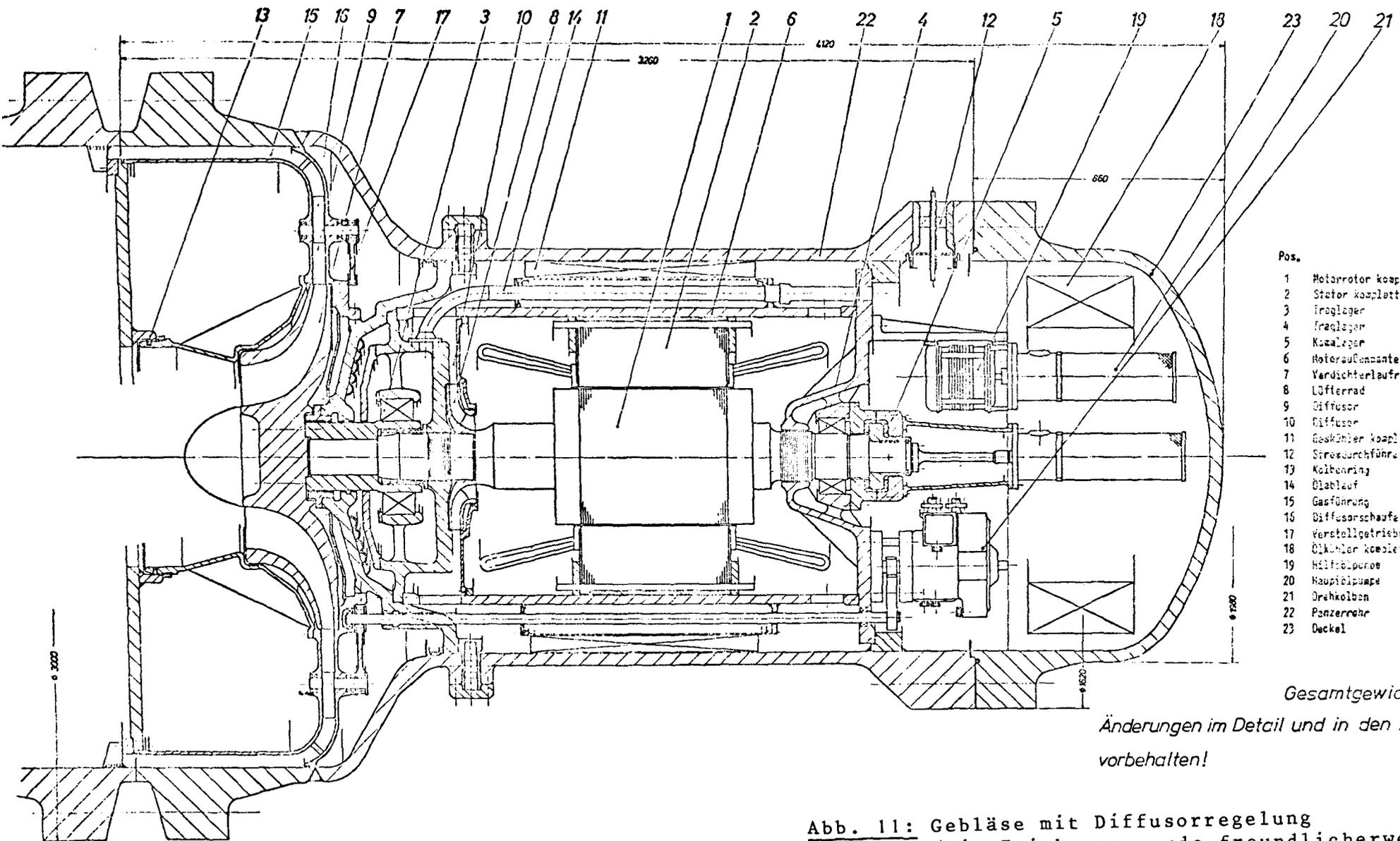


### 3.6 Gebläse (siehe Abb. 11 und 12)

Die Kühlgasgebläse werden hängend unter den Dampferzeugern angeordnet. Da sie völlig außerhalb des Strahlungsfeldes des Reaktors liegen, erübrigt sich eine besondere Abschirmung; es ist lediglich den Erfordernissen, die durch die erwartete niedrige Kühlgasaktivität ( $\approx 0,3 \text{ Ci/Nm}^3$ ) auftreten, Rechnung zu tragen. Die Ölversorgung der Gebläse ist voll integriert und entsprechend den Verfügbarkeitsforderungen redundant ausgelegt. Die Trennung zwischen Primärkreis und mit Öl beaufschlagtem Raum wird durch Gasabsaugung aus dem Bereich der Lagerstellen gewährleistet. Die Mengenregelung erfolgt durch Diffusorverstellung. Ansonsten kann davon ausgegangen werden, daß die konstruktiven Einzelheiten ähnlich denjenigen beim THTR-Projekt sind.

#### Daten

Anzahl	3 Stück
Ansaugdruck	38,9 at
Enddruck	40 at
Ansaugtemperatur	250 °C
Austrittstemperatur	257 °C
Fördermenge	53,5 kg/sec
Gebläsedrehzahl	3000 U/min
Leistungsbedarf an der Nabe	2,14 MW
Motorklemmenleistung	2,40 MW
Abgezogene Sperrgasmenge	3,4 Nm <sup>3</sup> /h
Sperrgaseintrittstemperatur	250 °C
Laufreddurchmesser	1350 mm
Flanschdurchmesser	2860 mm
Länge des Druckkörpers	4120 mm



- | Pos. |                                |
|------|--------------------------------|
| 1    | Motorrotor kompl. Gebläsewelle |
| 2    | Stator kompl.                  |
| 3    | Traglager                      |
| 4    | Traglager                      |
| 5    | Kegelrad                       |
| 6    | Motoraußenmantel               |
| 7    | Verdichterlauftrud             |
| 8    | Lüfterrad                      |
| 9    | Diffusor                       |
| 10   | Diffusor                       |
| 11   | Geschönter kompl.              |
| 12   | Stromdurchführung              |
| 13   | Kolbenring                     |
| 14   | Ölablauf                       |
| 15   | Gasführung                     |
| 16   | Diffusorschaukel               |
| 17   | Verstellgetriebe               |
| 18   | Ölkühler kompl.                |
| 19   | Hilfölpumpe                    |
| 20   | Hauptölpumpe                   |
| 21   | Drehkolben                     |
| 22   | Panzerring                     |
| 23   | Deckel                         |

Gesamtgewicht ca. 32 to  
 Änderungen im Detail und in den Abmessungen  
 vorbehalten!

