

KfK 4274
Juni 1987

Out-of-pile-Experimente zur Untersuchung schwerer Kernschäden

**SFD-Versuchsanlage CORA
Anlagenbeschreibung**

**K. Hain
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projektgruppe LWR-Sicherheit**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projektgruppe LWR-Sicherheit

KfK 4274

Out-of-pile-Experimente zur Untersuchung schwerer Kernschäden
SFD-Versuchsanlage CORA - Anlagenbeschreibung

Klaus Hain

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung:

In der Folge des Störfalles am TMI-2 Reaktor wurde am Kernforschungszentrum Karlsruhe im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit ein zusätzliches Programm zur Untersuchung schwerer Kernschäden (Severe Fuel Damage, SFD) begonnen.

Als wesentliche Komponente dieses Programmes ist die Versuchsanlage CORA zu sehen, mit deren Hilfe an Einzelstab- und Bündelexperimenten der Schadensverlauf bei LWR-Brennelementen im Temperaturbereich von 1200 °C bis 2200 °C untersucht werden soll.

Der vorliegende Bericht beschreibt das Konzept und die Ausführung der Versuchsanlage CORA.

Out-of-pile-Experiments for the Investigation of Severe Fuel Damage. Description of the CORA Facility

Summary:

As a consequence of the TMI-2 Reactor incident an additional research program to investigate severe fuel damage (SFD) mechanisms was started in the Kernforschungszentrum Karlsruhe within the frame of the Nuclear Safety Project.

An essential tool within this program is the CORA test facility. It is designed for the investigation of LWR fuel damage phenomena in the temperature range from 1200 °C through 2200 °C by out-of-pile single-rod and bundle experiments.

In this report the conception and the actual design of the CORA facility are described.

Vorwort:

An der Planung und am Aufbau der Versuchsanlage CORA waren die nachstehenden Personen maßgebend beteiligt, wobei das mitgenannte Sachgebiet nur den jeweiligen hauptsächlichen Arbeitsbereich charakterisiert:

Herren F. Brüderle	Containment, Hochdruckapparatur, Abgasstrecke
W. Butzer	Containment-, Hochdruckapparaturkonstruktion
R. Döbele	Meßeinheit Bündelleistung
W. Leiling	Kühlwasser-, Druckluftversorgung, Gesamtmontage, Feuerlöschanlage
K. Hain	Anlagenkonzept, Projektführung
J. Hanauer	Bündel-Stromversorgung
G. Harbauer	Ar-Versorgung, Hochstromleitungen
J. Hauschild	Allgemeine Stromversorgung
G. Müller	Rechnerinterface
N. Paroth	Allgemeine Meßtechnik, Steuertechnik, Schaltwarte
F. Schloß	Bündelkonstruktion, Hochtemperaturschirm, Quenchtrichterantrieb
T. Vollmer	Simulator-Entwicklung, Dampferzeuger und Überhitzer, programmierbare Versuchsablaufsteuerung wie Bündelheizung und Abgasverdünnung, Meßwerterfassung und Meßwertdarstellung

Neben den genannten Personen haben noch viele Arbeitsgruppen innerhalb des Kernforschungszentrums und bei den Lieferfirmen der Komponenten an der Erstellung der CORA-Anlage mitgearbeitet, denen an dieser Stelle gedankt sei.

Besonderen Dank gilt auch der Projektleitung PNS und hier insbesondere Herrn A. Fiege für die verständnisvolle und stets engagierte Unterstützung bei der Überwindung äußerer Schwierigkeiten und nicht zuletzt dem verantwortlichen Experimentator, Herrn Dr.S.Hagen für die unablässig sprudelnden Ideen bezüglich den experimentellen Detailzielsetzungen.

Die Hauptabteilung Kerntechnische Betriebe und hier besonders der Abteilung FR2, die mittlerweile den Anlagenbetrieb durchführt, sei für die hilfreiche begleitende Unterstützung beim Anlagenaufbau gedankt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Basisanforderungen an die Versuchsanlage	2
2.1 Referenzvorgänge bei einem Bündelversuch	2
2.2 Experimentiertechnische Anforderungen	3
2.3 Sicherheitstechnische Anforderungen	4
2.4 Standortanforderungen	4
3. Anlagenkonzept CORA	5
3.1 Grundaufbau der Versuchsapparatur	5
3.2 Anlagenschema	6
3.3 Technische Hauptdaten der Anlage und experimenteller Versuchsablauf	7
3.4 Sicherheitstechnische Vorkehrungen	10
4. Auslegung und Ausführung der Hauptkomponenten	12
4.1 Brennstabsimulator	12
4.2 Bündelaufbau, Shroud, Abstandshalter	13
4.3 Hochtemperaturschirm	14
4.4 Quenchbehälter, Quenchtrichter	15
4.5 Schwallkondensator	16
4.6 Schwadenkondensator	18
4.7 Abgasstrecke	19
4.8 Verdampfer, Hochtemperaturüberhitzer	20
4.9 Containment	24
4.10 Stabbündelheizung, Stromzuführung	26
4.11 Spaltgassimulation	28
5. Meßwerterfassung und Versuchsablaufsteuerung	29
5.1 Meßwerterfassungssystem und Meßwertdarstellung	29
5.2 Steuerung der Bündelaufheizung	30
6. Betrachtungen zu den Sicherheitsvorkehrungen	33
6.1 Wasserdampfexplosion	33
6.2 Wasserstoffexplosion	35
6.2.1 Wasserstoffexplosion im Hochdruckteil	36
6.2.2 Wasserstoffexplosion im Niederdruckteil	36
6.3 Abgasbeimischung, Abgasverdünnung	37
6.4 Feuerlöscheinrichtung	39
6.5 Radioaktive Stoffe, Rückhaltung	40
6.6 Personenschutz	41
7. Schlußbemerkungen	42

Verzeichnis der Abbildungen:

- Abb.Nr. 1 - Versuchsanlage CORA
2 - Versuchsapparatur
3 - Anlagenschema
4 - Gesamtaufbau mit Komponentenordnung im Containment
5 - Versuchsablaufschritte
6 - Beheizter Brennstabsimulator BS
7 - Vorversuch BS - Stabentwicklung
8 - Brennstab-Simulatorbündel, Typ a
9 - Bündelkopftrichter
10 - Bündelkopftrichter, Draufsicht
11 - Stutzenlage Hochtemperaturschirm
12 - Querschnitt durch der HT-Schirm
13 - Ausrückmechanismus für die Dampfzuleitung zum BS-Bündel
14 - Draufsicht auf den Quenchbehälter und Verdampfer/Überhitzer im Containment
15 - Quenchbehälter Unterteil mit Hubwerk
16 - Schwallkondensator
17 - Schwadenkondensator
18 - Abgasstrecke MK2
19 - Wasserdampf/Argon-Überhitzer 1000 °C
20 - Verdampfer/Überhitzereinheit
21 - Temperaturverlauf am Überhitzer mit Ar-Durchsatz
22 - Containment-Ansicht
23 - Elektrische Daten des Brennstabbündels
24 - Stromschienenführung für die Bündelheizung
25 - Anzeigetafel der Spaltgasdruck-Simulation
26 - Temperaturverlauf in der HT-Isolierung
27 - Steuerungskonzept der Bündelheizung
28 - Wasserdampfexplosion im Hochdruckteil
29 - Explosionsauswirkungen auf das Containment
30 - Wasserstoffexplosion im Hochdruckteil
31 - Wasserstoffexplosion in der Abgasstrecke
32 - Ventilgruppe Abgasregelung

Out-of-pile-Experimente zur Untersuchung schwerer Kernschäden **SDF-Versuchsanlage CORA - Anlagenbeschreibung**

1. Einleitung

Risikobetrachtungen zu einem Kernschmelzunfall und auch der Störfall am TMI-2-Reaktor zeigen, daß ein wesentlicher Beitrag zur Wahrscheinlichkeit eines Kernschmelzunfalles durch das Potential von Störfällen des Typs "Kleine Lecks" gegeben ist.

Darunter sind auch Transientenstörfälle zu verstehen, die über "Kleine Lecks" in den Kernschmelzunfall münden. Angenommen wurde in der Vergangenheit dabei vielfach, daß ein teil- und/oder zeitweises Versagen der Notkühleinrichtungen letztendlich immer zu einem Kernschmelzen führt.

Aber gerade die beim TMI-2-Störfall gewonnenen Erfahrungen haben ergeben, daß ein deutliches Überschreiten der Stabtemperaturen von 1500 K und ein zeitweiser Ausfall der Kühlung nicht zu einem unkontrollierten Kernschmelzunfall führen muß.

Damit ist das Gebiet charakterisiert, in dem die Versuchsanlage CORA angesiedelt ist, um durch experimentelle Untersuchungen die Sicherheitsmarge zwischen dem Kühlmittelverluststörfall und dem Kernschmelzunfall auszuloten. Dabei ist es ein wichtiges Ziel, die Mechanismen im Schadensverlauf an einem überhitzten Brennstabbündel bis hin zum unkontrollierten Abschmelzen und dem Wiedereintritt der Kühlung zu untersuchen. Aus den Ergebnissen der Experimente soll dann versucht werden, Aussagen zu treffen, wie lange der Reaktorkern bei steigender Temperatur noch eine kühlbare Geometrie besitzt. Die Versuchsanlage CORA wird zu dieser Frage einen wesentlichen Beitrag liefern, eingebunden in das Programm zur Untersuchung schwerer Kernschäden (Severe Fuel Damage), das in mehreren Ländern läuft.

Im KfK werden diese Untersuchungen im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit (PNS) durchgeführt. Sie sind in /1/ umfassend beschrieben.

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit der technischen Beschreibung der Versuchsanlage CORA, die im Auftrag des PNS von der Projektteilung C der Hauptteilung Ingenieurtechnik, IT, entworfen, geplant und erstellt wurde.

Die experimentellen Gesichtspunkte, die Diskussion der vorgesehenen Experimente anhand der Versuchsmatrix bis hin zur speziellen experimentinternen Instrumentierung und die Ergebnisse der Experimente bleiben späteren Berichten des Experimentators vorbehalten. Experimentator ist die Abteilung CP, Chemie und Physik, ebenfalls der Hauptabteilung Ingenieurtechnik.

Nach den Inbetriebnahmeversuchen wurde die Versuchsanlage der Hauptabteilung Kerntechnische Betriebe, KTB zum Betrieb übergeben.

Der Anlagenname CORA ist eine Abkürzungskonstruktion aus Severe Core Damage.

2. Basisanforderungen an die Versuchsanlage

Mit der Versuchsanlage CORA sollen definitionsgemäß Aufheiz- und Quenchesperimente an einem Brennstabbündel mit elektrisch beheizten Stäben, in Out-of-pile-Position, im Zustandsbereich nach dem zeitweisen Ausfall der Notkühlung bis hin zum unkontrollierbaren Kernschmelzunfall durchführbar sein.

Grundlegende Untersuchungen der Abschmelzphase von UO₂-Zircaloy-Brennstäben bei versagender Notkühlung wurden bereits im Jahre 1978 in der NIELS-Anlage /2/ durchgeführt, die richtungsweisend für das Konzept der CORA-Anlage waren.

2.1 Referenzvorgänge bei einem Bündelversuch

Der Abschmelzvorgang ist in hohem Maße von der Wechselwirkung zwischen UO₂, Zircaloy und den Strukturmaterialien des Brennstabbündels bestimmt.

Zusätzlich macht sich noch der Einfluß der äußeren, das Bündel bzw. den Brennstab umgebenden Atmosphäre bemerkbar z.B. durch die Oxidation der Hülle durch eine Metall/Wasserdampfreaktion.

Im einzelnen sind mit steigender Temperatur folgende Einflußprozesse gegeben:

- Blähen und Bersten der Zircaloy-Hülle
- Erweichen bzw. Schmelzen der Absorbermaterialien in der zunächst noch intakten Edelmethallehülle
- Oxidation und Versprödung der Brennstabhüllen und des Brennelementkastens (Shroud)
- Erhöhung der Hüllrohrschmelztemperatur infolge der Oxidation
- Schmelzen der Abstandshalter und der Absorberhüllen
- Abfließen und Verspritzen der Absorber- und Strukturmaterialien

- Legierungsbildung zwischen Zircaloy und Absorbermaterial
- Kontaktreaktion zwischen Zircaloy und UO₂, UO₂-Auflösung
- Versagen der Zirkonoxidhülle
- Abfließen und Erstarren der geschmolzenen Brennstabmaterialien
- Fragmentierung des Brennstabes und der noch vorhandenen Strukturmaterialien durch den Quenchvorgang.

All diese Vorgänge sollen in der CORA-Anlage näher untersucht werden, wobei das versuchstechnische Potential der Anlage möglichst breit angelegt sein soll.

2.2 Experimentiertechnische Anforderungen

Neben den in der NIELS-Anlage schon vorhandenen Experimentiermöglichkeiten wurden, aus den Erfahrungen der dort durchgeführten Versuche gewonnen, noch folgende zusätzliche Anforderungen an die CORA-Anlage gestellt:

- Erhöhung des Außendruckes um den Brennstab bis max. 10 bar
 - * Versuchsziel: Kontakteinfluß Pellet/Hüllrohr
- Stabinnendruck einstellbar bis 100 bar
 - * Einfluß von Blähen und Bersten des Hüllrohres
 - * Einfluß der Pelletstruktur
- Aktive Stablänge 1000 mm mit vorgeschalteten "Kaltenden"
 - * Abfließen des Schmelzgutes in kältere Bündelbereiche
- Einbau von Absorberstäben und von mindestens zwei Abstandshaltern
 - * Abfließen, Verspritzen und Verdampfen von Absorber- und Strukturmaterial, Legierungsbildung, Durchlaufwiderstand der Abstandshalter für ablaufendes Schmelzgut
- Einbau von instrumentierten und unbeheizten Vollpelletstäben
 - * Messung von Zentral- und Oberflächentemperaturen
 - * Verhalten von Brennstäben im Originalaufbau
- Oxidation der Zircaloy-Oberflächen mit einem Wasserdampfangebot bis max. 33 g/s bei einer Eingangstemperatur am Bündelanfang von etwa 1273 K

- * Ausnützung von nahezu 100 % der aktiven Stablänge zur Hüllrohoxidation

- Umschaltmöglichkeit von Wasserdampfbetrieb auf reinen Inertgasbetrieb

- * Abbruch des Oxidationsvorganges an bestimmter Stelle

- Quenchen des Stabbündels mit Wasser

- * Fragmentierung angeschmolzener Stäbe bzw. des Bündels

Weiter wurde von der Experimentatorseite eine gute Zugänglichkeit zum Bündel nach dem abgelaufenen Versuch gefordert.

2.3 Sicherheitstechnische Anforderungen

Gegeben durch die oben genannten Anforderungen ist leicht einzusehen, daß besondere Vorkehrungen gegen die Auswirkungen einer denkbaren

- Dampfexplosion, hervorgerufen durch ablaufendes Schmelzgut in das bereitstehende Quenchwasser und einer
- Wasserstoffexplosion, möglich durch Vermischung des bei der Oxidation freiwerdenden Wasserstoffes mit Luft mit anschließender Zündung, z.B. in der Abluftanlage,

getroffen werden müssen. Weiter ist durch Einsatz von zwar unbestrahltem UO_2 natürlicher Zusammensetzung und abgereichertem UO_2 mit 0,3 % U^{235} in einer nach dem Versuch nicht mehr intakten Hülle, die Einrichtung eines Kontrollbereiches mit möglichst dichtem Abschluß zur unmittelbaren Umgebung zwingend notwendig.

Grundlegend sei hier gestattet darauf hinzuweisen, daß Versuchsanlagen die sich mit der Untersuchung von Störfällen befassen, sich zwangsläufig in einem Betriebsbereich bewegen, der stets auf Grenzbelastungen ausgerichtet ist. Hinzu kommt noch, daß diese Störfallbelastungen, die letztlich auch auf die Versuchsanlage selbst wirken, vielfach unbekannt sind. Rückwirkungen auf die Ausführung von vorsorglichen Sicherheitseinrichtungen sind daher nur zu verständlich, und diese bilden in der Regel einen nicht unerheblichen Anteil der gesamten Anlagenkosten.

2.4 Standortanforderungen

Neben einer ausreichenden Infrastruktur für die Versorgung der Versuchsanlage mit Strom, Kühlwasser und Druckluft müssen organisatorisch und anlagenmäßig die Strahlenschutzbelange erfüllt sein.

Für den Aufbau war ein Standort in einer Technikumshalle anzustreben, mit den dort üblicherweise vorhandenen Montagehilfsmitteln wie Hallenkran, Bühnen u.ä. und nicht allzu großen Entfernungen zu Werkstätten.

Weiter waren Vorkehrungen zu treffen, damit nach dem Ausbau des Brennstabbündels aus der eigentlichen Versuchsanlage direkt und in unmittelbarer Nähe zur Anlage die zu den anschließenden Nachuntersuchungen notwendigen Vorarbeiten durchgeführt werden können.

3. Anlagenkonzept CORA

3.1 Grundaufbau der Versuchsanlage

Aus den Basisanforderungen ergab sich für die eigentliche Versuchsanlage - darunter ist der Teil der CORA-Anlage zu verstehen, der im Zentrum des Containments aufgebaut ist - ein Konzept, das in der Abb. 1 dargestellt ist.

Das Brennstab-Simulatorbündel mit einer beheizten Bündellänge von 1000 mm und vorgeschalteten Kaltenden von jeweils ca. 500 mm befindet sich in der Mitte des Hochtemperaturschirmes. Über diesem ist der Bündelkopftrichter angeordnet, der einmal die Tragfunktion für das in den Hochtemperaturschirm hineinhängende Brennstab-Simulatorbündel übernimmt, zum anderen die Anschlußstelle für die Rohrleitungen zu den beiden Schwadenkondensatoren bildet.

Ringförmig zu dem Bündelkopftrichter ist als Druckentlastungsraum der Schwallkondensator aufgebaut, der den Hochdruckteil der Versuchsanlage über Berstscheiben gegen Drucküberschreitung absichert.