**Abb. 11:** Gebläse mit Diffusorregelung  
 (Die Zeichnung wurde freundlicherweise  
 von der BST Mannheim zur Verfügung ge-  
 stellt.)

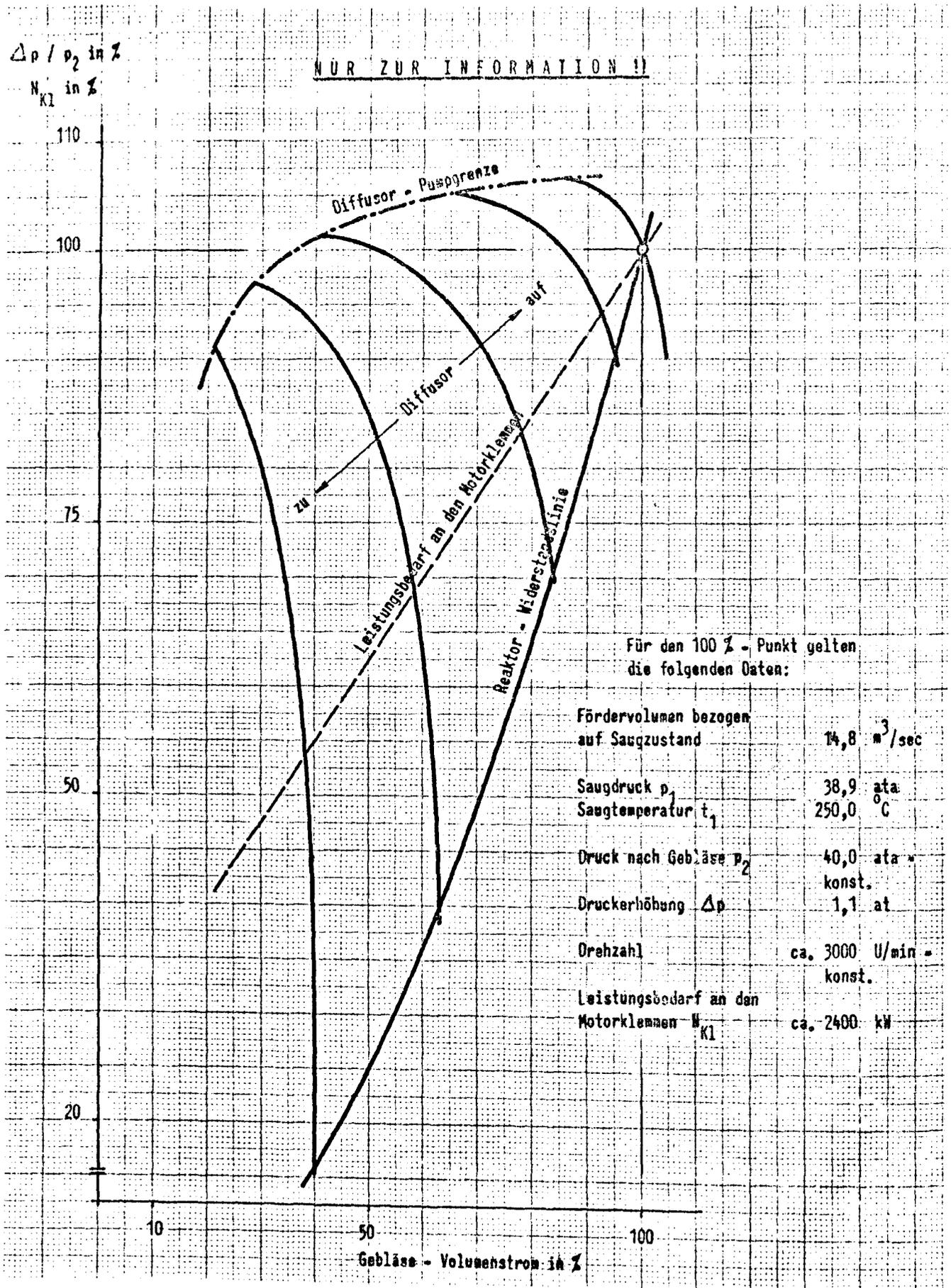


Abb. 12: Kennfeld des Gebläses mit Diffusorregelung  
 (Die Zeichnung wurde freundlicherweise von der BST Mannheim zur Verfügung gestellt.)

### 3.7 Beschickungsanlage

Diese Reaktorkomponente hat folgende drei Aufgaben zu erfüllen:

- (a) Kontinuierliche Zugabe frischer Brennelemente in den Reaktor.
- (b) Entnahme abgebrannter Brennelemente aus dem Reaktor.
- (c) Verteilung von 2 Kugeltypen unterschiedlicher Anreicherung auf ein Zweizonencore (um Egalisierung des Temperaturprofils am Reaktoraustritt zu erreichen).

Die Anlage besteht aus einem oberen Eingabeteil, der sich im Bedienungsraum oberhalb des Spannbetonbehälters befindet, und einem unteren Entnahmekomplex, der im Ringmauerraum unterhalb des Spannbetonbehälters angeordnet ist.

Das Eingabesystem umfaßt folgende Komponenten: 1 Eingabebox, 3 Schleusenventile (NW 65), 1 Reparaturventil (NW 65), 1 Brennelement-Verteilermaschine, 7 Fallrohre (NW 65), sowie die zugehörigen Verbindungsleitungen (NW 65). Zusätzlich ist ein Spülsystem (NW 10) installiert, das eine Heliumflasche (100 atü) sowie die entsprechenden Ventile (NW 10) sowie Leitungen umfaßt. An Meßgeräten sind einige Manometer sowie ein Brennelementzählgerät (z.B. Messung mit Induktionsspule) vorgesehen.

Das Entnahmesystem besteht aus folgenden Komponenten: 1 Verweniger bestehend aus einer Lochscheibe mit Antrieb und Abschirmung, einem unter 30° geneigten Fallsystem bestehend aus 3 Ventilen (NW 200), einem Flansch (NW 200), 1 Abschirmorgan (NW 200), 1 Transportbehälter für abgebrannte Brennelemente (ca. 1 m<sup>3</sup> Inhalt, 40 at) mit Abschirmung. Zusätzlich wird auch hier ein Spülsystem (Heliumflasche, Ventile und Rohrleitungen NW 10) benötigt. Als Meßgrößen werden an diesen Anlageteilen Druck und Brennelementzahlen erfaßt.

Der Ablauf des Beschickungsvorganges sei hier anhand von Abb. 13 dargestellt.

Es werden 10 Brennelemente, in Kunststoffschläuchen verpackt, in die Eingangsbox eingegeben, hier wird die Verpackung entfernt, die Brennelemente werden einzeln in ein Fallrohr eingegeben.

Die Schleusenventile V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> sind geschlossen, der Raum zwischen V<sub>1</sub> und V<sub>2</sub> wird sodann zum Heliumlager hin druckentlastet. V<sub>1</sub> wird geöffnet, die 10 Brennelemente rutschen in den Zwischenraum zwischen V<sub>1</sub> und V<sub>2</sub>. Nach Schließen von V<sub>1</sub> wird dieser Raum evakuiert und mit Frischhelium gespült, das Gas wird über das Mischbett zum Kamin abgegeben. Danach wird dieser Zwischenraum mit Frischhelium wieder auf 40 at aufgepumpt.

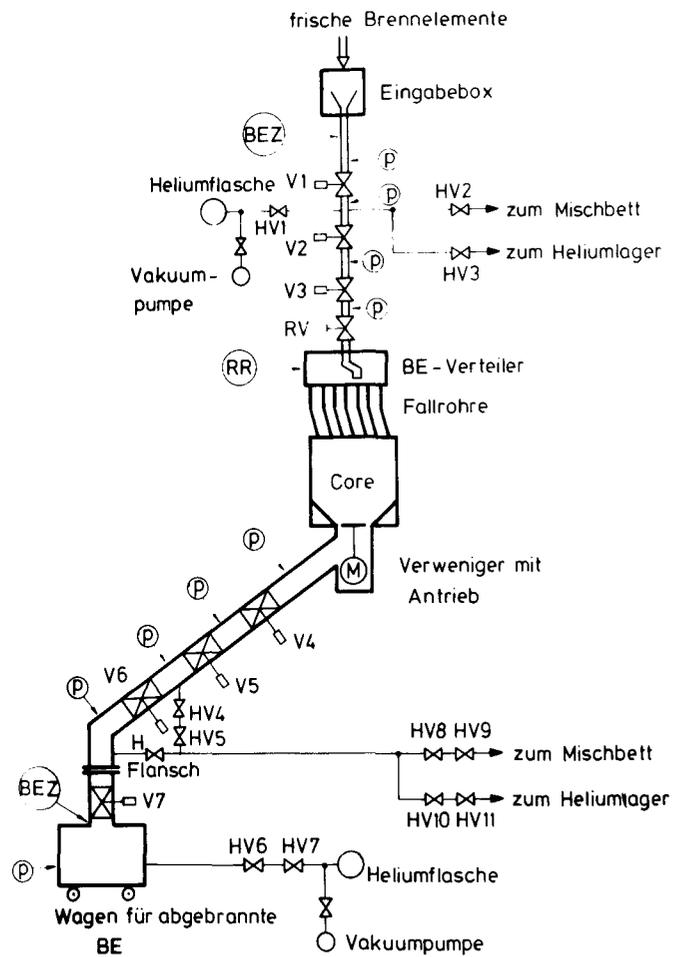


Abb. 13: Fließschema zur Beschickungsanlage

Nun wird Ventil  $V_2$  geöffnet, die Brennelemente gelangen in den Raum zwischen  $V_2$  und  $V_3$ , wo der Druck 40 at beträgt. Nach Öffnen von  $V_3$  (das Reparaturventil RV ist im Normalbetrieb stets geöffnet) rutschen die Brennelemente in den Verteiler. Hier erfolgt je nach Stellung der Lochscheibe eine Verteilung der Brennelemente auf eine zentrale oder 6 periphere Positionen. Der Verteiler wird praktisch immer nur dann betätigt, wenn die Beladung einer Position für einen repräsentativen Zeitraum ( $\sim 1$  Woche) durchgeführt ist.

Aus dem Verteiler heraus fallen die Brennelemente durch einfache Fallrohre, die bis in den Deckenreflektor hinein geführt werden, auf die Coreoberfläche.

Nach Durchlauf durch das Core werden die abgebrannten Brennelemente über den Kugelabzug entnommen. Am unteren Ende des Kugelabzugrohres ist eine Eisenscheibe (1 Loch NW 65) mit senkrecht stehender Antriebswelle und Motor angeordnet. Dieser Apparat sorgt für die "Verwenigung" der Brennelemente. Durch ein angeschlossenes, unter  $35^\circ$  geneigtes angeordnetes Ventilsystem gelangen die abgebrannten Brennelemente in den Brennelement-Transportbehälter.

Im Normalbetrieb sind die Ventile  $V_4$ ,  $V_5$ ,  $V_6$ ,  $V_7$  geöffnet, die Brennelemente können also unter Einfluß der Schwerkraft in den Wagen für abgebrannte Brennelemente hineingelangen. Dieser steht im Normalbetrieb unter Reaktordruck, d.h. 40 at, er hat ein Fassungsvermögen von  $\sim 5400$  Brennelementen, kann also bei Vollast etwa 7 Tage lang abgebrannte Brennelemente aufnehmen.

Nach Füllung muß dieser Behälter abgeflanscht werden und zu einer Endlagerungsstelle oder zum head-end einer Wiederaufarbeitungsanlage gebracht werden.