Unterhalb des Hochtemperaturschirmes befindet sich der Quenchbehälter in dem der Quenchtrichter und dessen Hubvorrichtung untergebracht ist. In den Quenchbehälter hinein kann der Hochtemperaturschirm abgesenkt werden, sobald seine Verbindung mit dem Bündelkopftrichter gelöst ist. Diese Hauptkomponenten der Versuchsanlage - der Hochtemperaturschirm, der Bündelkopftrichter, der Schwallkondensator, die beiden Schwadenkondensatoren und der Quenchbehälter mit dem Quenchtrichter - sind im Containment der CORA-Anlage untergebracht, das die alles umschließende, druckfeste und eine mögliche Umgebungskontamination begrenzende Hülle darstellt.

Die Abb. 2 zeigt die Versuchsanlage in einer detaillierteren Darstellung.

Hier ist der Quenchtrichter in der unteren Position eingezeichnet, in der Stellung, in der er sich während des Aufheizvorganges befindet. Weiter ist im

Innenbehälter des Schwallkondensators die obere Stromzuführung zu den Stäben des Simulatorbündels zu erkennen, die über drei Stromschienen und Einzelkabel getrennt zu jedem beheizten Stab führt. Um unteren Ende des Bündels werden die Einzelstrompfade zusammengefaßt und gemeinsam über drei Führungsstangen, die gleichzeitig die Gleitbahnen für den Quenchtrichter bilden, aus der Apparatur herausgeführt.

3.2 Anlagenschema

Die Versuchsapparatur ist mit den erforderlichen Ver- und Entsorgungseinrichtungen nach dem in der Abb. 3 gezeigten Anlagenschema verbunden.

Ausgehend vom Brennstab-Simulatorbündel werden die während des Versuchsablaufes in den Bündelkopftrichter einströmenden Gase - das Ar-Trägergas zum Spülen der Hochtemperaturschirm-Isolierung, der entstandene Wasserstoff bei der Oxidation der Zircaloy-Oberflächen durch Wasserdampf und der überschüssige, hochüberhitzte Wasserdampf - zu den beiden Schwadenkondensatoren weitergeleitet. Dort wird der Wasserdampfanteil kondensiert und in Sammelbehälter abgeführt. Die unkondensierbaren Anteile werden auf Raumtemperatur abgekühlt, in der Mischkammer zusammengeführt und über eine Regeleinrichtung gezielt in die Abgasstrecke eingeleitet.

Die Abgasstrecke wiederum ist der "Abluftanlage 8000 m³/h" des FR2 vorgeschaltet, die letztendlich das unterhalb der Explosionsgrenze für Wasserstoff in Luft verdünnte CORA-Abgas aufnimmt und über Filter an die Außenatmosphäre abgibt.

Die Verdünnung dieses aus dem Hochdruckteil der Versuchsapparatur über die der Mischkammer nachgeschaltete Regelventileinheit abströmenden Abgases, erfolgt am Anfang der Abgasstrecke durch Zugabe von Luft aus dem Druckluftsystem.

In den Hochdruckteil der Versuchsapparatur eingespeist werden Argon zur Spülung und Basisdruckeinstellung sowie Wasser zur Wasserdampferzeugung. Argongas wird an zwei Stellen in die Apparatur eingegeben, einmal in den Hochtemperaturschirm - hier dient es neben der Druckeinstellung auch noch der Kühlung von Meßeinsätzen - und ersatzweise von Wasser in den Verdampfer, bei einem speziell gewünschten, abrupten Abstellen der Wasserdampferzeugung. Das Argongas wird über eine Druckminderstation aus zwei Flaschenbatterien mit je 120 Nm³ Inhalt entnommen. Dieses Argon wird nach dem Durchlaufen der Apparatur vollständig in die Abgasstrecke abgegeben und dort sicherheitstechnisch gleichwertig wie reines Wasserstoffabgas betrachtet.

Die Wasserdampferzeugung zur gezielten Oxidation der Zircaloy-Oberflächen erfolgt in der Verdampfer/Überhitzereinheit, eine Sonderkomponente, die im Durchlaufverfahren das über eine Dosierpumpe eingespeiste Wasser ohne Zwischenspeicherung auf über 1000 °C erhitzt.

Verdampfer, Überhitzer und die Wasserdampfleitungen sind von einem Ölmantel umgeben, der bei einer Betriebstemperatur von 543 K einerseits die notwendige Energie zur Verdampfung liefert und andererseits eine Kondensation des Wasserdampfes an den Druckbehälterwandungen verhindert.

Wie die Anordnung all dieser Komponenten im Containment vorgenommen wurde, ist aus der Abb. 4 zu ersehen, die einen Längsschnitt durch die Anlage und durch den Montagestand für die Simulatorbündel zeigt.

Im Containment sind innen vier Arbeitsbühnen zu erkennen, die unterste Bühne mit dem Quenchbehälter und der Verdampfer/Überhitzer-Einheit, darüber um den Hochtemperaturschirm die Experimentatorbühne, die vornehmlich der Meßtechnik mit nahem Ortskontakt zum Brennstab-Simulatorbündel dient.

Um den Schwallkondensator herum sind weitere zwei Bühnen angeordnet, von denen die obere zusammen mit dem Schwallkondensator gleichsam eine Plattform bildet, von der in den Innenbehälter des Schwallkondensators zum Bündelanschluß eingestiegen werden kann.

Außen am Containment sind zwei Umlaufbühnen zu sehen, die den Zugang zu den Flanschdurchführungen und Schauöffnungen ermöglichen.

Links neben dem Containment ist auf der Abbildung der Montagestand für den Zusammenbau des Brennstab-Simulatorbündels gezeigt, aus dem das fertig montierte Bündel mit dem Bündelkopftrichter als Einheit herausgehoben und mit dem Hallenkran von oben in die Versuchsapparatur eingesetzt wird.

3.3 Technische Hauptdaten der Anlage und Experimenteller Versuchsablauf

Die technischen Daten der CORA-Anlage sind:

Simulatorabmessungen:	10,75 mm Durchmesser
	0,75 mm Wandstärke
	2175 mm Länge
	1000 mm beheizte Länge

Ringpellet:	9,2/6,1 mm Durchmesser x 10 mm Länge 1,55 mm Wandstärke, Brennstoff: Uranoxid nat. Zusammensetzung bzw. abgereichert 0,3 % U235
Bündelgröße:	max. 37 Stäbe in einer 7x7-Anordnung mit max. 24 Heizstäben in 3 Gruppen, Rastermaß 14,3 mm
Aufheizgeschwindigkeit:	0,5 bis 4 K/s
max. Stabtemperatur:	2300 K
Umgebungsdruck:	1 bis 10 bar Überdruck
Stabinnendruck:	max. 100 bar Überdruck
Einzelstabileistung:	19,8 kW, 198 W/cm
Bündelleistung:	82,1 kW, 34,2 W/cm
Oxidationsdampfangebot:	7 g/s, kurzzeitig 33 g/s
Dampftemperatur:	1225 K
Hubgeschwindigkeit des Quenchtrichters:	max. 4 cm/s
Quenchwassermenge:	max. 70 l

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei dem Konzept der CORA-Anlage war die Überlegung, das Brennstab-Simulatorbündel nach dem Versuch, also im beschädigten und teilweise abgeschmolzenem Zustand, vor einer ersten Inspektion keiner weiteren Handhabung zu unterziehen, d.h. den Bündelzustand nach dem Versuch gleichsam einzufrieren.

In diesem Punkt sollte die Anlage versuchen, eine Lücke in der Erfassung des Bündelzustandes zu schließen, die bei in-pile-Versuchen zwangsweise durch die dort anschließend nach dem Versuch notwendigen Manipulationen entstehen, ehe das Bündel z.B. in einer heißen Zelle rundum besichtigt werden kann. Hier bleibt oft eine gewisse Unsicherheit in der Beurteilung, ob ein Teil der dann sichtbaren Schäden nicht erst nachträglich z.B. durch den Ausbau aus dem Reaktor oder den Transport zur heißen Zelle entstanden ist.

Aus diesem Grunde wurde bei der CORA-Anlage das während des Versuches verständlicherweise notwendige Gehäuse um das Brennstab-Simulatorbündel, der Hochtemperaturschirm, absenkbar konstruiert, so daß eine rundum freie Zugänglichkeit nach dem Versuch gegeben ist.

In der Abb. 5 sind die einzelnen Schritte eines kompletten Versuchsablaufes dargestellt, um das Prinzip der Zugänglichkeit zu verdeutlichen.

Den Bündeleinbau in die Versuchsanlage zeigt die Phase A der Abbildung. Der Hochtemperaturschirm ist dabei in den Quenchbehälter abgesenkt, der noch von der Phase F her zur Seite gefahren ist. Das Brennstab-Simulatorbündel wird vom Hallenkran am Montagegestand aufgenommen und von oben in seine Position im Schwallkondensator eingesetzt. Der Quenchbehälter wird dann in Position gefahren, das Bündel an die Basisplatte der Stromversorgung angeschlossen, anschließend der Hochtemperaturschirm angehoben und mit dem Schwallkondensator verbunden. Nach dem Anschluß der Verdampfer/Überhitzer-Einheit, die ebenfalls seitlich verschiebbar ist und der Meßeinsätze am Hochtemperaturschirm ist das Bündel zum Aufheizversuch bereit.

In der Ablaufphase B wird das Bündel entsprechend der gewählten Aufheizgeschwindigkeit temperaturmäßig hochgefahren und z.B. die Zircaloy-Oberflächen durch Wasserdampfzugabe oxidiert.

Am Ende des Aufheizvorganges kann der Quenchtrichter, der sich in der Phase B in einer unteren Position befindet, angehoben werden und so das Bündel mit seinem dann teilweise ausdampfenden Wasserinhalt umfluten. Dadurch wird ein im Reaktor verspätet einsetzender Flutvorgang nachgebildet, Phase C.

Die folgenden Phasen beschreiben den Ablauf nach dem Versuch. In der Phase D wird der Hochtemperaturschirm wieder in den Quenchbehälter abgesenkt und eine erste Runduminspektion durch den noch hochgefahrenen und durchsichtigen Quenchtrichter ist möglich. Anschließend wird auch der Quenchtrichter nach unten gefahren und damit die gesamte Bündelgeometrie frei zugänglich. Das Brennstab-Simulatorbündel selbst wurde bis zu diesem Schritt weder bewegt noch erschüttert.

Nach der fototechnischen Zustandsdokumentation werden die Stromanschlüsse der Heizstäbe gelöst, die Bündelreste zum Transport fixiert z.B. durch Eingießen in Epoxydharz und der Bündelrestverbund wieder nach oben aus der Versuchsanlage ausgebaut. Noch am Kran hängend wird das Restbündel aus dem CORA-Containment herausgehoben und zur Vorbereitung der Nachuntersuchungen in den seitlich unter dem Containment liegenden Raum R 206 durch eine Luke abgesenkt.

3.4 Sicherheitstechnische Vorkehrungen

Neben den sonst üblicherweise bei Versuchsanlagen dieser Größenordnung vorzusehenden konventionellen Arbeitsplatz-Schutzvorkehrungen, waren bei der CORA-Anlage zusätzliche Maßnahmen und Einrichtungen erforderlich, die einmal durch die Art der Versuche und zum anderen durch den Standort in der Reaktorhalle bedingt sind.

Zunächst ist der stillgelegte und teildemontierte FR2 immer noch eine Anlage nach § 7 AtG mit der Folge, daß für alle An- und Einbauten der Nachweis geführt werden muß, daß von ihnen keine Auswirkungen auf die (Rest-) Reaktoranlage zu befürchten sind.

Das Sicherheitskonzept der CORA-Anlage muß also gewährleisten, daß

- die Integrität des FR2 nicht beeinträchtigt wird, um eine Freisetzung des radioaktiven Restinventars zu verhindern und
- der Schutz von Personen, die sich während einer Versuchsdurchführung in der Reaktorhalle aufhalten, gegeben ist.

Um allen zum Planungszeitpunkt vorstellbaren und auch nicht vorstellbaren Einsprüchen begegnen zu können, wurde von Anfang an festgelegt, daß die gesamten sicherheitstechnisch relevanten Komponenten der CORA-Anlage in einem eigenen druckfesten Containment untergebracht werden, das auch in Störfällen einen sicheren Einschluß gewährleistet. Damit sind direkte Auswirkungen auf die Restanlage FR2 auszuschließen.

Dieses Containment wird vor Beginn eines Aufheizversuches dicht verschlossen und ist auch während des Versuchsablaufes nicht begehbar. Der Personenschutz für die Bedienungsmannschaft ist damit ebenfalls erbracht.

Störfälle beim Betrieb der CORA-Anlage sind vorstellbar und auch nicht mit letzter Sicherheit auszuschließen, beispielsweise

- durch eine Wasserdampfexplosion im Bereich des Quenchtrichters innerhalb der Versuchsapparatur, hervorgerufen durch ablaufendes Schmelzgut, das mit dem bei jedem Versuch erforderlichen Wasserinhalt des Quenchtrichters in Kontakt kommt,
- oder - wenn auch äußerst unwahrscheinlich - durch eine Explosion des bei der Oxidation freigesetzten Wasserstoffes im Hochdruckteil der Versuchsapparatur,

- weiter durch eine Wasserstoff-Explosion in der Abgasstrecke noch im Bereich der CORA-Anlage oder auch schon weiter entfernt in der Abluftanlage des FR2,
- ebenso ist durch einen Brand von ausgetretenem Wärmeübertragungsöl der Verdampfer/Überhitzer-Einheit eine Gefährdung denkbar.

Das Schutzkonzept der CORA-Anlage zur Beherrschung von Explosionen basiert auf einem 3-Barrierenprinzip mit gestaffelter Druckauslegung der jeweils den Explosionsherd umschließenden Komponente:

1. Dem Hochdruckteil der Versuchsanlage mit einem Auslegungsdruck von 12 bar Überdruck und 4 Berstmembranen zum Schwallkondensator, Ansprechdruck 12 bar \pm 10 %
2. Dem Schwallkondensator mit einem Auslegungsdruck von 3 bar Überdruck und 6 Berstscheiben zum CORA-Containment, Ansprechdruck 3 bar \pm 10 %.
3. Dem CORA-Containment mit einem Auslegungsdruck von 1 bar Überdruck.

Auf die einzelnen Störfälle und die zu ihrer Beherrschung getroffenen Maßnahmen wird in Kapitel 6 noch näher eingegangen.

Da die vorgesehenen Versuche in der CORA-Anlage vielfältig und von komplexer Art sind, ist für den Betrieb der Anlage eine klare Trennung zwischen der Experimentatorseite und der für die Anlagensicherheit verantwortlichen Betriebsseite erforderlich. Der Anlagenbetrieb erfolgt anhand eines Betriebshandbuchs, in dem auch die einzelnen Sicherheitsauflagen und Zuständigkeiten festgeschrieben sind.

Durch die Aufstellung der CORA-Anlage im Kontrollbereich des FR2 sind die nach der StrlSchV erforderlichen Überwachungsmaßnahmen erbracht. Aufgrund der geringen spezifischen Aktivität und einer Maximalmenge von nur 23 kg Probenmaterial aus Uranoxid mit abgereichertem bzw. Natururan sind besondere Abschirmmaßnahmen nicht erforderlich.

4. Auslegung und Ausführung der Hauptkomponenten

4.1 Brennstabsimulator

Die ersten Abschmelzversuche in der NIELS-Anlage wurden mit Simulatoren durchgeführt, die als Heizleiter Wolframstäbe von 6 mm Durchmesser hatten und an beiden Enden an einen wassergekühlten, massiven Kupferklotz angeschlossen waren.

Für die CORA-Brennstab-Simulatoren wurde im Heizbereich der Wolframheizleiter beibehalten, auf beiden Seiten jedoch ein "Kaltende" von etwa 500 mm vor- bzw. nachgeschaltet. Zweck dieser Kaltenden ist, den sonst jeweils an den Einspannstellen des Heizleiters auftretenden starken Temperatursprung zu vermeiden, der zweifelsfrei dort zu einem untypischen Verhalten des ablaufenden Schmelzgutes besonders im Bündelverband führt.

Für die Kaltenden muß ein Material gefunden werden, das einen wesentlich geringeren elektrischen Widerstand als der Heizleiter hat, dabei aber jedoch einen Schmelzpunkt besitzt, der deutlich über der Temperatur liegt, die an der Stoßstelle zum Heizleiter herrscht.

In der Abb. 6 ist der Aufbau des beheizten Brennstab-Simulators gezeigt, dessen Funktionsfähigkeit in einer Reihe von Vorversuchen erprobt wurde.

An beiden Enden des 1000 mm langen und 6 mm Durchmesser starken Heizleiters sind Molybdän-Elektroden von 8,6 mm Durchmesser, 250 mm lang angeschraubt - die Herstellung dieser Schraubverbindung mit dem Wolfram-Heizleiter erforderte allein schon einigen Entwicklungsaufwand - die wiederum mit den nachgeschalteten Cu-Elektroden hart verlötet sind. Zur elektrischen Isolierung gegenüber dem Hüllrohr sind beide Elektrodenteile mit einer 0,2 mm starken Zirkonoxidaufgabe beschichtet.

Der Wolfram-Heizleiter ist über seine gesamte Länge, abzüglich einer kurzen Ausgleichsstrecke für die unterschiedlichen Längenausdehnungen, von UO₂-Ringpellets umgeben, so daß wie im Originalbrennstab die Materialpaarung Zirca-loy-Hüllrohr und Brennstoff vorhanden ist.

Neben den beiden Stromanschlüssen ist am oberen Ende eine Kapillare angebracht, über die durch Ar-Gasdruck ein Spaltgasdruckeinfluß auf das Stabverhalten untersucht werden kann. Über eine Druckanzeige, separat für jeden

Simulator, kann der jeweilige Versagenszeitpunkt der Hülle erkannt und meßtechnisch erfaßt werden.

Die Abb. 7 zeigt das Ergebnis eines Vorversuches zur Simulatorentwicklung bei dem ein Teststab mit dem oben beschriebenen Aufbau einem Aufheizversuch unterzogen wurde. Nach einer vorgegebenen Aufheizgeschwindigkeit wurden mit dem eindimensionalen instationären Wärmeleitprogramm für Zylindergeometrien STATI-4, /3/ die einzelnen Stableistungsschritte berechnet und danach der Teststab in einem eigens dafür aufgebauten Teststand hochgefahren.