Der Abflanschvorgang verläuft dann folgendermaßen: Die Ventile  $V_4$ ,  $V_5$ ,  $V_6$ ,  $V_7$  werden geschlossen, der Brennelementewagen sowie die Rohrleitungen bis  $V_6$  werden zum Heliumlager hin druckentlastet. Danach wird mit Frischhelium gespült, das Spülgas wird über das Mischbett zum Kamin abgegeben. Nun wird  $V_7$  geschlossen.

Der Raum zwischen  $V_5$  und  $V_6$  wird bis auf 1 at Helium druckentlastet. Der Abflanschvorgang wird jetzt mit Hilfe der Technik der Abdichtung mit Kunststoffhüllen durchgeführt. Dabei wird die Leckage hinter  $V_5$  und  $V_6$  ständig kontrolliert.

Nach Anflanschen eines neuen Brennelement-Transportbehälters und entsprechenden Dichtigkeitsprüfungen werden zunächst der Behälter und die Rohrleitungen bis  $V_6$  evakuiert, gespült und dann auf 40 at Helium aufgepumpt. Danach wird auch der Zwischenraum zwischen  $V_5$  und  $V_6$  auf den Normaldruck 40 at gebracht.

Danach werden die Ventile  $V_4$ ,  $V_5$ ,  $V_6$ ,  $V_7^*$  geöffnet, und abgebrannte Brennelemente können wieder eingefüllt werden.

Es wird also sowohl beim oberen als auch beim unteren Teil der Beschickungsanlage immer das Prinzip beibehalten, daß alle grossen Ventile (NW 65, bzw. NW 200) nur im Zustand der Druckgleichheit auf beiden Seiten betätigt werden.

#### DATEN

##### (a) Allgemein:

Abmessungen der Graphitkugeln (BE)	$D = 60$	$+ 0$	mm
		$- 0,5$	mm
Zahl der Brennelemente im Core	550.000		
Zugabe frischer Brennelemente	$\approx 700/d$		
Entnahme abgebrannter Brennelemente	$\approx 700/d$		
Druck in allen Komponenten der Beschickungsanlage (außer Einfüllbox)	40 at		
Arbeitsgas	Helium aus Primärkreislauf oder Reihelium aus Flaschen		

##### (b) Oberes System:

Temperatur an Ventilen und Verteiler	50 °C
Temperatur an Box	20 °C
Nennweiten der Beschickungsrohre sowie der Schleusenventile und des Reparaturventils	65 mm
Betätigung der Ventile (NW 65)	Helium oder elektromotorisch
Nennweiten des Spülsystems und der Hilfsventile	10 mm
Spülflasche	100 atü
Abstand der Schleusenventile voneinander (Volumen für 10 BE)	$\approx 800$ mm
Leckage der Schleusenventile	$\approx 10^{-4}$ Torr ltr/sec
Betätigung des Verteilers	Helium
Fallhöhe der Kugeln von Ende Beschickungsrohr bis Kugelhaufenoberfläche	1500 mm
Neigung der Rohre zwischen Ventilen	min 15°

---

\*) Die Dichtfunktion von  $V_7$  kann mit dem beweglichen Abschirmorgan des Brennelementwagens kombiniert werden.

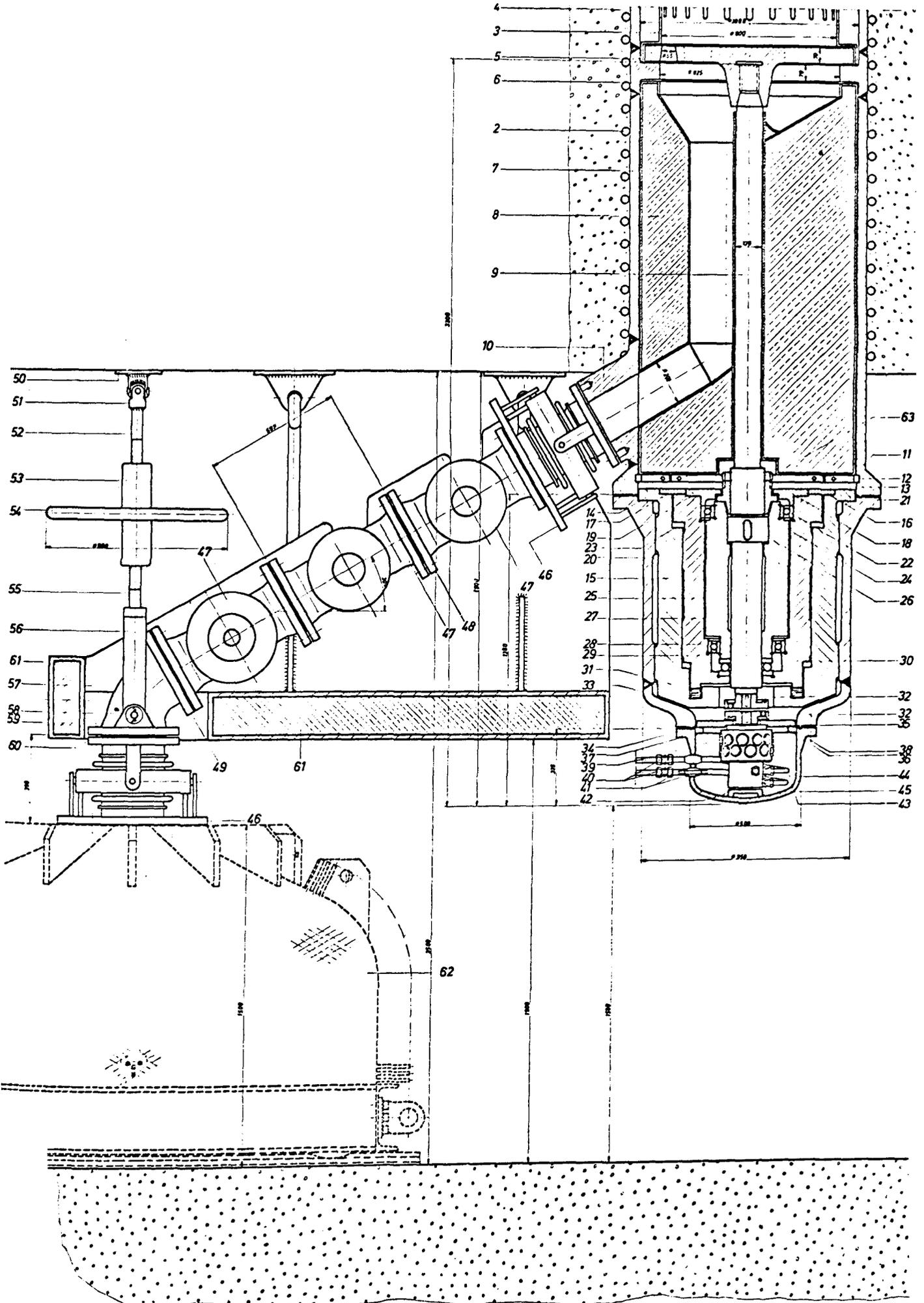
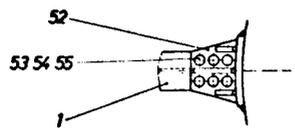
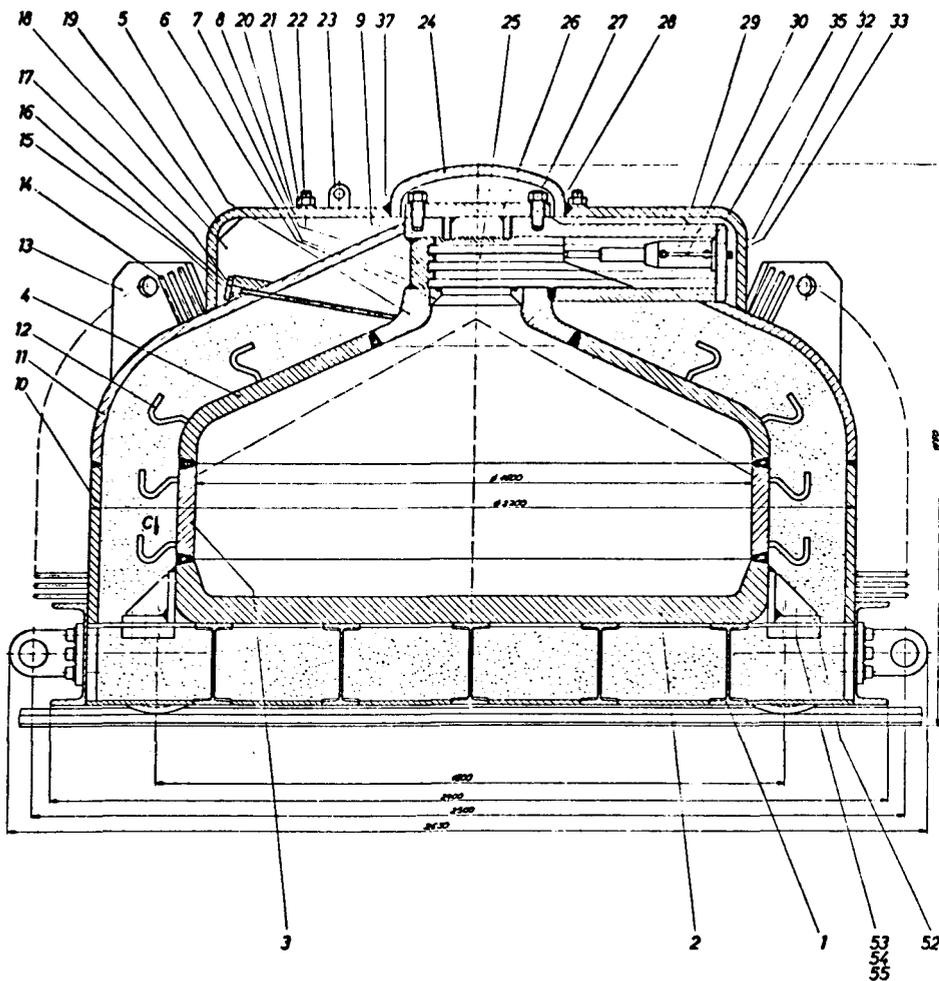
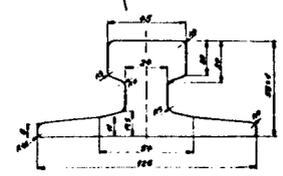
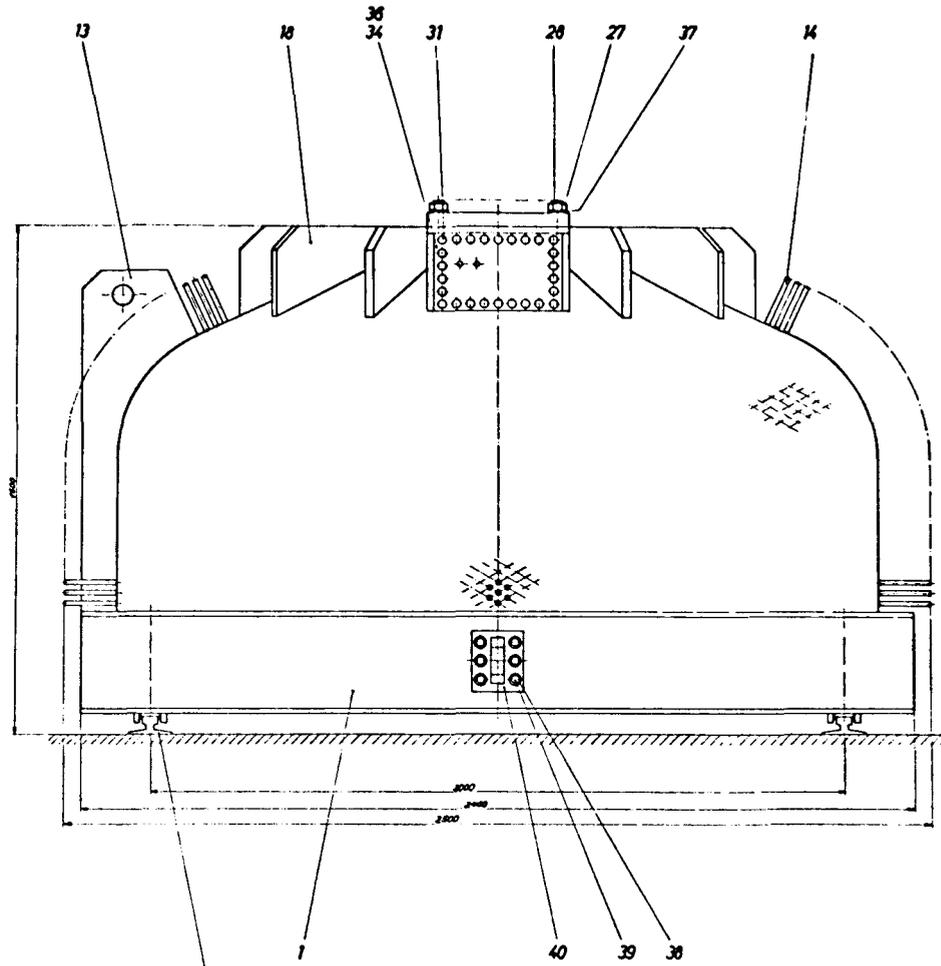