Auf dem Foto ist die abgeschmolzene und teilweise abgelaufene Hülle deutlich zu erkennen, deren Schmelzgut noch mit ebenfalls abgelaufenem Brennstoff durchsetzt ist.

4.2 Bündelaufbau, Shroud, Abstandshalter

Die beheizbaren Brennstab-Simulatoren werden zusammen mit den nur mittelbar beheizbaren Vollpelletstäben zu einem Brennstabbündel zusammengebaut, das ein unterschiedliches Anordnungsmuster innerhalb des vorgegebenen Rasterabstandes aufweisen kann. In der Abb. 6 sind einige mögliche Stabanordnungen dargestellt.

Insbesondere eine Ringanordnung der beheizbaren Simulatoren um einen nur indirekt beheizten Kern von Simulatoren mit Vollpellets, denen also die "Wolframstützseele" fehlt, verspricht ein möglichst ungestörtes Teilbündelverhalten während des Abschmelzvorganges.

Ein Bündellängsschnitt ist in der Abb. 8 zu sehen, in der auch ein Teil des Bündelkopftrichters gezeichnet ist. Als Festpunkt des Bündels ist der Bündelflansch, 40 mm stark aus Phenolkresolharz, HGW DIN 7735 anzusehen, in den die einzelnen Brennstab-Simulatoren wechselseitig von oben und unten eingeschraubt sind.

Bündelflansch und Bündelkopftrichter sind durch zwei Strahlenschirme zur Heizzone des Bündels hin abgeschirmt. Trotzdem ist der Flansch nur einmal einsetzbar, da die dem Bündel zugekehrte Seite während des Aufheizvorganges stark verkohlt. Gleichwohl baut die sich bildende Verkohlungs eine gute wärmetechnische Isolierschicht zum tragenden Restteil des Flansches auf.

Die Abb. 9 zeigt den Bündelkopftrichter mit einem eingebauten und elektrisch angeschlossenen Bündel im Schnitt, die Abb. 10 die Draufsicht auf das Bündel durch den Schwallkonensator.

Man erkennt die pyramidenartig versetzt angeordneten Anschlußstellen der oberen Elektroden und die sternförmige Weiterführung der Anschlußkabel bis zu den Meßwiderständen, an denen für jeden Heizstab einzeln über den dort gemessenen Stabstrom und der gemeinsamen Gruppenspannung die Stabileistung ermittelt wird. Ferner sind die Kapillaren der Spaltgassimulation und die Anschlußstellen der Bündel-Thermoelemente gezeigt.

Im Mittelteil der Abb. 9 ist der Ringraum für die Wasserkühlung des Bündelkopftrichters zu sehen, die einmal durch Wärmeleitung über das massive Unterteil den Bündelflansch kühlt, zum anderen über die bis zum oberen Ende des Bündelkopftrichters stehende Kontaktwassermenge - diese ist aus Sicherheitsgründen nicht mit dem Kühlkreis selbst verbunden - die Verlustwärme der Elektroden abführt.

Um den Stabverband herum ist ein Zircaloy-Shroud angeordnet, der das gesamte Bündel von unten bis zum oberen Ende der Heizzone mantelartig analog einem Brennelementkasten umhüllt. An seinem unteren Ende ist der Shroud an den Verteilerkasten für den hochüberhitzten Wasserdampf angeschraubt und übernimmt für diesen eine gewisse Strömungsführung längs den Hüllrohren. Genauso wie die Hüllrohre, wird auch der Shroud durch den Wasserdampf oxidiert und verspröden bzw. während des Aufheizvorganges abschmelzen.

Der Dampfverteilerkasten muß zwangsläufig nach unten offen sein, damit die unteren Kaltenden der beheizbaren Brennstab-Simulatoren an die für alle Heizstäbe gemeinsame Stromanschlußplatte über bewegliche Kupferbänder angeschlossen werden können. Die Abdichtung gegen einen Austritt des Wasserdampfes nach unten übernimmt der Wasserstand des teilweise hochgefahrenen Quenchtrichters, in den der Dampfverteilerkasten eintaucht. Die Spiegelhöhe wird auf Ausdampfverluste überwacht, gegebenenfalls wird Wasser nachgespeist.

Über die Bündellänge sind drei Abstandshalter verteilt, die aus Originalabstandshaltern eines DWR-Brennelementes herausgeschnitten wurden. Material, Kontaktverhältnisse mit dem Hüllrohr und Querschnittsversperrung entsprechen damit den Originalbedingungen.

4.3 Hochtemperaturschirm

Der Hochtemperaturschirm umhüllt den vom Experiment her interessantesten Teil der Versuchsanordnung, das Brennstab-Simulatorbündel und die schalenartig aufgebaute Hochtemperatur-Isolierung. Der Druckmantel ist für 12 bar Überdruck und 423 K ausgelegt und kann wie schon angegeben, mitsamt der Isolierung

rung in den Quenchbehälter abgesenkt werden. Seine Höhe beträgt 2365 mm bei einem Durchmesser von 700 mm und einer Wandstärke von 8 mm. Die Abb. 11 zeigt einen Längsschnitt und eine Mantelabwicklung, die Abb. 12 einen Querschnitt in Höhe der Dampfeintrittsstelle zum Bündel.

Zahlreiche Flanschöffnungen im Mantel ermöglichen den Anbau von Meßgeräten wie Pyrometer zur Staboberflächentemperatur-Messung, Boroskope für Videoaufnahmen des Abschmelzvorganges über eine Lichtleiteroptik und Thermoelemente zur Temperaturmessung innerhalb der Isolierung.

Der Isoliermantel ist mehrschichtig aus Zirkonoxid- und Aluminiumoxid-Fasern aufgebaut. Die einzelnen Schichten sind dabei mit Keramiknägeln auf Tragprofilen aus Inconel 600 befestigt, die über die gesamte Mantellänge durchgehen und nur an den Enden zusammengefaßt sind. In den Zwischenräumen der Inconelsäulen sind die Thermoelementleitungen verlegt. Diese schalenartige Bauweise ermöglicht temperaturmäßig bedingte radiale und vertikale Bewegungen des Isoliermaterials. Die gesamte Isolierung ist abschließend durch eine Stahlhülle eingefaßt und als eigenständige Einheit in den Hochtemperaturschirm eingesetzt.

Im unteren Teil des Hochtemperaturschirms ist neben den Stützrollen, die den Quenchtrichter während eines Quenchvorganges abstützen, ein Hebelmechanismus eingebaut, mit dessen Hilfe die Verbindung der Dampfleitung vom Überhitzer zum Dampfverteilerkasten vom hochfahrenden Quenchtrichter getrennt wird und diesem den Weg nach oben frei gibt (Abb. 13).

4.4 Quenchbehälter, Quenchtrichter

Der Quenchbehälter ist zusammen mit dem eingefahrenen Hochtemperaturschirm (siehe Abb. 2) seitlich auf Schienen verfahrbar. Dies ist einmal für die im Kapitel 3.3 beschriebenen einzelnen Ablaufschritte vor und nach einem Experiment sehr hilfreich, zum anderen aber auch notwendig, um Montagearbeiten vornehmen zu können.

Dazu wird der vom Schwallkondensator abgekoppelte Hochtemperaturschirm in den Quenchbehälter eingefahren, die gesamte Einheit nach rechts geschoben (Abb. 14) und der Hochtemperaturschirm auf gut zugängliche Arbeitshöhe angehoben. In dieser Montageposition kann durch die genau darüber liegende Flanschöffnung im Containmentdeckel mit Hilfe des Hallenkrans z.B. ein zuvor eingebrachter neuer Isoliereinsatz in den Hochtemperaturschirm montiert werden.

Im Unterteil des Quenchbehälters ist das Hubwerk für den Quenchtrichter eingebaut (Abb. 15). Ein Hydraulikzylinder schiebt das Fußstück des Quenchtrichters an drei dickwandigen Führungsrohren nach oben. Diese hohlgebohrten Führungsstangen aus hartverchromtem Kupfer sind, wie schon angegeben, gleichzeitig die Stromleiter von der Bündelfußplatte, dem Zusammenführungspunkt aller beheizbaren Brennstab-Simulatoren, zurück zu der Bündelstromversorgung, und sie dienen außerdem noch zur Wassereinspeisung in den Quenchtrichter über eine Speisepumpe, auch während eines Aufheizexperimentes.

Weiter sind durch die Bohrungen Thermoelement-Meßleitungen geführt, die von unten in den Bündelverband bis an die aktive Heizzone reichen.

Der Quenchtrichter ist ein zylindrisches Rohr aus Quarzglas, am unteren Ende in einer Spannhülse verschraubt und oben durch einen Metallring verstärkt. Durch die seitlichen Schauöffnungen im Hochtemperaturschirm und die durchsichtige Quenchtrichterwand soll versucht werden, Videoaufnahmen vom Bündelverhalten während eines Quenchvorgangs zu machen, soweit dies der Ausdampfvorgang zuläßt.

Das Konzept eines hochfahrenden, wassergefüllten Rohres um das aufgeheizte Brennstab-Bündel zur Simulation des wiederansteigenden Wasserspiegels einer verspätet einsetzenden Notkühlung im Reaktor wurde deshalb gewählt, um zum einen das Potential für eine denkbare Wasserdampfexplosion zu verringern - der Wasserinhalt des Quenchtrichters beträgt lediglich etwa 55 l - und zum anderen um die Hochtemperaturisolierung nicht zu durchnässen. Es ist zu erwarten, daß der Anteil Wasserdampf der beim Quenchvorgang in die Isolierung eindringt und dort evtl. kondensiert nach Versuchsende restlos wieder ausdampft.

4.5 Schwallkondensator

Der Schwallkondensator ist das erste Entlastungsvolumen bei einer Drucküberschreitung im Hochdruckraum der Versuchsapparatur, sei sie hervorgerufen durch eine Wasserdampf- oder Wasserstoffexplosion oder auch durch einen schleichenden, nicht ausgeregelten Druckanstieg. Seine sicherheitstechnische Bedeutung besteht ferner in der Einschließung einer möglichen Druckwelle.

Die Abb. 16 zeigt den Schwallkondensator mit dem integrierten Bündelkopftrichter, angeordnet über dem Hochtemperaturschirm.

Von diesem ausgehend münden aus dem Konusraum des Bündelkopftrichters sternförmig vier Rohrstützen in den Ringraum des Schwallkondensators. An den Enden

dieses Stutzens sind mit einer Aufschlitzvorrichtung versehene Berstscheiben angebaut. Der Ansprechdruck dieser Berstsicherung beträgt 12 bar Überdruck mit einer Toleranz von $\pm 1,2$ bar bei 623 K. Aus der Zeichnung ist zu erkennen, daß ein sich stetig erweiternder Strömungsquerschnitt von der angenommenen Explosionsstelle in Bündelnähe bis zum Entlastungsraum des Schwallkondensators angestrebt wurde.

Durch den Ringraum führen, ebenfalls vom Konusraum des Bündelkopftrichters ausgehend, zwei Rohrstrecken zu den Schwadenkondensatoren, die seitlich dicht neben dem Schwallkondensator angeordnet sind. Um die Zugänglichkeit zur Anschlußstelle des Bündels an den Hochdruckteil der Versuchsapparatur zu gewährleisten und den Druckentlastungsraum symmetrisch über dem Hochtemperaturschirm anordnen zu können, wurde ein von oben zugänglicher Innenbehälter in den Schwallkondensator eingeschweißt. Zusammen mit dem Außenmantel bildet dieser Innenbehälter die Begrenzung zu dem schon erwähnten Ringraum, mit einem abgeschlossenen Volumen von 12 m^3 .

Der Ringraum ist über Mannlöcher zur Montage und Kontrolle der Berstsicherungen zugänglich. Oben ist eine Ringleitung mit Sprühdüsen eingebaut, über die kurz vor und während des Quenchvorganges vorsorglich Wasser eingespritzt wird, um einen Kondensationseffekt für den einströmenden Wasserdampf bei einem Ansprechen der Berstscheiben zu erzielen. Ein ständiger Anschluß mit einer dünnen Rohrleitung an die Abgasanlage sichert ein Absaugen von möglicherweise wasserstoffhaltigem Leckgas aus dem Hochdruckteil der Versuchsapparatur.

Die nächste Stufe der Druckentlastung bildet die Öffnung des Ringraumes zum Containment hin. Sechs Berstsicherungen DN 300, am oberen Boden des Schwallkondensators gleichmäßig verteilt, bilden den Abströmquerschnitt in das Containment. Die Berstsicherungen aus Graphit mit Stahlarmierung sind auf einen Ansprechdruck von $3 \text{ bar} \pm 10 \%$ bei 317 K ausgelegt. Mit diesen Öffnungen vergrößert sich beim Ansprechen das Entlastungsvolumen für den Hochdruckteil der Anlage um weitere 200 m^3 .

An der Wand des Innenbehälters sind drei Verteilerschienen angebracht, über die, den drei Gruppen für die Bündelheizung entsprechend, die einzelnen Heizstäbe an die Stromversorgung angeschlossen werden. In der Abb. 15 ist die massive Zuleitung aus Kupfer zur oberen Verteilerschiene gezeigt. An der unteren Schiene ist eine der Doppelleitungen zu sehen, die jeweils zu den Meß-

widerständen führen, die den einzelnen Heizstäben vorgeschaltet sind (siehe auch Abb. 10).

4.6 Schwadenkondensator

Die beiden Schwadenkondensatoren sind unmittelbar neben dem Schwallkondensator, in dem verbleibenden Ringraum zwischen diesem und der Containmentwandung eingebaut. Es sind Rohrbündelwärmeaustauscher mit Umlenkböden im oberen Drittel, gasseitig in Vollschweißausführung. In der Abb. 16 ist ein Schwadenkondensator im Schnitt gezeigt, das Foto Abb. 17 zeigt ihn zusammen mit dem nachgeschalteten Kondensatsammelbehälter.

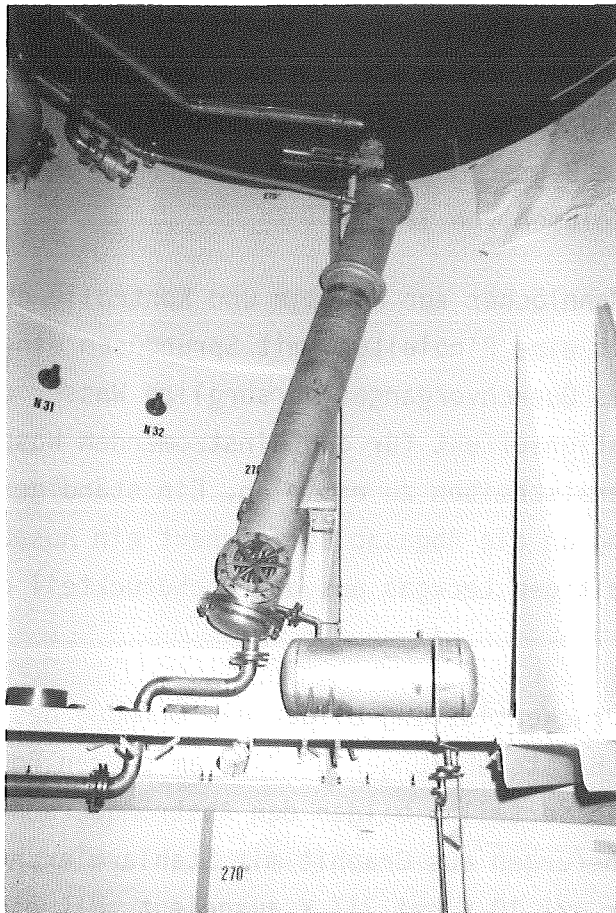


Abb. 17: Schwadenkondensator

Der Schwadenkondensator hat zwei Aufgaben zu erfüllen, einmal ist der Überschußwasserdampf zu kondensieren, der an dem Oxidationsvorgang am Brennstab-Simulatorbündel und dem Shroud nicht teilgenommen hat. Weiter sind die nicht-kondensierbaren Gase, wie der bei der Oxidation entstehende Wasserstoff und das eingespeiste Argon, auf Raumtemperatur abzukühlen.

Der Kondensationsvorgang läuft vornehmlich im unteren Teil des Wärmeaustauschers ab, während sich im oberen Teil die Restgase ansammeln. Um den Kondensatfilmaufbau und damit die wirksame Kondensationsfläche positiv zu beeinflussen, sind beide Schwadenkondensatoren 15° zur Senkrechten geneigt, auf dem Foto ist dies deutlich zu erkennen. Das anfallende Kondensat soll möglichst rasch in die Sammelbehälter ablaufen; es verbleibt dort bis zum Versuchsende und wird erst später gezielt in die Abwasserleitung abgelassen. Der Ablaufvorgang kann dann über Schaugläser kontrolliert werden, wobei je nach Ventilwahl auch evtl. abgeschiedene Partikel mit ausgeschwemmt werden können.

4.7 Abgasstrecke

Für den im Hochdruckteil prozeßbedingt anfallenden Wasserstoff ist bis zur Mischkammer II (MK 2) nicht mit einem explosionsfähigen Gasgemisch zu rechnen, da bei den Versuchen kein Sauerstoff gebildet wird. Das Volumen des Hochdruckteiles wird vor dem Versuch evakuiert und mit Argon gespült, während des Versuches ist ständig ein Überdruck vorhanden, so daß von außen kein Sauerstoff in den inertisierten Bereich gelangen kann.

In der Mischkammer II wird dem aus dem Hochdruckteil abgegebenen Gas, einer Mischung aus Wasserstoff und Argon, Luft aus dem Druckluftsystem beigemischt und so die Wasserstoff-Konzentration der in das Abluftsystem eingeleiteten Abgasmenge unter 3,5 % gehalten. Es ist dabei nicht auszuschließen, daß beim Mischbetrieb ein Konzentrationsbereich in der Abgasstrecke durchfahren wird, bei der das Wasserstoff/Argon/Luft-Gemisch explosionsfähig wird. Aus diesem Grunde ist der MK 2 ein Druckabbauvolumen mit Blenden nachgeschaltet, wobei als erster möglicher Explosionsort der Mischungspunkt Argon/Wasserstoff mit der Verdünnungsluft angenommen wird.