Abb. 14: Kugelabzug

Abb. 15: Brennelementwagen



Ansicht C



Kranschieme A45 DIN536

freies Innervolumen	125 m <sup>3</sup>
Füllvolumen	1059 m <sup>3</sup>
Füllmenge	5800 Brennelementkugeln
Auslegungsdruck	ND 64
Gesamtgewicht	40 000 kg

(c) Unteres System: (s. Abb. 14)

Temperatur an Lochscheibe	100 °C
Temperatur an Ventilen	50 °C
Temperatur im Brennelementwagen	≈ 200 °C
Nennweiten der Ventile und Rohre im BE-Weg	200 mm
Nennweiten der Spülleitungen und Ventile	10 mm
Spülflasche	200 atü
Flanschnennweite	200 mm
Leckage der Ventile im BE-Weg	≈ 10 <sup>-4</sup> Torr ltr/sec
Betätigung der Ventile (NW 200)	Helium oder elektromotorisch
Betätigung der Ventile (NW 10)	elektromotorisch
Neigung der Ventilstrecke	30 °

Brennelementwagen (siehe Abb. 15)

Betriebsdruck	40 at
Fassungsvermögen	5400 BE ( 1 m <sup>3</sup> )
max. Wärmeentwicklung bei ge- fülltem Behälter	≈ 8 kW
Wärmeabfuhr	durch Naturkonvektion von Oberfläche

Insgesamt verspricht die Einführung einer Einwegbeschickung gegenüber dem Mehrfachdurchlauf von Brennelementen große Vorteile. Verbesserungen auf der Seite der Beschickungsanlage sind wie folgt gegeben:

- (a) Keine Abbrandmeßanlage mehr.
- (b) Keine Umwälzanlage für Kugel erforderlich.
- (c) Kein Computer für Beschickungsvorgang notwendig.
- (d) Keine Handhabung aktiver Brennelemente (außer beim Abtransport von der Anlage weg).
- (e) Kein Brennelement-Zwischenlager erforderlich. (Die Elemente sind beim Abzug aus dem Reaktor weitgehend abgekühlt.)
- (f) Keine Weichen im Kugelweg.
- (g) Kein Schrottabscheider.
- (h) Austrag der Brennelemente aus dem Reaktor ohne Schleusen.
- (i) Alle Komponenten befinden sich im Reaktorbetriebsraum, sind leicht zugänglich und inspizierbar.
- (k) Einfache Steuerung des Betriebsablaufs.
- (l) Die Brennelemente werden mit gleichem Behälter zur Wiederaufarbeitung oder Endlagerung transportiert.

### 3.8 ABSCHALTSTÄBE

Die Absorberstabeinrichtungen haben die Aufgabe, jederzeit den Reaktor sicher abstellen zu können, Leistungsregelungen im Bereich 70 ... 100 % der Nennleistung sowie eine Temperaturregelung zu ermöglichen.

Durch die Reduzierung der erforderlichen Einfahrtiefe in den Kugelhaufen ist das Problem des Kugelzerbrechens praktisch beseitigt. Auch die Belastungen, denen der Stab selbst ausgesetzt ist, sind hier stark verringert. Der Absorberstab wird durch zwei konzentrische Rohre, deren Zwischenraum mit Absorbermaterial gefüllt ist, dargestellt. Die Stabspitze ist konkav ausgebildet. Durch Bohrungen im Stab im Bereich der oberen Kaltgasammelkammer wird dafür gesorgt, daß Helium mit 265 °C in den inneren Hohlraum des Stabes eintreten kann und die Wärme, die durch Neutroneneinfang im Absorbermaterial erzeugt wird, durch Konvektion abgeführt werden kann. Am unteren Teil der Spitze kann das Gas dann austreten. Die Strömung wird durch das Druckgefälle in der Kugelschüttung begünstigt. Wegen der Materialversprödung durch schnelle Neutronen ist alle 4 Jahre ein Auswechseln des unteren Teils der Stäbe erforderlich. Der Antrieb der Stäbe soll durch Spindeln und Elektromotoren erfolgen.

#### Daten

##### Erforderliche Reaktivitätswerte

Temperatur	4,7 %	$(\frac{\Delta k}{\Delta T} \approx 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
Vollast Xenon	4 %	
Xenon Override	2 %	
Np 239 Aufbau	0,5 %	
Mindestreserve	0,5 %	
Unsicherheit	1,3 %	$(\approx 10 \text{ \% des Wertes})$
	<u>13,0 %</u>	

Anzahl der Stäbe	19 Stück
Durchmesser der Stäbe	130 mm
Geschwindigkeit beim Schnellabschalten	30 cm/sec
Maximale Eindringtiefe beim Schnellabschalten	500 mm
Normale Stabgeschwindigkeit	2 cm/sec
Maximale Eindringtiefe	2500 mm
Maximale Spitzenkräfte	$\approx 700 \text{ kp/Stab}$
Antrieb der Stäbe	elektromotorisch

### 3.9 Gasreinigungsanlage, Gaskreisläufe (siehe Abb. 16 und 17)

Wegen des Verzichts auf eine Aktivreinigung hat diese Komponente nur die Aufgabe, den Pegel an Verunreinigungen durch  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  und  $H_2O$  im Primärkreislauf zu begrenzen.

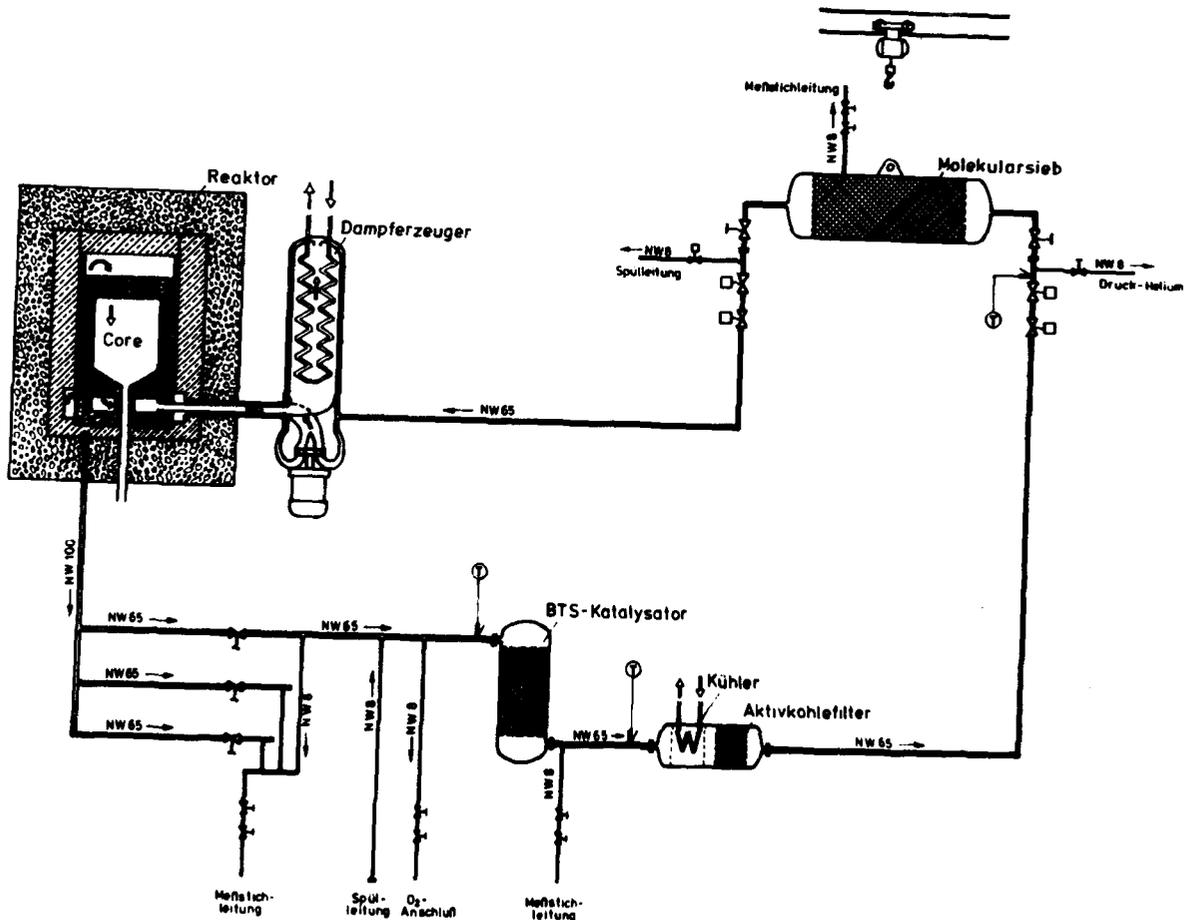


Abb. 16: Schema der Gasreinigungsanlage

Sie besteht aus drei parallel geschalteten Strängen, die jeweils einen  $CuO$ -Katalysator, einen Kühler, ein Aktivkohlefilter sowie ein Molekularsieb umfassen. Verunreinigtes Gas wird aus dem Reaktorbereich abgezogen, der die größten Verunreinigungen aufweist, dem Kohlestein. Das Gas wird an der Saugseite eines Gebläses wieder zurück in den Kreislauf gegeben. Durch Einschaltung eines Aktivkohlefilters in den Kreislauf können Spuren von Jod-131 vor Eintritt in das Molekularsieb entfernt werden. Die Regeneration des  $CuO$ -Bettes erfolgt durch Zugabe von Sauerstoff, eine Regenerierung des Molekularsieves kann durch Ausblasen mit trockenem Stickstoff oder trockener Luft erfolgen.