Die MK 2 und das Druckabbauvolumen sind apparatemäßig zusammengefaßt und werden als Abgasstrecke bezeichnet. In der Abb. 18 ist die Abgasstrecke einmal schematisch dargestellt und auf der rechten Seite ein Foto des montierten Apparates zu sehen.

Die aus Platzgründen gefaltete Abgasstrecke DN 450 setzt sich aus drei Abschnitten zusammen, dem Mischkammerteil A, dem Druckabbauvolumen B bis D und der Überdrucksicherung in der Nähe der Stelle D.

In die Mischkammer wird über ein Luftbeimischventil DN 100 (Ve 203) eine gezielte Luftmenge in den äußeren Ringraum der Mischstelle eingeleitet, der durch ein konusförmiges Lochblech begrenzt wird. In den Konusraum tritt von

oben das aus dem Hochdruckteil kommende Argon/Wasserstoffgemisch ein. An der Stelle des Mischvorganges (A) wird der Bereich eines explosionsfähigen Wasserstoff/Luft-Gemisches mit Sicherheit durchfahren, so daß eine Explosion nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, wenn sie auch wegen des Fehlens einer Zündquelle äußerst unwahrscheinlich ist. Wie in Kap. 6 noch näher beschrieben, ist der maximale Explosionsdruck an dieser Stelle mit 7,1 bar Überdruck ermittelt worden. Die gesamte Abgasstrecke ist deshalb auf einen Betriebsdruck von 10 bar Überdruck ausgelegt.

Bis zum Eintritt in die Abgasleitung der Abluftanlage 8000 cbm/h, nach der Stelle D, wird der Explosionsdruck durch Einbau von zwei Ringblenden mit einem Flächenverhältnis $F_2/F_1 = 4$ in einem Abstand von $3D$ und einer zwischen-geschalteten Rohrstrecke DN 200 soweit abgebaut, daß die nach einer längeren Rohrleitungsstrecke nachgeschalteten Absolutfilter der FR2-Abluftanlage nicht gefährdet sind.

Gleichwohl befindet sich am Ende der Abgasstrecke eine federbelastete Überdrucksicherung DN 250 mit progressiven Ansprechverhalten, über die bei einem Ansteigen des Druckes über 150 mbar Überdruck die Strecke in das CORA-Containment entlastet wird. Damit wird sichergestellt, daß die Überdruckabsicherung an den Absolutfiltern, die ebenfalls auf 150 mbar Ansprechdruck eingestellt ist, mit Sicherheit nicht anspricht.

Nachdem der Druck in der Abgasstrecke wieder unter 150 mbar gefallen ist, schließt die Überdrucksicherung und das Abgassystem ist wieder bestimmungsgemäß abgeschlossen. Das Containment selbst kann anschließend gezielt abgesaugt bzw. gespült werden.

4.8 Verdampfer, Hochtemperatur-Überhitzer

Eine der technisch interessantesten Komponenten der CORA-Anlage ist die Verdampfer/Überhitzer-Einheit. Ihre Aufgabe ist zunächst, den zur Oxidation der Brennstabhüllen und des Shroudes notwendigen Wasserdampf zu erzeugen und diesen dann so hoch zu überhitzen, daß am Anfang des Stabbündels Temperaturen von möglichst über 1220 K erreicht werden. Damit soll die effektive, am Oxidationsvorgang teilnehmende Hüllrohrroberfläche über nahezu 100 % der beheizten Stablänge ausgedehnt werden. Bei einer Einspeisung von Sattedampf oder nur wenig überhitztem Dampf müßte der Überhitzungsvorgang anschließend durch die Stabheizung erfolgen, also würde ein Teil des Stabbündels für den eigentlichen Versuchszweck nicht zur Verfügung stehen.

Temperaturen in dieser Größenordnung gehen an die Grenzen der Belastbarkeit von metallischen Werkstoffen, nennenswerte mechanische Festigkeiten sind nicht mehr zu erwarten. Es mußte daher ein Konzept für die einzelnen Komponenten entworfen werden, das folgenden Gesichtspunkten Rechnung trägt:

- Die das Medium strömungsmäßig begrenzenden Wandungen mit der hohen Betriebstemperatur müssen von den drucktragenden Behälterwandungen temperaturmäßig zu einem niederen Niveau hin getrennt werden, um für die Behälterkonstruktion vertretbare Festigkeitskennwerte zu erhalten.
- Der Dampferzeuger darf aus Sicherheitsgründen kein bei einem Störfall ausdampfendes Kesselwasserinventar besitzen.

Weitere versuchstechnisch bedingte Anforderungen, deren Stellenwert leicht einsehbar ist, wie z.B. eine genaue Mengenmessung der eingespeisten Dampfmenge oder ein möglichst übergangsloser Abbruch der Dampfeinspeisung, führten letztlich zu dem Konzept eines Durchlaufdampferzeugers mit nachgeschaltetem Dampferhitzer, der zusätzlich auch auf Argonbetrieb umgeschaltet werden kann.

In der Abb. 19 sind das Schema der Verdampfer/Überhitzer-Einheit und die Konstruktionen der Komponenten gezeigt; auf der Abb. 20 ist die Einheit vor der Montage der Isolierung, eingebaut in das Containment zu sehen.

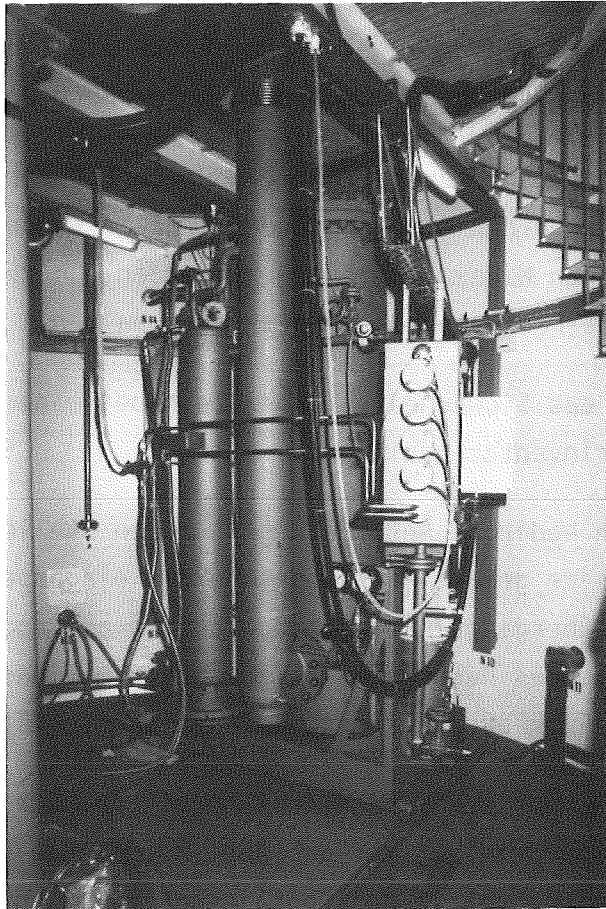


Abb. 20: Verdampfer/Überhitzer-Einheit

Die beiden Komponenten Verdampfer/Ar-Vorwärmer und Wasserdampf/Ar-Überhitzer sowie die Rohrleitung bis zur Einspeisstelle am Hochtemperaturschirm sind von einem Ölmantel mit einer Betriebstemperatur von 543 K umgeben. Dieser Ölmantel hat zwei Funktionen: Einmal dient er als Wärmeübertragungsmittel zur Verdampfung des in den Verdampfer eingespritzten Wassers - zunächst sei zur Beschreibung der Funktionsweise nur die Wasserdampferzeugung angeführt - zum anderen, hält er die Wandungen der Druckbehälter (Auslegungsdruck 16 bar) auf konstanter und vor allem örtlich gleichmäßiger Betriebstemperatur.

Dazu ist selbstverständlich ein kompletter Ölkreis mit Heiz- und Kühlmöglichkeit erforderlich.

Der Verdampferraum wird durch zwei hintereinander geschaltete, im Ölbad hängende Rohre gebildet, in die durch eine Dosierpumpe (DP1) eine definierte Wassermenge direkt eingespeist wird. Der entstehende Wasserdampf strömt vom

Einspritzrohr in das zweite Rohr, wird dort je nach Versuchsdruck leicht überhitzt und tritt dann in den eigentlichen Überhitzer, in den Raum über den Überhitzerspiralen ein.

Die Überhitzung des Dampfes auf eine Temperatur von bis über 1273 K geschieht durch drei direkt beheizte, schraubenartig gewickelte Rohrschlangen 13,5 mm Durchmesser x 1,5 x 9500 mm aus Werkstoff 1.4876, Inconel 800 H, durch die der Dampf von oben zu der zentralen Sammelstelle am Fuß der Rohrschlangen geführt wird. Der Zylinderraum zwischen den Rohrschlangen und der Behälterwand ist mit einer Hochtemperaturisolierung aus hochreinen Aluminiumoxidfasern von ca. 140 mm Stärke ausgefüllt. Der Raum um die Rohrschlangen ist druckmäßig mit dem Strömungsweg für den Dampf innerhalb der Rohre verbunden, so daß eine Belastung aus dem Betriebsdruck für die Rohrwandung weitgehend entfällt.

Mit Keramik-Stromdurchführungen, durch die zur Kühlung der aus dem Verdampfer kommende Wasserdampf hindurchgeleitet wird, sind die Überhitzerschlangen an der oberen Halteplatte aufgehängt. Die Temperaturbelastbarkeit dieser Durchführungen bis max. 723 K gestattet beim Abschalten des Überhitzers nur eine langsame Zurücknahme des Dampfdurchsatzes oder erfordert die Umschaltung auf ein anderes Kühlmedium, zumindest so lange, bis eine Aufheizung der Durchführungen rückwärts aus den Rohrschlangen über diese Grenztemperatur ausgeschlossen werden kann. Aus demselben Grund muß ein bestimmter Mindestdurchsatz bei Überhitzerbetrieb über 723 K immer vorhanden sein.

Aus den Fahrdiagrammwerten der Abb. 21 ist zu entnehmen, daß nach dem Abschalten der Überhitzerleistung nach etwa 300 min und einem Argondurchsatz von 14 g/s (nach 160 min reduziert auf 8 g/s) es doch nahezu 150 min dauert, bis die für die Durchführungen geforderte Grenztemperatur von 723 K an den Rohrschlangen (T_{140}) unterschritten wurde.

Mit einem solchen Ar-Durchsatz zur Abkühlung des Überhitzers, wie er immer nach einer vorausgegangenen Wasserdampfeinspeisung zur Oxidation des Bündels erforderlich sein wird, ist es nebenbei möglich, den Isoliereinsatz des Hochtemperaturschirms am Ende eines Versuches auszutrocknen.

Für die Einspeisung dieses Ar-Gases wurde in den Ölmantel des Verdampfers eine separate Rohrspirale eingebaut, in der das Ar parallel zum Einspeiseweg des Wasserdampfes auf die Ölbadtemperatur erwärmt wird. Damit wird einmal vermieden, daß das Ar-Gas zu kalt auf die empfindlichen Keramikdurchführungen

des Überhitzers trifft, zum anderen wird ein gleitender Übergang vom Wasserdampfbetrieb zum reinen Ar-Betrieb möglich.

Für eine spätere Ausbaustufe der CORA-Anlage war vorgesehen, die Überhitzungstemperatur des Wasserdampfes bzw. des Ar-Gases auf eine Temperatur von etwa 1800 K anzuheben. Mit einem solchen Konzept wäre es möglich geworden, am Bündel den Auslösetemperaturbereich für die exotherm verlaufende Hüllrohrtemperatur zu erreichen, ohne daß dazu die elektrisch beheizten Wolframheizstäbe erforderlich gewesen wären. Die gegenwärtigen Randbedingungen außerhalb des technischen Bereiches lassen einen solchen Ausbau jedoch nicht mehr realisierbar erscheinen.

4.9 Containment

Die sicherheitstechnische Bedeutung des Containments besteht, wie schon mehrfach angeklungen, in der Einschließung einer möglichen Druckwelle und in einer Kontaminationsbegrenzung. Das Containment ist ein stehender, zylindrischer Druckbehälter von 5 m Durchmesser und einer Höhe von ca. 12.5 m. Das Volumen beträgt etwa 210 m³.

Der zulässige Betriebsdruck ist 1 bar Überdruck bei einer zulässigen Betriebstemperatur von 323 K. Als alles umschließende Hülle, die auch den angenommenen Störfallbelastungen standhält, ist das Containment ohne Sicherheitsöffnungen im Sinne der DruckbhV, z.B. entsprechend große Berstsicherungen zum Hallenvolumen hin, ausgestattet. Es darf hier daran erinnert werden, daß der Standort der CORA-Anlage in der auf Unterdruck gehaltenen Halle des FR2 liegt, also damit ein doppeltes Containment für den Hochdruckteil zur Umgebung hin besteht.

In der Abb. 4 ist die Anordnung einiger, schon weiter oben beschriebener Komponenten im Innern zu sehen, das Foto der Abb. 22 zeigt dagegen die Außenansicht des Containments mit dem Blick auf den Haupteingang.

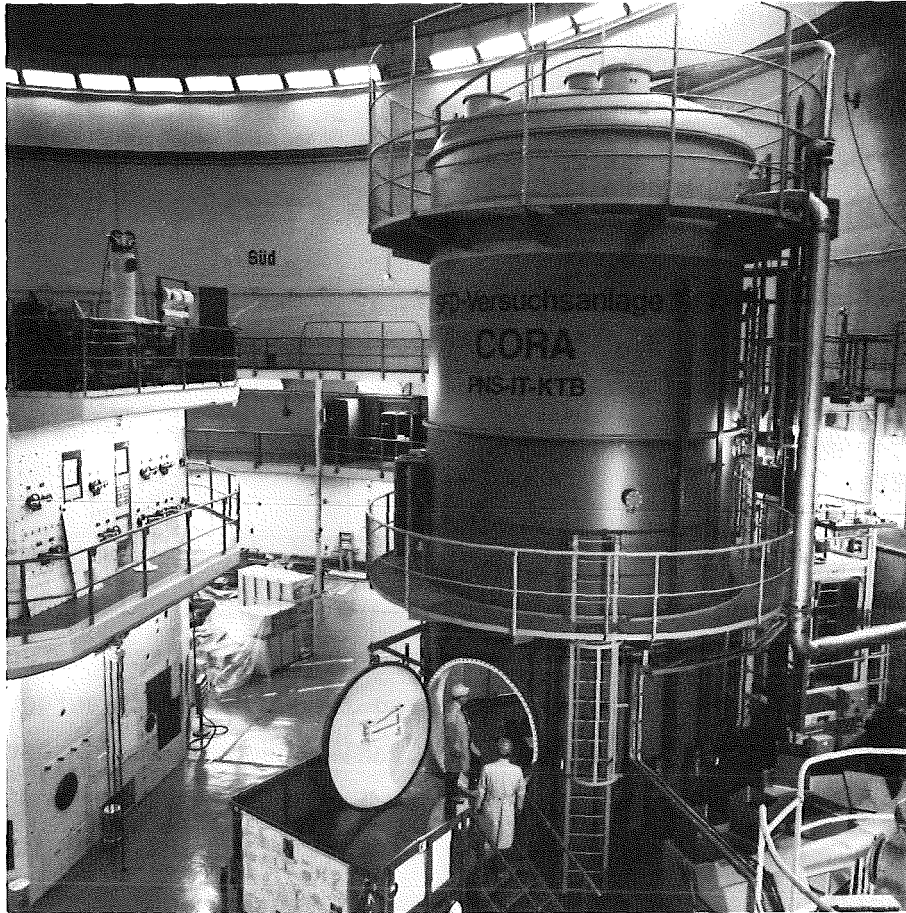


Abb. 22: Containment-Ansicht

Zahlreiche Flanschöffnungen, insgesamt sind es 45 Öffnungen unterschiedlicher Nennweiten, ermöglichen die Zu- und Ableitungen von Rohren oder Kabeln, oder sie dienen als Sichtöffnungen in das Containment-Innere während des Versuchsablaufes.

Über eine der am Deckel angeordneten Flanschöffnungen DN 700 ist es möglich, mit der Flasche des Hallenkrans an dem Schwallkondensator vorbei bis zur Mitte des aus dem Zentrum gefahrenen Hochtemperaturschirmes zu gelangen. Dies war von Anfang an einzuplanen, damit Montagevorgänge z.B. Auswechseln der Hochtemperaturisolierung auch ohne größere Demontagen ausführbar bleiben.

Die Be- und Entlüftung des Containments geschieht über getrennt von der Warte aus absperzbare Öffnungen DN 125. Die Absaugung erfolgt direkt in die "Abluftanlage 8000 m³/h" des FR2; während die Zuluft aus der Halle entnommen wird.

Gegen einen schleichenden Druckanstieg über eine längere Zeitspanne bei geschlossenem Containment - z.B. bei undichten druckführenden Rohrleitungen - ist, entgegen der oben gemachten Aussage, eine durch eine Wasservorlage abgesperrte Abströmleitung von DN 50 vorhanden. Diese Ableitung zum Hallenvolumen hin spricht bei einem Überdruck von 0,8 bar an und schließt nach Druckunterscheidung das Containment wieder selbsttätig ab.

4.10 Stabbündelheizung, Stromzuführung

Für die elektrische Beheizung der Brennstab-Simulatorbündel war eine Stromversorgung zu konzipieren, die einmal auf den Wolfram-Heizstab ausgerichtet sein mußte, die aber auch auf die Komponenten um das Bündel herum Rücksicht zu nehmen hatte.

Aus Platzgründen und auch aus dem Grundprinzip heraus, nur die Dinge im Containment unterzubringen, die in unmittelbarer Nähe zum Bündel angeordnet sein müssen oder aus Sicherheitsgründen sich darin befinden müssen, wurde die Stromversorgung rechts neben dem Haupteingang zum Containment aufgebaut. Damit ergab sich die Notwendigkeit, mehrere Stahl-Wandungen zu durchdringen, um letztlich an den Bündelheizstab zu gelangen. In diesem Zusammenhang mußte überprüft werden, ob es sinnvoll ist, mit einphasigem 50 Hz-Wechselstrom das Bündel aufzuheizen.