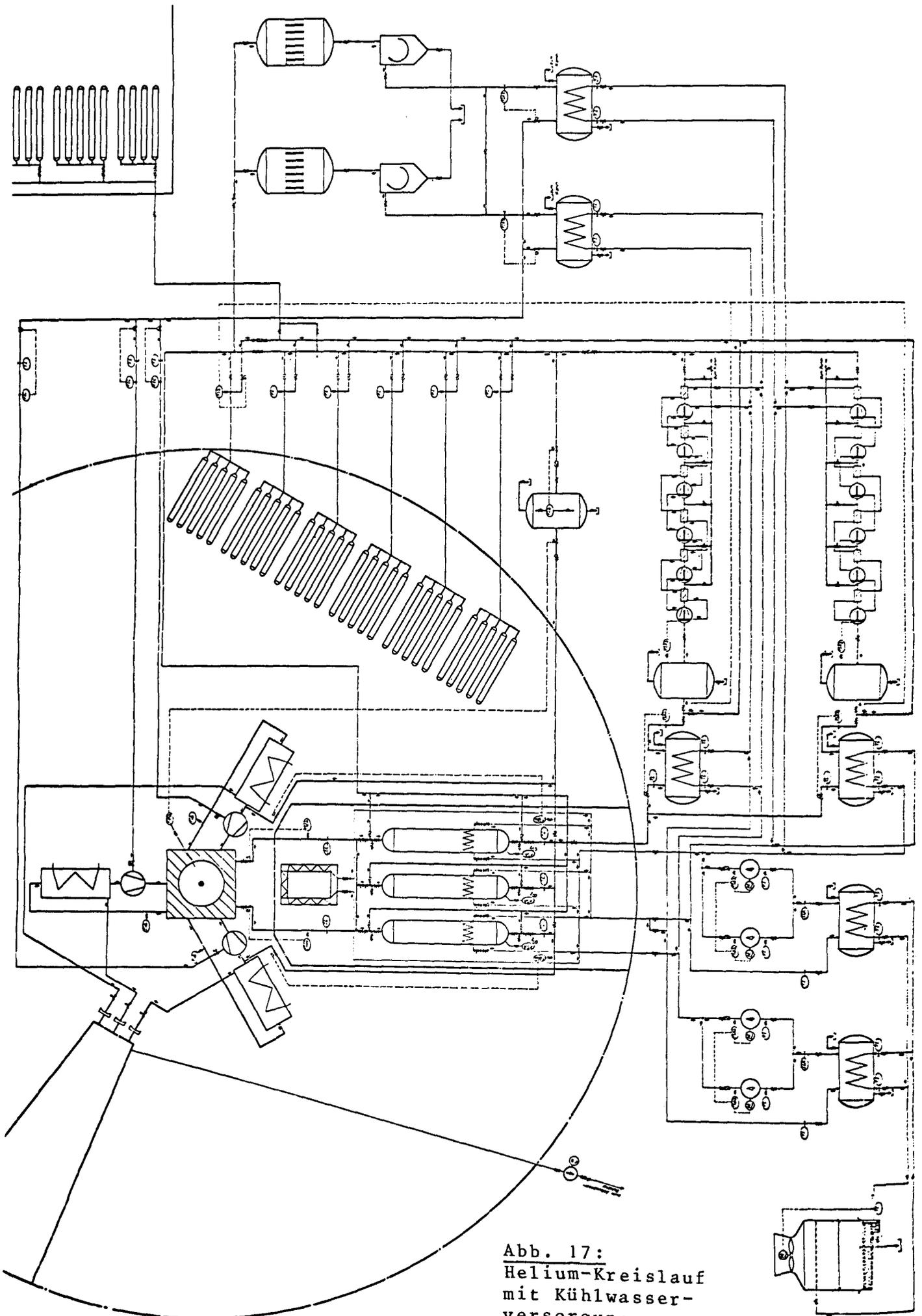


Abb. 17:  
Helium-Kreislauf  
mit Kühlwasser-  
versorgung

Daten der Gasreinigungsanlage

Volumendurchsatz	3333 Nm <sup>3</sup> /h
Systemdruck	40 at
Eintrittstemperatur	250 °C
Zulässiger Druckabfall	5 m WS
Verunreinigungen am Eintritt	15 vpm CO
	5 vpm H <sub>2</sub>
Verunreinigungen am Austritt	1 vpm CO <sub>2</sub>
	0,1 vpm H <sub>2</sub>
Standzeit	≈ 14 Tage

Die Gaskreisläufe des Reaktors umfassen neben den drei Kreisläufen für die Gasreinigung ein Lager für frisches Helium, ein Lager für eventuell verseuchtes Helium (Kapazität 6000 Nm<sup>3</sup>), Kompressoren für Ab- und Aufpumpvorgänge, Sicherheitsventile für das Abblasen des Primärkreisinhalts in einen Mischkühler bei Rohrreißen im Dampferzeuger sowie Leitungen zwischen diesen Komponenten. Hinzu kommen Meßstichleitungen und Meßgeräte für die Überwachung von Druck, Temperatur, Feuchtigkeit sowie Gasanalysen. Eine Übersicht über die Gesamtschaltung der Heliumgaskreisläufe im Reaktor gibt die beiliegende Abbildung 17.

### 3.10 Containment (siehe auch Abb. 1)

Der Primärkreis des Kernreaktors ist in ein Betoncontainment integriert. Dieses besteht aus drei Räumen:

- (1) einem unzugänglichen, mit Stickstoff gefüllten Bereich, in dem sich der Spannbetonbehälter, die Dampferzeuger, Koaxialrohre, Gebläse sowie das Heliumlager (verseuchtes) befinden,
- (2) einem zugänglichen oberen Bereich für die Abschaltstäbe, Beschickungsanlage, Gasreinigung und Gashilfskreisläufe; im Falle, daß in diesem Bereich ein Bruch im Primärsystem auftritt, wird durch Berstscheiben dafür gesorgt, daß der Überdruck zum unzugänglichen Teil des Containment hin abgebaut wird.
- (3) einem betretbaren unteren Bereich, der den Entnahmeteil der Beschickungsanlage aufnimmt. Bei Gasaustritt aus diesen Komponenten wird ebenfalls durch Berstscheiben für einen Druckausgleich mit dem stickstoffgefüllten Raum gesorgt.

Stickstoff als Inertgasfüllung für das Containment wurde gewählt, um Graphitabbrand durch Luft beim Bruch im Primärkreis zu verhindern. Im übrigen befinden sich in diesem Raum außer den Gebläsen keine Teile, die der Inspektion bedürfen. Das Containment ist über ein Jodfilter mit einem Kamin ausreichender Höhe verbunden. Alle im Normalbetrieb zu erwartenden Leckagen aus dem Primärkreis des Reaktors gelangen in diesen Raum, der somit die Funktion einer Verzögerungsstrecke für Spaltprodukte übernimmt. An die Dichtigkeit des Containments werden keine hohen Anforderungen gestellt. Im Störfall müssen kurzzeitige höhere Temperaturen und Drücke, wie aus der Tabelle zu ersehen ist, beherrscht werden. Eine Wandisolierung (z.B. Putz) schützt dabei den Beton vor zu hohen Temperaturen.

#### Daten des Containments

Lichte Höhe	23,5 m
Lichter Durchmesser	30 m
Wandstärke	1 m
Fundamentstärke	3,5 m
Freies Volumen	11000 m <sup>3</sup>
Normaldruck	1 at N <sub>2</sub>
Störfalldruck	2,1 atü
Störfalltemperatur	390 °C
Dauer der Störfallbeanspruchung	≈ 30 min
Dichtigkeit im Störfall	≈ 5 % Gasverlust/h
Isolationsschichtdicke	≈ 2 cm
Betonwandtemperatur im Störfall	50 °C