Da das Containment und der Quenchbehälter aus ferromagnetischem Stahl bestehen, ist bei den vorliegenden Stromstärken mit starken Wirbelstrom- und Hystereseverlusten zu rechnen.

Die in der Literatur zu findenden, nicht näher abgeleiteten Grundbeziehungen für die Leistungsfreisetzung /4/5/ wurden in das instationäre eindimensionale Wärmeleitprogramm STATI-4 eingebaut und damit die Erwärmung an den Durchdringungsstellen berechnet.

An einem Kontrollversuch mit CORA-spezifischer Geometrie für die Durchführungen wurden die Ergebnisse der Rechnungen nachgeprüft, eine Maßnahme die sich nur als allzu berechtigt herausstellte. Die wohl aus Versuchen an Stäben und U-Eisen gewonnenen Beziehungen aus der Literatur waren nicht ohne weiteres auf konzentrische Rohre mit Innenleiter anwendbar.

Ein Vergleich Rechnung/Versuch /6/ ergab erst bei einem Faktor 4 eine Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Zahlenmäßig mußten die Verlustleistungen am Containment und Quenchbehälter je nach Stromstärke auf 18 bis 40 kW angesetzt werden.

Um die Schwierigkeiten der dadurch hervorgerufenen örtlichen Erwärmung an den Konstruktionsteilen zu umgehen, wurde deshalb für die CORA-Anlage eine Gleichstromversorgung für die Bündel-Heizung gewählt.

Die Stromversorgungsanlage wurde in drei Gruppen aufgeteilt, um damit über den Bündelquerschnitt unterschiedliche spezifische Stableistungen, z.B. zur Profileinstellung, zu erreichen. In der Abb. 6 sind einige mögliche BS-Anordnungen im Prinzip gezeigt. Es ist hier aber daran zu erinnern, daß auch Einzelstabversuche mit abgedeckt werden müssen.

Der Aufbau einer Gruppenheizungseinheit beginnt mit einem Dreiphasen-Säulenstelltransformator, Nennleistung 160 kW, sekundärseitig 0 bis 380 V, ausgerüstet mit zwei Motorantrieben mit einer Verstellzeitbreite zum Durchfahren des gesamten Stellbereiches von 4 bis 28 min bzw. 7 bis 12 sec.

Nachgeschaltet ist ein Dreiphasen-Hochstromtransformator, sekundärseitiger Spannungsbereich 18/36 V bei einer Stromstärke von 5,1/2,5 kA, mit Umschaltmöglichkeit für Reihen- bzw. Parallelschaltung auf der Sekundärseite.

Das letzte Glied bildet ein DS-Brückengleichrichter 40 V/6000 A mit Fremdbelüftung, der analog zu der Wechselspannung des Hochstromtrafos von 18/36 V einen Gleichspannungsausgang zwischen 20 und 40 V liefert.

Für die Ansteuerung und einen direkten Handbetrieb vor Ort sind alle erforderlichen Schaltelemente in einem Schaltschrank zusammengefaßt, der aber auch ferngesteuert von der zentralen Warte aus bedient werden kann.

Aus den technischen Daten der Abb. 23 für den Heizstab ohne Zuleitung ist die Betriebsbreite der Stromversorgungsanlage zu ersehen, die je nach Aufheizgeschwindigkeit bzw. Bündelgeometrie - Einzelstab mit Shroud oder Standardbündel mit 24 Heizstäben - für die Stromstärke zwischen 222 und 5672 A und für die Spannung zwischen 0,5 und 24,8 V liegen kann.

Die Führung der Stromzuleitungen vom Gleichrichter zu den Anschlußstellen der Heizstäbe am Bündelkopftrichter im Schwallkondensator und wieder zurück aus dem Quenchbehälter ist in der Abb. 24 gezeigt. Entsprechend den auftretenden Strömstärken wurden doppelte Cu-Schienen 120 x 10 mm Querschnitt bzw. Stangen mit 80 mm Durchmesser verwendet.

4.11 Spaltgassimulation

Von Interesse bei dem Verhalten des Brennstab-Simulatorbündels im Temperaturbereich über 1300 K ist, wie auch schon bei den Einzelstabexperimenten zum Kühlmittelverluststörfall, der Einfluß des Stabinnendruckes. Einmal spielt der Kontakt Hülle/Brennstoff eine wesentliche Rolle, zum weiteren ist bei einem beidseitigen Oxidationsangriff, wie er z.B. bei einer aufgerissenen Beule denkbar ist, gegenüber einer reinen Außenoxidation ein verändertes Stabverhalten vorstellbar.

Zur Simulation des Spaltgasdruckes wurde deshalb eine Druckaufgabeeinheit installiert, mit der jedem Brennstabsimulator ein eigens aufgeprägter Argon-Innendruck vorgegeben wird. Jeder Stab ist über eine Kapillarleitung (3 mm Außen- und 1 mm Innendurchmesser), in die ein Kontaktmanometer zwischengeschaltet ist, mit der Druckaufgabeeinheit verbunden, so daß bei einer Vordruckaufgabe über dem Wert des Versuchsdruckes in der Anlage selbst, das Versagen der Hülle detektiert werden kann. Der Zeitpunkt des Hüllrohrversagens wird mit der Meßwerterfassungsanlage registriert und an der Schaltwarte im Fließbild der Stabanordnung angezeigt.

Zusätzlich sind noch sechs Druckaufnehmer installiert, die wahlweise bei der Bündelmontage auf je eine Stabposition geschaltet werden und den Verlauf des Stabinnendruckes während des Versuches messen.

Die Abb. 25 zeigt die Anzeigetafel mit den Manometern, deren Anordnung dem Bündelquerschnitt entspricht.

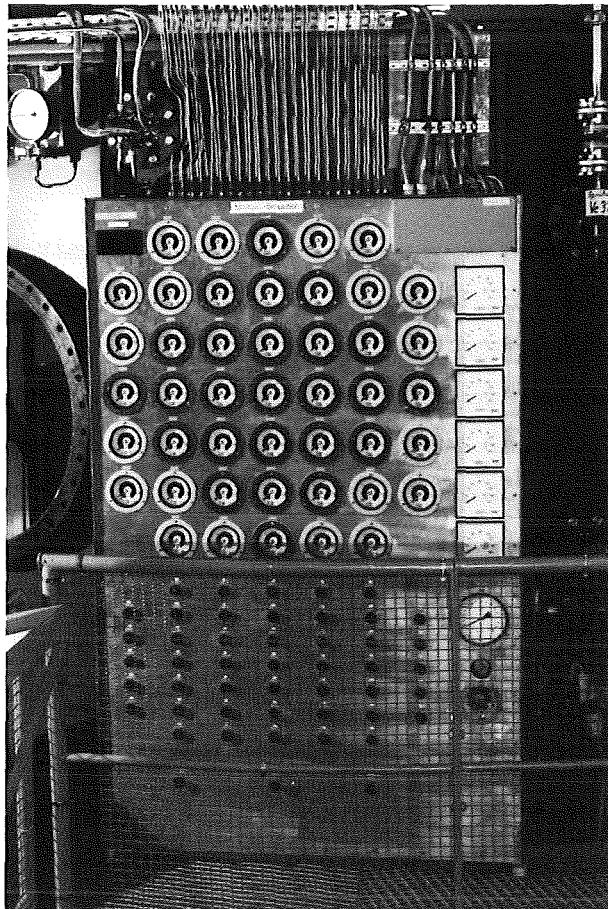


Abb. 25: Ansicht der Anzeigetafel für die Spaltgasdruck-Simulation

Die Kapillarverbindung zu den einzelnen Stäben wird auch zum Evakuieren und zum mehrfachen Druckspülen (Druckaufgabe → Druckentlastung in das Abgas) des Stabinnenraumes nach erfolgter Bündelmontage benutzt.

5. Meßwerterfassung und Versuchsablaufsteuerung

Für die Meßwerterfassung und auch zugleich für die Versuchs-Ablaufsteuerung in bezug auf die Bündelheizung wird ein bereits schon einmal bei einem anderen Vorhaben eingesetzter Rechner Typ 621E2, DIETZ verwendet.

5.1 Meßwerterfassungssystem und Meßwertdarstellung

Die von den Meßwertumformern angebotenen Anlogsignale, verstärkt auf einen Ausgangswert von 0 - 1000 mV, werden über das UAM (Universal-Analog-Meßsystem) des Rechners erfaßt. Rechnerintern werden diese Signale jeweils als 12 Bit-Wort abgespeichert.

Insgesamt können bis zu 160 Meßstellen mit analogem Ausgang angeschlossen werden, zu denen noch eine Reihe von rechnerereigenen "Meßstellen" hinzukommt. Diese Roh-Meßdaten werden ohne weitere Bearbeitung auf Platte und am Versuchsende auch auf Band abgespeichert. Sie stehen somit für eine spätere externe Umrechnung und Versuchsauswertung auf einem Großrechner zur Verfügung.

Gleichzeitig und parallel dazu werden die Analogsignale mit Hilfe von Umrechnungsroutinen mit linearen und, hauptsächlich für die Temperaturmeßwerte aus Thermoelement- oder Pyrometermessungen, mit nichtlinearen Funktionen in physikalische, schon mit Eichwerten korrigierte Meßwerte zurückgerechnet.

Eine auf den jeweiligen Versuch zugeschnittene Auswahl dieser Meßwerte wird in einer Tabelle fortlaufend aktuell auf dem Rechnerbildschirm angezeigt und ermöglicht so eine zusammengefaßte Kontrolle des Versuchsgeschehens.

Unmittelbar nach dem Versuchsablauf können nun alle Meßwerte in Kurvenform mit der Versuchszeit als Abzisse einzeln auf dem Bildschirm dargestellt werden. Damit wird eine hilfreiche Möglichkeit angeboten, sich einen sofortigen Überblick über das Gesamtergebnis des gerade abgelaufenen Versuches zu verschaffen. Mit einer Hard-copy-Einheit können die Bildschirminhalte jeweils dokumentiert werden.

5.2 Steuerung der Bündelaufheizung

Die Aufheizgeschwindigkeit des Brennstab-Simulatorbündels soll, wie schon gesagt, in den Grenzen 0,5 - 4 K/s eingestellt werden können. Im unteren Temperaturbereich etwa bis 1000 °C - dieser Bereich steht allerdings experimentell nicht so sehr im Mittelpunkt wie das Temperaturgebiet bis 2000 °C und darüber - wäre eine sichere Ableitung des Steuersignales für die Bündelheizung aus einer Temperaturmessung z.B. mit einem Thermoelement an oder in einem Heizstab ohne weiteres denkbar.

Über 1000 °C ist mit fortschreitender Temperatur mit einer immer größer werdenden Ausfallwahrscheinlichkeit aller bekannten Temperaturmeßfühler einschließlich Pyrometer zu rechnen, so daß ein fest zugeordneter, ausfallfreier Temperaturabgriff, wie er für eine Regelung und für einen sicheren Anlagenbetrieb unbedingt erforderlich ist, jedenfalls bei den vorliegenden Bedingungen, nicht möglich ist.

Bei der CORA wurde daher auf eine temperaturgesteuerte Heizungsregelung verzichtet und eine Programmsteuerung mit zeitlich festen Leistungszuordnungen vorgesehen. Dies bedingt auf der einen Seite detaillierte Vorversuche

gekoppelt mit Vorausrechnungen, um treffsichere Eingabewerte für die Steuerprogramme zu erhalten, andererseits müssen Eingriffsmöglichkeiten während des Programmablaufes zum Ausgleich nichtvorhergesehener Ereignisse, die Rückwirkungen für die Temperatur-Anstiegsgeschwindigkeit haben könnten, eingebaut werden.

In der Abb. 27 ist das Konzept der Bündelheizung am Beispiel der Bündelheizgruppe 1 gezeigt.

Die Leistungsfunktionen $N(t)$ für die drei Heizgruppen werden dem Rechner vor dem Versuch im Parameterprogramm EINGAB in Form von Wertepaaren eingegeben. Zwischen den Wertepaaren wird linear interpoliert. Diese Leistungsvorgaben werden, sofern keine Korrektur durch den Operateur erfolgt, dem Regler zeitrichtig als externe Leistungs-Sollwerte $N_S(t)$ vorgegeben.

Die Leistungs-Sollwerte in Urfassung des Steuerprogrammes können nun durch verschiedene Eingriffe während des Versuchsablaufes durch den Operateur korrigiert werden.

So ist für jede Gruppe ein Multiplikator m vorgesehen, der pro Tastendruck ab diesem Zeitpunkt den Sollwert um einen bestimmten Betrag Δm erhöht oder erniedrigt (Feinabstimmung). Der Tastendruck-Betrag Δm wird vorher im Parameterprogramm festgelegt und bleibt während eines Versuches konstant.

Der Sollwert wird somit:

$$N_S(t) = m \cdot N(t)$$

Die Anzahl n_0 und Position der aktiven Heizstäbe pro Gruppe werden dem Rechner gleichfalls vor dem Versuch im Parameterprogramm eingegeben und auch am Blindschaltbild der Bündelgeometrie an der Warte gruppenkenntlich angezeigt. Fällt ein Heizstab aus, z.B. dadurch, daß die Elektrode oder der Heizer selbst unterbrochen wird (Abschmelzen des Stabes) - erkenntlich an der Stromanzeige der Einzelstäbe - so kann dies der Operateur durch Schalterbetätigung ab der entsprechenden Position im Blindschaltbild dem Rechner mitteilen (Anzahl n der intakten Heizstäbe). Der Rechner reduziert dann die Gruppenleistung so, daß die spezifische Stabileistung konstant bleibt.

Der Sollwert wird damit:

$$N_S(t) = m \cdot n/n_0 \cdot N(t)$$

Mit einem weiteren Tastschalter kann die augenblickliche Leistung angehalten d.h. konstant gehalten werden (Leistungsplateau). Wird dieser Taster zum Zeitpunkt t_x gedrückt, so bleibt während der gesamten Zeit bis zum Zurücksetzen des Plateaubefehles (erneuter Tastendruck) die Sollwertvorgabe des Rechners konstant.

$$N_s(t) = m \cdot n/n_0 \cdot N(t_x) = \text{const.}$$

Nach der Rücknahme des Plateaubefehles springt die Sollwertvorgabe wieder in die zeitgerechte alte Funktion

$$N_s(t) = m \cdot n/n_0 \cdot N(t)$$

zurück.

Wenn bei Bündeltemperaturen über 1200 °C durch die Zr/H₂O-Reaktion starke Temperatureskalationen eintreten sollten, kann am Schaltschrank durch Knopfdruck (Taster) über den Rechner eine Schnellreduktion der Leistung in Stufen durchgeführt werden. Hierzu hat jede Gruppe ein Tastenfeld mit fünf Tastern, und zwar $r = 100\%$ mit vier Reduktionsstufen $r = 75\%$, $r = 50\%$, $r = 25\%$ und $0 =$ Leistung AUS.

Solange einer dieser Taster gedrückt und der Reduktionsbefehl nicht wieder durch den $r = 100\%$ -Taster aufgehoben wurde, erhält der Leistungsregler vom Rechner den Sollwert:

$$N_s(t) = m \cdot n/n_0 \cdot r/100 \cdot N(t)$$

Ferner erhält mit jedem Tastendruck der Schnellreduktion der Rechner ein zusätzliches Signal, um die Stellmotoren der Transformatoren kurzzeitig von dem normalen Langsamlauf auf Schnellauf umzuschalten.

Letztendlich kann mit dem EIN/AUS-Schalter jede Gruppe sofort vom Netz getrennt werden.

Zur Ermittlung des Leistungs-IST-Wertes jeder Gruppe wird die Spannung am Bündelkopftrichter und am unteren Ende nach der Durchführung am Quenchbehälter abgegriffen und mit den Augenblickswerten der Stabströme multipliziert. Hierzu ist in der Stromzuführung zu jedem Stab ein Meßwiderstand angeordnet (siehe Abb. 10). Der Spannungsabgriff wird durch einen Trennverstärker in einen Meßstrom von 0 bis 20 mA umgewandelt, entsprechend 0 - 1000 A. Diese Einzelsignale werden summiert, geglättet und der Multipliziereinheit zuge-

führt.

Um auch bei kleiner aktiver Heizstabzahl ein genügend großes Signal zu erreichen, ist die Verstärkung der Stabströme umschaltbar. Die Verstärkungsänderung wird durch einen gleichzeitig umgeschalteten Spannungsteiler nach der Multiplikationseinheit wieder ausgeglichen.

6. Betrachtungen zu den Sicherheitsvorkehrungen

Für die beim Betrieb der CORA-Anlage vorstellbaren wesentlichen Störfälle wurden Vorkehrungen getroffen, die im Kapitel 3.4 schon ausführungsmäßig beschrieben wurden. Auf die einzelnen Störfälle selbst soll hier noch näher eingegangen werden.

6.1 Wasserdampfexplosion

Die Gefahr einer Wasserdampfexplosion ist dann am größten anzusetzen, wenn sich das Schmelzgut der hochgeheizten Simulatorstäbe hinter einer dünnen Zirkonoxid-Schicht der Hülle befindet, zum Durchbruch kommt und in das unterhalb des Bündels stehende Wasser des Quenchtrichters fällt. Dabei wird unrealistischerweise angenommen, daß alle Stäbe im aktiven Bereich vollständig aufgeschmolzen sind und sich schlagartig und zeitgleich in den Quenchtrichter entleeren.

Beim augenblicklichen Stand von Wissenschaft und Technik ist es noch nicht möglich, die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Dampfexplosion anzugeben und für den Fall einer solchen Explosion exakte Lastannahmen zu treffen /7/.

Abgesicherte Voraussetzungen für das Zustandekommen einer Dampfexplosion sind allerdings folgende Bedingungen:

- Durch kurzzeitigen direkten Kontakt zwischen Schmelze und Wasser innerhalb weniger Millisekunden muß soviel Dampf gebildet werden, daß ein stoßartiger Druckimpuls entsteht.
- Dies wiederum ist nur möglich, wenn die Schmelze fein im Wasser verteilt wird, damit eine hinreichend große wärmetransportierende Fläche vorhanden ist, also eine Feinfragmentierung des Schmelzgutes vorliegt. Als Grad der erforderlichen Fragmentierung sind Teilchengrößen im Mikrometer- bis Millimeterbereich anzusehen.

Zur Abschätzung der Auswirkungen einer Dampfexplosion wurde ein energiemäßiges TNT-Äquivalent ermittelt. Die Wirkung bei der Detonation von TNT bezüg-

lich des Schadensablaufes ist inzwischen ausreichend experimentell belegt, so daß die Umsetzung dieser Kenntnisse, angewandt auf eine Dampfexplosion zulässig ist, zumal in beiden Fällen ähnliche Stoßwellenbelastungen vorliegen. Grundlage für die Ermittlungen des TNT-Äquivalents bei der Versuchsanlage CORA waren folgende Eingangsdaten:

Temperatur der Schmelze	2800	K
Temperatur des Wassers	298	K
Schmelzmenge	23,2	kg
Wassermenge	55	kg
Spez. Wärme der Schmelze	0,55	J/gK
Spez. Wärme des Wassers	4,18	J/gK
Verdampfungswärme des Wassers	2200	J/g
Gaskonstante	0,46	J/gK
Spez. Wärme des Dampfes	2,55	J/gK

Der maximale Anlagendruck bei Quenchversuchen wurde auf 2 bar betriebsmäßig festgelegt.

Die Ergebnisse der Abschätzungen mit einer Gleichgewichtsverdampfung und einer adiabatischen Verdampfung mit den entsprechenden Energie-Umsetzungsfaktoren von 0,05 bzw. 0,08, einer TNT-Energie von 4690 J/g ergaben in guter Übereinstimmung ein TNT-Äquivalent von $m_{TNT} = 0,16$ kg.

Die Wirkungsumsetzung bei der Detonation dieser TNT-Menge an der Ereignisstelle Dampfexplosion (Abb. 28) unter Berücksichtigung der UVV der Berufsgenossenschaft der chem. Industrie "Explosionsstoffe und Gegenstände mit Explosivstoff - Allgemeine Vorschriften, UVV 46a, Anlage 3" sowie des Schweizer Handbuch der Waffentechnik ergaben einen erforderlichen Auslegungsdruck für den Hochdruckteil von 4 bar.

In der Abb. 28 sind die Belastungen des Hochdruckteiles und die Ereignisabläufe bei einer angenommenen Dampfexplosion, ausgehend vom unter dem Simulatorbündel stehenden Quenchtrichter, tabellarisch zusammengefaßt.

Es sind dabei zwei Fälle betrachtet, einmal ein Versuchsbetrieb mit vorgesehenem Quenchvorgang - hier beträgt der höchste Anlagenbetriebsdruck wie gesagt 2 bar - und ein Versuchsbetrieb ohne Quenchvorgang mit einem maximalen

Anlagenbetriebsdruck von 10 bar. Es ist anzumerken, daß auch bei einem Versuch ohne Quenchvorgang der Quenchtrichter mit Wasser gefüllt unter dem Bündel steht.

Wie aus der Abb. 28 zu ersehen ist, wird bei einem Versuchsdruck von 2 bar eine Dampfexplosion schon im Hochdruckteil abgefangen, ohne daß die erste Entlastungseinrichtung, die Berstscheiben am Bündelkopftrichter ansprechen.

Anders ist die Situation bei einer Dampfexplosion bei dem maximalen Versuchsdruck von 10 bar. Hier sprechen die Berstscheiben am Bündelkopftrichter an und auch die Berstscheiben nach dem Schwallkondensator, dem ersten Druckentlastungsvolumen für den Hochdruckteil, werden wegen den zu erwartenden Drucksitzen sehr wahrscheinlich aufbrechen.

Damit wird der Weg zum zweiten Druckentlastungsvolumen, dem Containment frei. In der Abb. 29 ist die Containmentbelastung bei einer Dampfexplosion im Hochdruckteil bei dem, dem Auslegungsdruck von 12 bar gleichgesetzten, also um 2 bar überhöhten Versuchsdruck angegeben, wobei zur sicheren Seite hin vereinfachend eine Druckausbreitung von der Ereignisstelle im Quenchtrichter ausgehend, ohne Hochtemperaturschirm- und Quenchbehälterwand angenommen wurde.

Wie aus dem Vergleich des zulässigen Betriebsdruckes von 1 bar für das Containment mit dem aus der Störfallbetrachtung für eine Dampfexplosion notwendigen Auslegungsdruck von 0,4 bar zu sehen ist, besteht ein Sicherheitsabstand von 0,6 bar, d.h. eine Mindestreserve um den Faktor 2,5.

6.2 Wasserstoffexplosion

Es wurde schon mehrfach darauf hingewiesen, daß durch Reduktion von Wasserdampf an den Hüllrohren Wasserstoff entsteht, der im Gemisch mit Luft bei Zündung eine Explosion auslösen könnte. Durch die Inertgasfüllung des Hochdruckteiles vor Versuchsbeginn und durch dessen stetige Durchströmung zur Spülung und Druckkonstanthaltung ebenfalls mit Argon, ist die Gegenwart von Sauerstoff im Hochdruckteil jedoch auszuschließen.

Da im Hochdruckteil während des Versuchsbetriebes stets ein Überdruck gegenüber dem Containment vorhanden ist, ist schwer vorstellbar, daß durch ein Leck Luftsauerstoff eindringen könnte.

Selbst wenn Luft eingedrungen wäre, ist anzunehmen, daß sich diese aufgrund der hohen Temperatur an der Entstehungsstelle des Wasserstoffes, also am Bündel, ohne nennenswerten Druckaufbau mit dem Wasserstoff umsetzen würde.

Trotzdem wurde bei der Sicherheitsbetrachtung ein explosionsfähiges Gemisch unterstellt und die Auswirkungen einer Explosion auf die Anlage und das Containment untersucht.

Es wurden zwei Fälle unterschieden, eine Wasserstoffexplosion im Hochdruckteil der Anlage, im Hochtemperaturschirm, und eine Wasserstoffexplosion im Niederdruckteil der Anlage, also in der Abgasstrecke.

6.2.1 Wasserstoffexplosion im Hochdruckteil

Die Wasserstoff-Freisetzung wurde mit Hilfe des Rechenprogrammes MULTRAN, /8/ berechnet und ergab für einen Versuch mit maximaler Bündelgröße eine integrale Menge von 290 g bei einer maximalen Freisetzungsrate im Eskalationszeitbereich von 4 g/s.

Die Abschätzung des maximalen Explosionsdruckes im Hochdruckteil bei einem oberen Versuchsdruck von 10 bar, berechnet nach /7/ ergab für ein stöchiometrisches Wasserstoff/Luftgemisch bei 1000 °C einen Wert von 14,1 bar und zusammen mit dem Versuchsdruck einen Gesamtdruck von 24,1 bar. Dieser Druck führt zum Ansprechen der Berstscheiben am Bündelkopftrichter zum Schwallkondensator und möglicherweise ebenfalls zum Ansprechen der Berstscheiben am Schwallkondensator zum Containment, Abb. 30.

Aus der Abb. 30 sind auch die Auswirkungen einer Wasserstoffexplosion bei einem Versuchsdruck von 2 bar (Quenchversuche) und dem maximal zulässigen Betriebsdruck von 12 bar zu ersehen.

Im Containment wird der Überdruck des Schwallkondensators letztlich mit Sicherheit auf einen Wert unter 1 bar abgebaut, Abb. 29. Damit ist die Funktion des bereits beschriebenen Schutzkonzeptes gegen eine unterstellte Wasserstoffexplosion im Hochdruckteil ebenfalls nachgewiesen.

6.2.2 Wasserstoffexplosion im Niederdruckteil

Unter dem Niederdruckteil der Versuchsanlage CORA ist die Abgasstrecke zu verstehen, beginnend mit den Druckhalteventilen nach der Mischkammer (Abb. 3) bis zum Eintritt in die Abluftanlage 8000 m³/h des FR2. Im Kapitel 4.7 ist die Abgasstrecke näher beschrieben.

In der Abgasstrecke wird das aus dem Hochdruckteil abgegebene Wasserstoff/Argongemisch durch Zugabe von Luft unter die Zündgrenze verdünnt und anschließend in die Abluftanlage eingeleitet. Hier wird das für eine Explosion kritischste stöchiometrische Gemisch mit Sicherheit durchlaufen. Aus diesem

Grund wird hier eine Explosion sicherheitstechnisch betrachtet, obwohl das Vorhandensein einer Zündquelle auszuschließen ist.

Die Zusammensetzung des in die Abgasstrecke einströmenden Gasgemisches ist unter der Annahme, daß immer ein stöchiometrisches Gemisch vorliegt, abhängig vom Vordruck und der Temperatur an der Entstehungsstelle. Dementsprechend unterscheiden sich die Explosionsdrücke an der angenommenen Ereignisstelle (Abb. 31):

Vordruck 2 bar,	Temperatur 2000 °C:	7,1 bar
	Temperatur 1000 °C:	6,9 bar
Vordruck 10 bar,	Temperatur 2000 °C:	6,4 bar
	Temperatur 1000 °C:	5,8 bar

Durch die in die Abgasstrecke eingebauten Blenden und die zwischengeschalteten Laufstrecken für die Explosionswelle baut sich der maximale Explosionsdruck von 7,1 bar noch innerhalb der CORA-Abgasstrecke auf 0,5 bar an der Stelle D ab, um dann an den etwa 50 m weiter angeordneten Absolutfiltern der Abluftanlage 8000 m³/h noch 40 mbar zu betragen. Der zulässige maximale Vordruck an den Absolutfiltern beträgt 150 mbar.

Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme für die Absolutfilter ist eine Überdrucksicherung mit einem Ansprechdruck von 150 mbar vorhanden. Diese Überdrucksicherung öffnet im Explosionsfall die Abgasstrecke kurzzeitig zum Containment hin und schließt dadurch mit Sicherheit eine Beschädigung der weit stromabwärts liegenden Absolutfilter aus.

6.3 Abgasbeimischung, Abgasverdünnung

Die Verdünnung des Wasserstoffanteiles im Abgas aus dem Hochdruckteil geschieht mit einer Ventilgruppenkombination, deren Aufgabe es ist, gleichzeitig den Anlagendruck, also den experimentell gewünschten Versuchsdruck im Hochdruckteil, konstant zu halten. Die Wasserstoffkonzentration des Abgases darf vor dem Eintritt in die Rohrleitung zur Abluftanlage 8000 m³/h, an der Stelle D in der Abb. 31, 3,5 Vol% nicht überschreiten.

In der Abb. 32 ist ein vereinfachter Ausschnitt aus dem Fließschema der Gesamtanlage mit dieser Ventilgruppe dargestellt.

Das aus den Schwadenkondensatoren (Abb. 3) kommende Gasgemisch aus Argon und Wasserstoff wird in der Mischkammer MK 1 zusammengeführt und über die Druckhalte-Ventile Ve 201 und Ve 202 in die Abgasstrecke abgegeben. Hier erfolgt

die Zumischung von Verdünnungsluft über das Ventil Ve 203. Dieses Wasserstoff/Argon/Luft-Gemisch wird anschließend wie schon beschrieben, über ein System von Blenden in die Abluftanlage eingeleitet.

Die Zumischung der Verdünnungsluft hat nun so zu erfolgen, daß einmal die Gesamtabluftabgabe an das Abluftsystem möglichst gering bleibt und zum anderen die Wasserstoffkonzentration in dieser Abgasmenge zu jedem Zeitpunkt, also auch bei den zu erwartenden starken Konzentrationsgradienten während der Oxidationsskalation am Bündel, unter den erwähnten 3,5 Vol.% bleibt, um eine Wasserstoffexplosion in der Rohrleitung des nachfolgenden Abluftsystems 8000 m³/h ausschließen zu können.

Die handelsüblichen Betriebsmeßgeräte für eine direkte Wasserstoff-Konzentrationsmessung, die durchweg nach dem Prinzip der Wärmetönungs- oder Wärmeleitungs-Vergleichsmessung eines aufgeteilten Meßgasstromes bei einseitiger katalytischer Verbrennung des Wasserstoffes arbeiten, weisen Totzeiten bei schlagartigen Konzentrationsänderungen von bis zu 20 s auf. Die Verwendung eines solchermaßen verzögerten Meßsignals zur Ansteuerung des Luftbeimischventils Ve 203 ist daher wenig sinnvoll.

Eine Blendenmessung des Abgasstromes, z.B. vor den Druckhalte-Ventilen, bringt die Schwierigkeit einer für alle Versuchsbedingungen passende Blenden-dimensionierung, da experimentell bedingt, der Anlagendruck zwischen 2 und 10 bar bei etwa gleicher Wasserstoffproduktion eingestellt werden kann.

Eine weitere hier gewählte Möglichkeit zur Steuerung des Zuluftventils besteht darin, die momentanen Hubstellungen der Druckhalte-Ventile in Verbindung mit dem Druck in der Mischkammer MK 1, gemessen über die Druckmeßstelle P 363 und verknüpft mit den Daten der in einem Ventilprüfstand ermittelten, temperatur- und druckabhängigen Ventildurchflußkennlinien direkt zur Steuerung der Hubstellung des Zuluftventiles heranzuziehen.

Mit der sicherheitstechnisch konservativen Annahme, daß alles aus der Mischkammer MK 1 abzugebende Gas aus Wasserstoff besteht - der Argonanteil wird der Wasserstoffmenge hinzugerechnet und in der Folge "verdünnt" -und unter Verwendung eines Prozeßrechners für die Verknüpfung der Meßwerte mit den Ventilkenn-daten, ist eine sichere und vor allen Dingen äußerst schnelle Zumischung der Verdünnungsluft möglich.

Wegen der Wichtigkeit bezüglich der Funktionssicherheit dieser Regelgruppe für einen sicheren Anlagenbetrieb, wurden einige hardwaremäßigen Vorkehrungen getroffen. So durchläuft der Prozeßrechner alle 800 ms eine Prüfschleife. Bei einer Programmstörung wird das Zumischventil voll aufgefahren und der Rechner startet währenddessen das Programm neu. Ist die Störung behoben, steuert der Rechner das Ventil wieder auf die programmierte Betriebsstellung zurück.

Ferner verfügt der Rechner über einen Kontrollausgang, der speziell seine Spannungsversorgung überwacht. Bei Spannungsausfall an der Rechereinheit aber sonst intakter Spannungsversorgung für die Steuerung allgemein, wird ein Alarm ausgelöst, der dem Operateur die Möglichkeit einer Handeinstellung des Zumischventiles anhand von Tabellenwerten gibt. Selbstverständlich liegt die gesamte Regelgruppe zusätzlich an einer Notstromversorgung.

Ein Ausfall der Druckluftversorgung ist durch einen Direktanschluß an das allgemeine KfK-Druckluftsystem äußerst unwahrscheinlich. Zudem ist die Versorgung noch durch parallelgeschaltete Druckluft-Speicherbehälter, die mit Rückströmverhinderern ausgerüstet sind, für eine ausreichend lange Zeit nach der, in einem solchen Fall auch aus anderen Gründen notwendig werdenden, Anlagenabschaltung sichergestellt.

6.4 Feuerlöscheinrichtung

Das Gefährdungspotential, hervorgerufen durch das Wärmeübertragungsöl der Verdampfer-Überhitzereinheit, etwa 100 l Marlotherm S, Zündtemperatur nach DIN 51794 über 500 °C, ließ es ratsam erscheinen, eine ortsfeste Feuerlöscheinrichtung zu installieren. Zwar ist eine Selbstentzündung einer offenen, sich auf der maximalen Betriebstemperatur von 270 °C befindlichen Ölmenge wenig wahrscheinlich, feinverteilt aber, z.B. in der Rohrleitungsisolierung, hervorgerufen durch ein kleines Leck, ist eine solche Entzündung nicht völlig auszuschließen.

Der durch einen Brandfall hervorgerufene Schaden an den zahlreichen elektronischen Bauteilen innerhalb des Containments wäre sicherlich beträchtlich, obgleich eine Gefährdung der Umgebung auch in diesem Fall nicht zu erwarten ist. Der Brand würde infolge Sauerstoffmangel im Containment von selbst erlöschen.

Aus diesen Gründen und um Fehlauslösungen vorzubeugen, wurde auch keine automatische Feuerlöscheinrichtung installiert, sondern nach einem Brandalarm über Rauchgasmelder muß sich der verantwortliche Operateur über die Schauglä-

ser in der Containmentwand von der tatsächlichen Lage überzeugen und notfalls dann die HALON-Gas-Löscheinrichtung auslösen.

Das Löschgas HALON 1301 (Bromtrifluormethan) ist ein unter Druck verflüssigtes Gas, Dampfdruck bei 20 °C = 14,63 bar und sehr leicht flüchtig. Seine löschwirksame Konzentration liegt bei der überwiegenden Zahl der Brandstoffe bei 3 - 10 Vol.%. Es ist elektrisch nicht leitend und eignet sich daher besonders zum Schutze von elektrischen und elektronischen Anlagen, zumal der Löschvorgang vollkommen rückstandsfrei erfolgt.

Pyrolyseprodukte des Löschgases treten erst bei verhältnismäßig hohen Temperaturen auf (z.B. bei 600 °C - 0,3 %, 800 °C - 2 %, 900 °C rund 20 %). Als gefährlichstes Spaltprodukt ist Brom zu nennen, das jedoch infolge seiner starken Reizwirkung schon in geringen Konzentrationen eine erhebliche Warnwirkung ausübt.

Berichte über Schäden an Geräten oder Anlagen durch die Zersetzungsprodukte des HALONS sind nicht bekannt geworden.

Eine Probeflutung mit einem Flascheninhalt (77 kg) ergab an drei im Containment verteilten Meßstellen innerhalb 10 s eine Konzentration von 6 - 7 Vol.%, die über 15 min unverändert anhielt. Damit sind die Mindestwerte nach DIN 14496 weit überschritten.

Der Druckanstieg im Containment betrug dabei 0,06 bar, die HALON-Konzentration wurde anschließend durch die Containment-Absaugung innerhalb 30 min von 6 % auf 0,5 % verringert, d.h. das Containment war wieder betretbar.

6.5 Radioaktive Stoffe, Rückhaltung

Die im inaktiven Brennstab-Simulatorbündel eingesetzten Ring- und Vollpellets aus UO₂ mit abgereichertem bzw. Natururan sind nach einem Versuchsdurchlauf wegen dem Aufschmelzen der Hüllen als offener radioaktiver Stoff zu betrachten, so daß der § 53 der StrlSchV zu beachten ist. Für ein Bündel mit 37 Stäben läßt sich die Uran-Menge auf 23 kg abschätzen, beträgt also weniger als das 100-fache der Freigrenze nach der StrlSchV.

Die Anforderungen, die sich aus der Aktivität des Urans ergeben, sind daher begrenzt. Aufgrund der geringen spezifischen Aktivität des Pelletmaterials werden die Ortsdosisleistungen gering sein, spezielle Abschirmmaßnahmen können daher entfallen. Es sind letztlich nur die Richtlinien für den Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen zu beachten.

Durch den sicheren Einschluß der radioaktiven Stoffe im Containment während und bei Beachtung der Vorschriften auch nach einem Versuch, ist eine örtliche Begrenzung der zu erwartenden Oberflächenkontamination auch bei geöffnetem Hochdruckteil gewährleistet.

Mögliche Freisetzungen über die Containment-Entlüftung werden, ebenso wie solche über die Raumlufanlage der Rotunde, kontrolliert und gefiltert abgegeben. Wegen der vorliegenden Form des Urans und bei planmäßigem Umgang damit sowie unter Berücksichtigung der am FR2 installierten Rückhalteeinrichtungen, ist nicht zu besorgen, daß von der CORA-Anlage ein wesentlicher Beitrag zur zulässigen Ableitung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft am FR2 erfolgt.

6.6 Personenschutz

Es bedarf keiner besonderen Erläuterung, daß zum Schutz der Betriebsmannschaft bei der Durchführung von Versuchen in technischen Grenzgebieten besondere Vorkehrungen zu treffen sind. Insbesondere schon deswegen, weil bei der Konzepterstellung solcher Anlagen meist keine vergleichsweise heranziehbareren Betriebserfahrungen vorliegen und man sich nur auf theoretisch zu betrachtende Störfallabläufe abstützen kann.

Aus diesem Blickwinkel und nicht nur zur Absicherung der Integrität des FR2, ist die Entscheidung zu sehen und auch zu vertreten, die CORA-Anlage mit einem druckfesten Containment zu umhüllen. Die daraus folgende Konsequenz war, daß alle Maßnahmen die zum Betrieb der Anlage und zur Bedienung der experimentellen Meßeinrichtungen während eines Versuches notwendig sind, von Stellen außerhalb des Containments erfolgen müssen. Dies bedeutet eine Fernbedienung aller Geräte und Fernübertragung aller Meßwerte und Störmeldungen.

Mit diesem Konzept, daß sich während eines Versuches keine Personen im Containment aufhalten müssen und dürfen, ist unter Berücksichtigung der Containment-Druckfestigkeit für die vorstellbaren Störfälle, ein optimaler Personenschutz zu jedem Versuchszeitpunkt gewährleistet.

7. Schlußbemerkungen

Das Auslegungskonzept und die technischen Einrichtungen der CORA-Anlage bietet ein Experimentierpotential, mit dem nicht nur alle in der Versuchsmatrix festgelegten Experimente durchgeführt werden können, sondern darüber hinaus flexibel auf zusätzliche Anforderungen, geboren aus den Versuchsergebnissen, reagiert werden kann.

Selbst eine Erweiterung auf reinen Argon-Betrieb zum Hochheizen des Brennstab-Simulatorbündels unter Verzicht einer elektrischen Stabheizung ist bereits im Konzept vorgesehen, wird sich aber wahrscheinlich, wie im Kapitel 4.8 schon gesagt, nicht mehr realisieren lassen.

Bezüglich der Anlagenerstellung sei neben der wohl trivialen Feststellung, daß es sich bei solcher Art von Versuchsanlagen immer um Einmalausführungen ohne Vorbild handelt, darauf hingewiesen, daß auch die von der Experimentatorseite während der Planungs- und Aufbauphase natürlicherweise immer hinzukommenden neuen Gesichtspunkte und Anforderungen zu berücksichtigen sind. Dies kann nicht ohne Konzessionen an die Aufbauzeit und die Kosten geschehen, sichert aber im Endeffekt eine passgenaue Anlagenausführung mit optimaler Anpassung an die Versuchsvorstellungen des Experimentators.

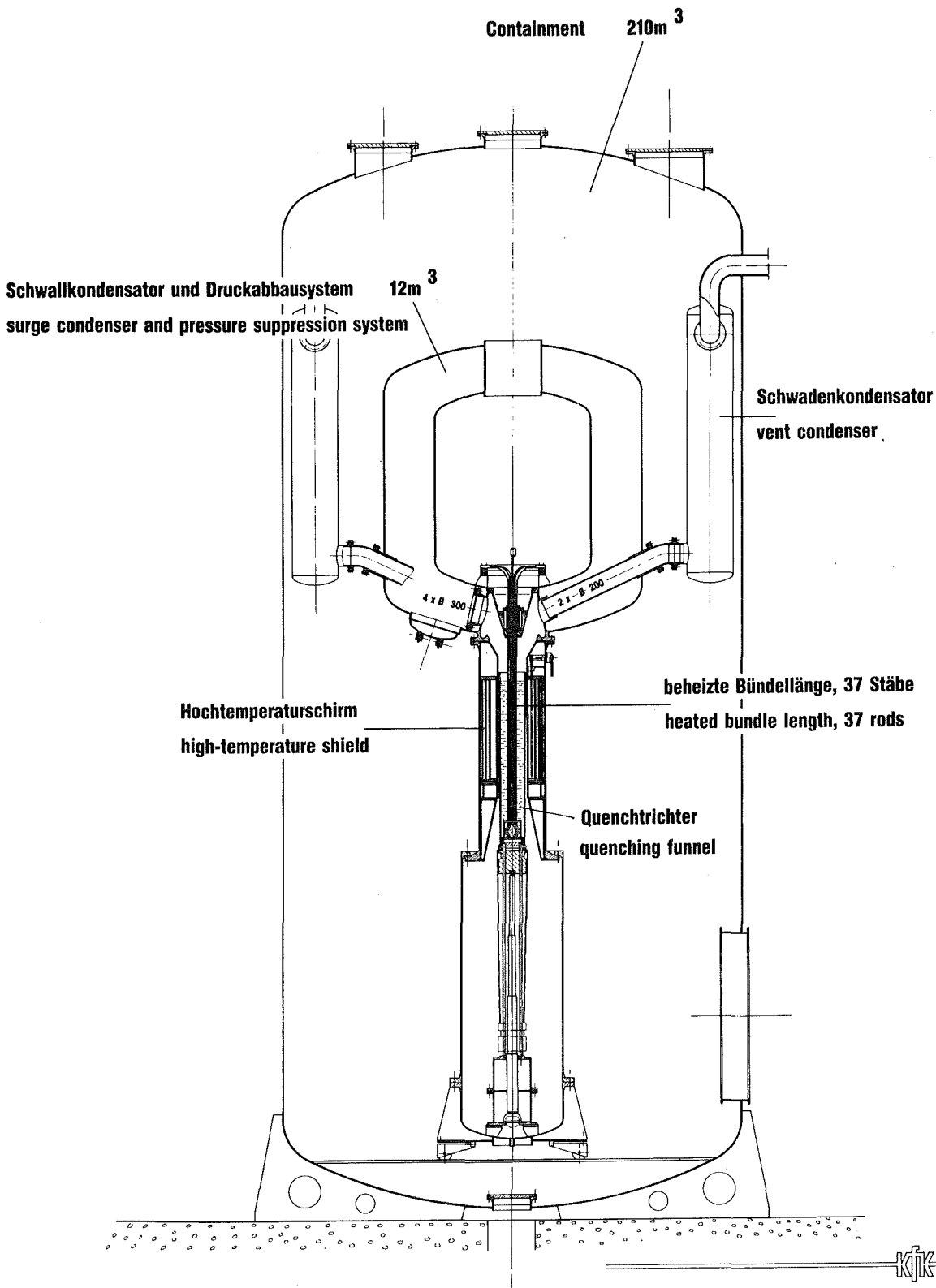
Für den Anlagenersteller sind dies neben den üblichen Schwierigkeiten, die, basierend auf den äußeren und inneren Randbedingungen, für eine Anlagenerstellung immer vorhanden sind, zusätzliche Erschwernisse, die oft nur durch das dann erzielte Endergebnis, eben einer allen experimentellen Anforderungen gerecht werdenden Anlage, ausgeglichen werden.

Abschließend sei der Aufwand in Personal, Geld und Zeit für die Anlagenerstellung CORA angegeben:

Beginn der Anlagenplanung:	Mitte	1981
Anlagen-Inbetriebnahme:	November	1985
Beginn Experimentierbetrieb:	Herbst	1986
Investitionen	2238	TDM
Personaleinsatz	34,1	MJ

Literaturangaben:

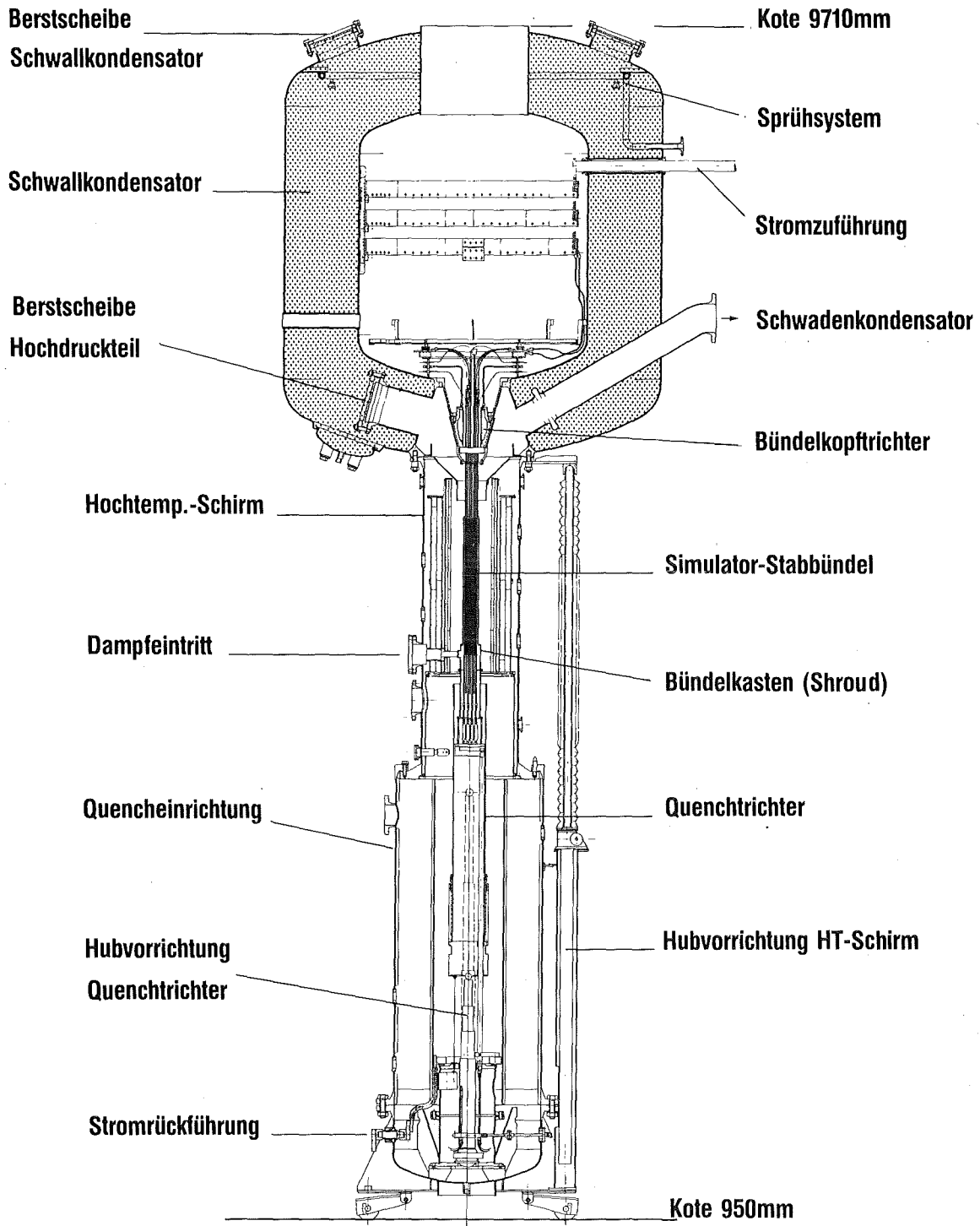
- /1/ A.Fiege, Severe Fuel Damage Investigations of KfK/PNS,
KfK 3431B, Jan. 1983
- /2/ S.Hagen, Dez. 1977, unveröffentlicher Bericht der KfK
- /3/ K.Wagner, STATI-4, ein eindimensionales instationäres Wärmeleitprogramm für Zylindergeometrie,
KfK 3348, Mai 1984
- /4/ E.Phillipow, Taschenbuch der Elektrotechnik, Bd. 6, Systeme der
Energietechnik, Hansa-Verlag, 1982
- /5/ P.Kluge, G.Schaffer, Die Erwärmung von Eisenteilen in der Nähe von
Hochstromschienen,
BBC-Mitteilungen 54 (1967), H2/3
- /6/ T.Vollmer, G.Harbauer, Sept. 1983, unveröffentlicher Bericht der KfK
- /7/ Pfortner, unveröffentlicher Bericht des Fraunhofer-Instituts für
Treib- und Explosionsstoffe, 1982



KIK IT - 1982

Severe fuel damage - Versuchsanlage CORA
PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT PNS

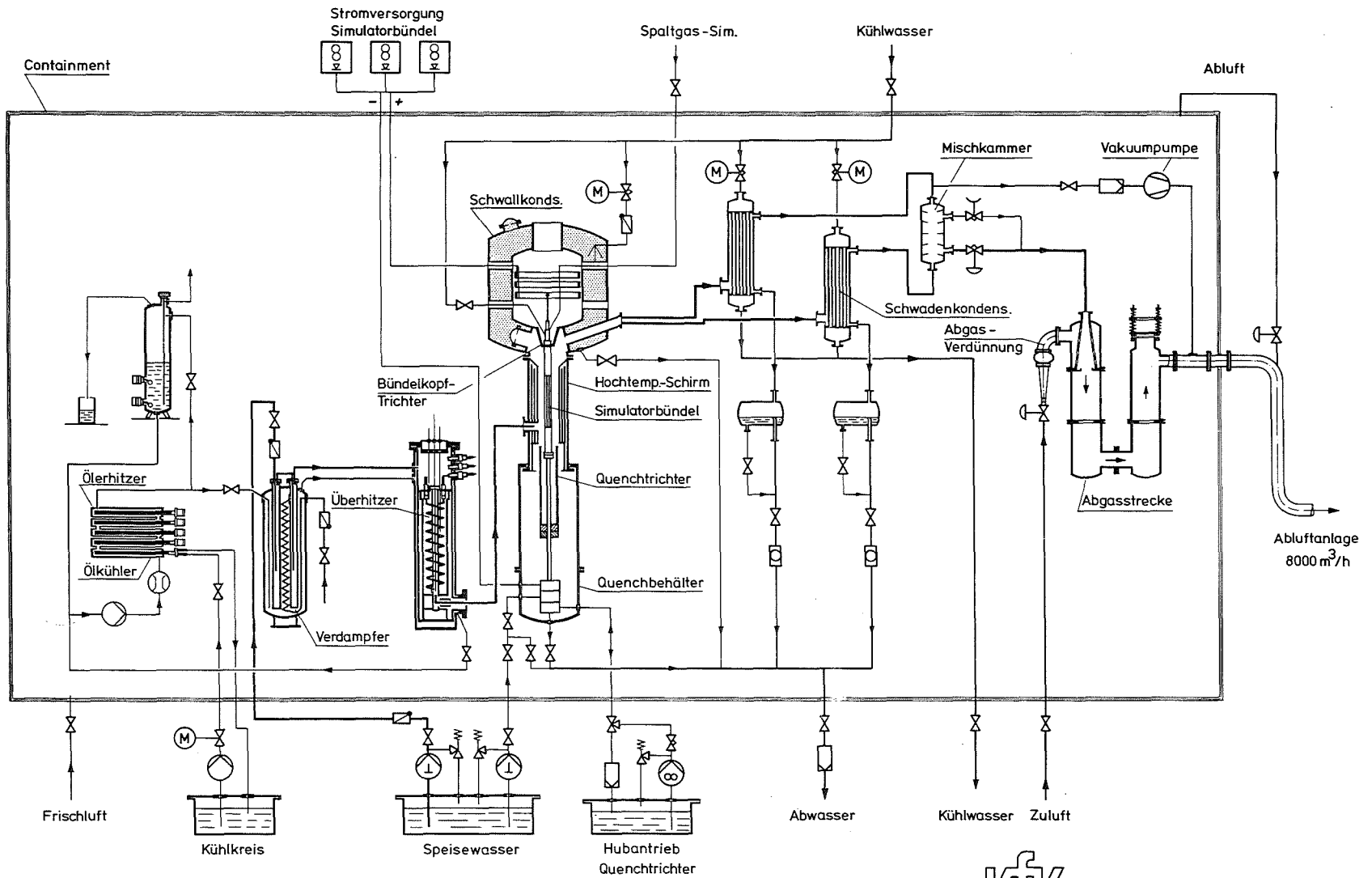
Abb. 1:



IT-1984

SFD-Versuchsanlage CORA-Versuchsapparatur

Abb. 2:

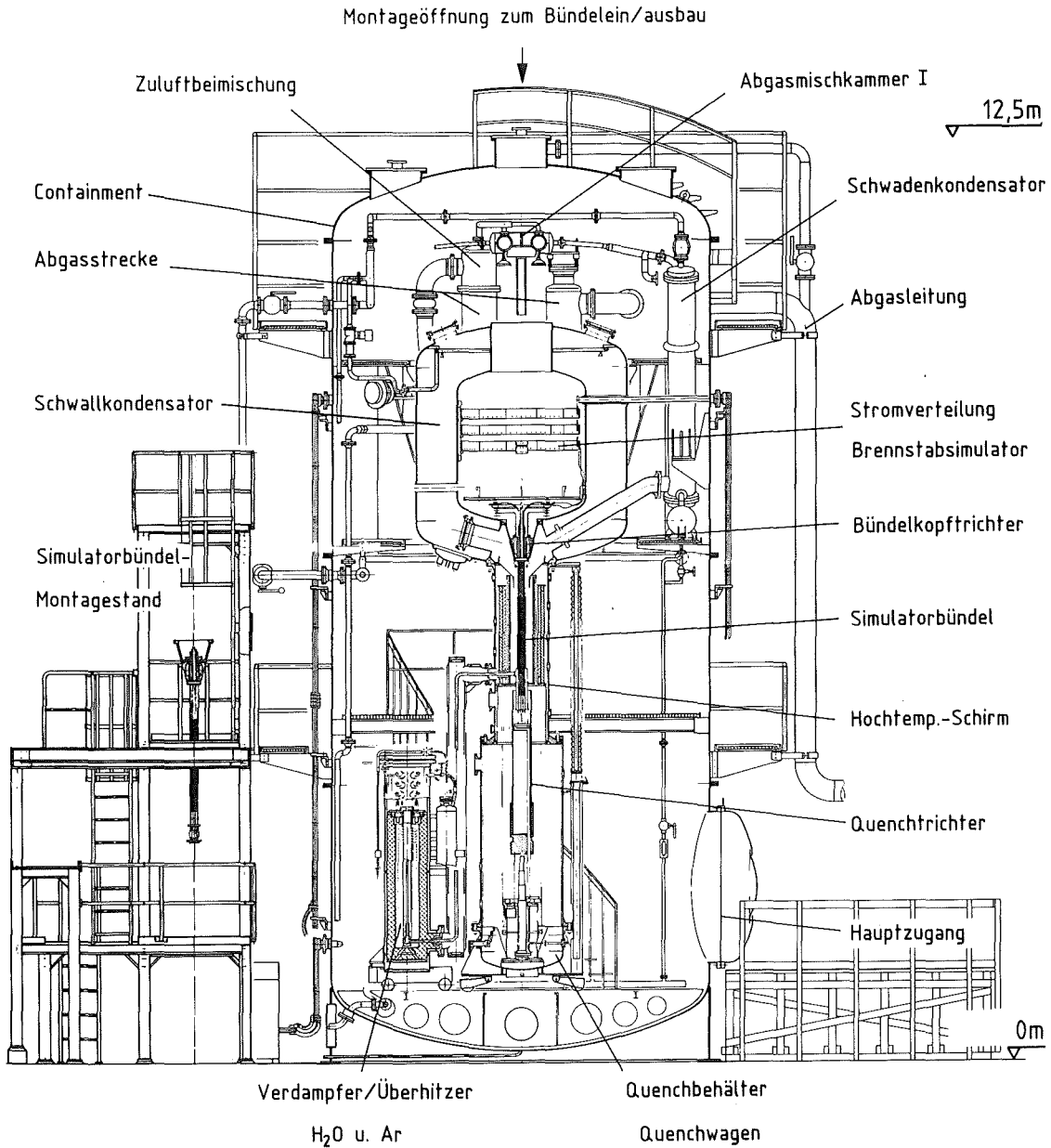


- 46 -



SFD - Versuchsanlage CORA Anlagenschema

Abb. 3:

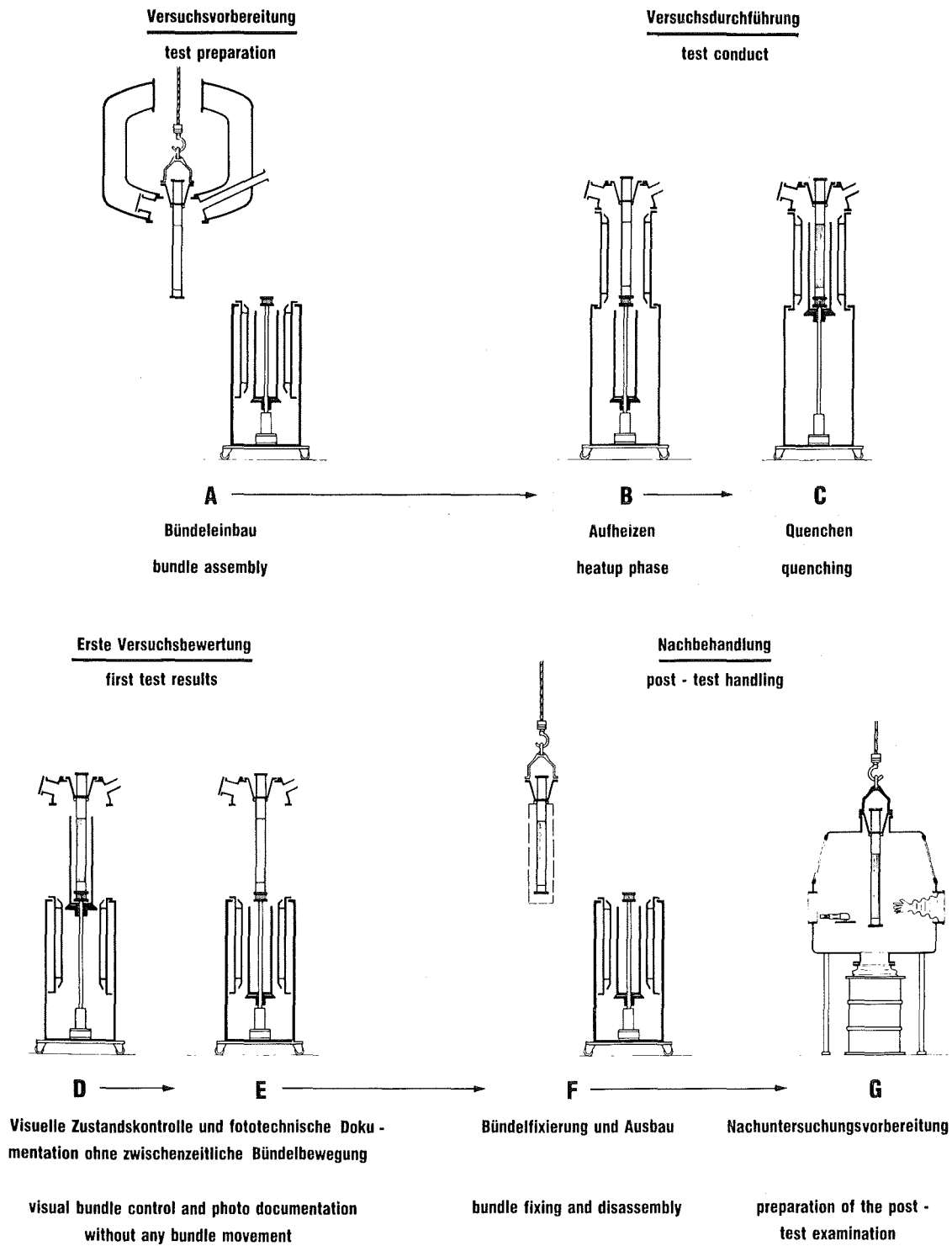


KfK IT-1985

SFD-Versuchsanlage CORA

Gesamtaufbau mit Komponentenordnung im Containment

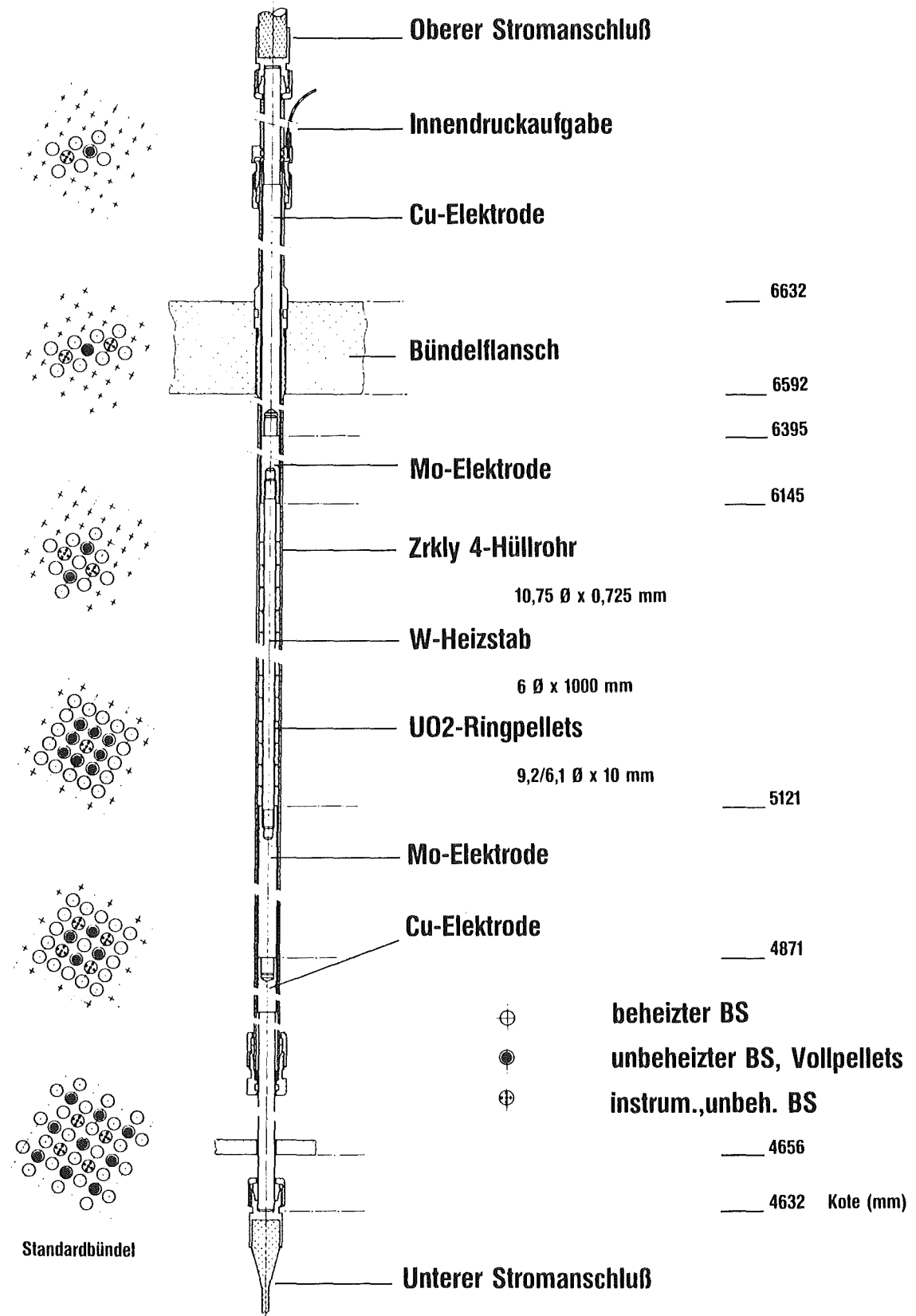
Abb. 4



SFD - Versuchsanlage CORA, Versuchsablaufschritte

Abb. 5:

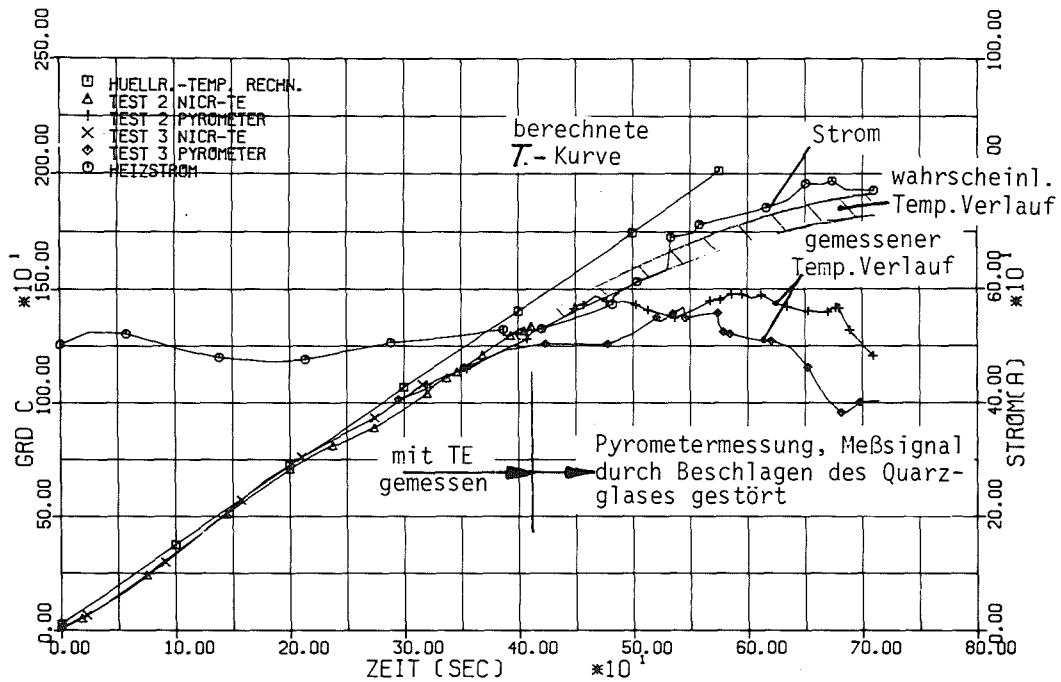
Mögliche BS-Anordnungen im 7x7 Bündelraster



IT-1984

SFD-Versuchsanlage CORA - Beheizter Brennstabsimulator BS

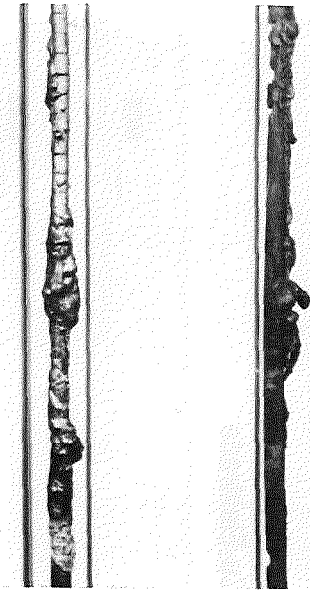
Abb. 6:



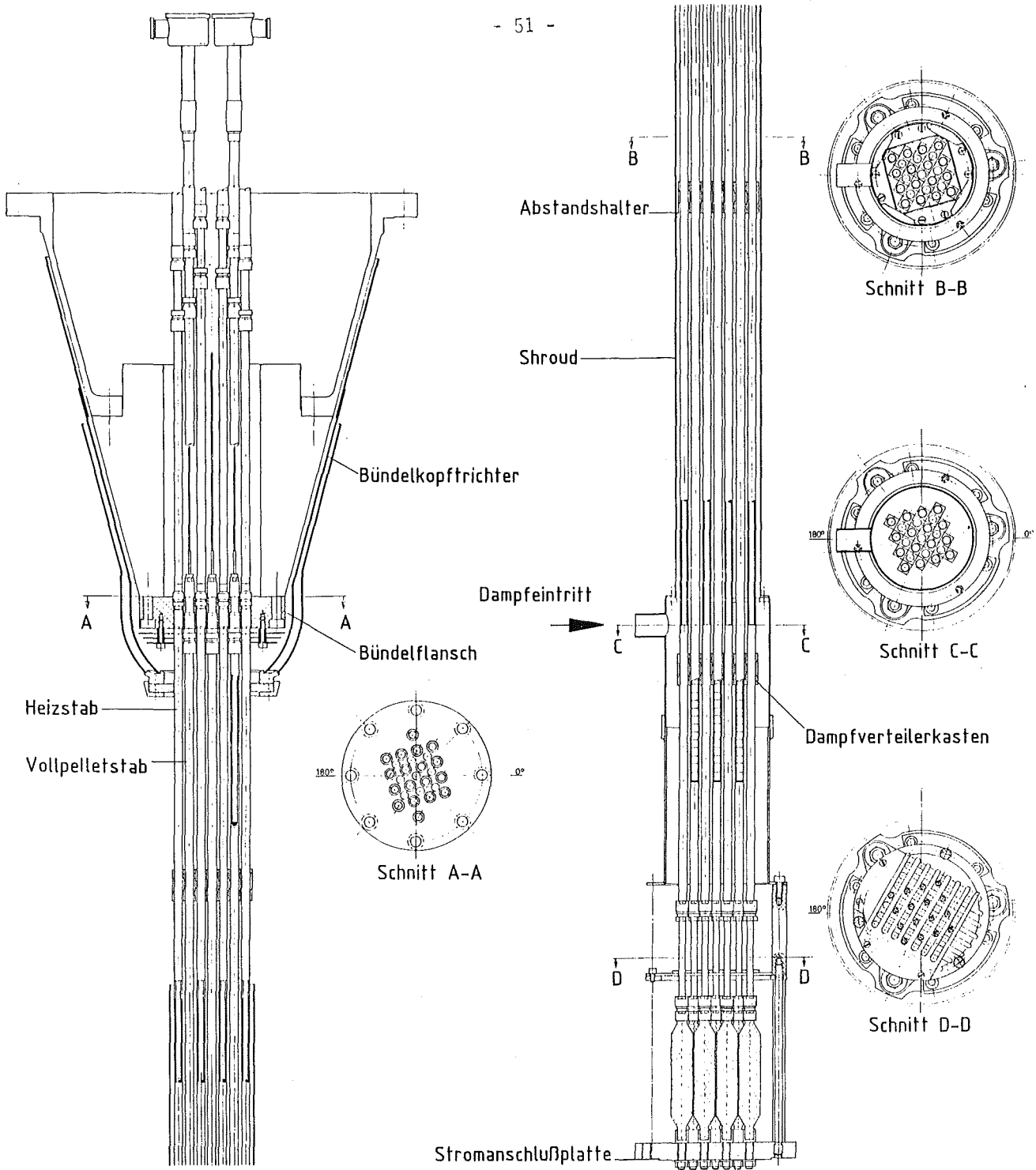
c)

Typischer Temperatur-und Stromverlauf während eines Vorversuchs

Heizstäbe mit abgeschmolzenem Hüllrohr

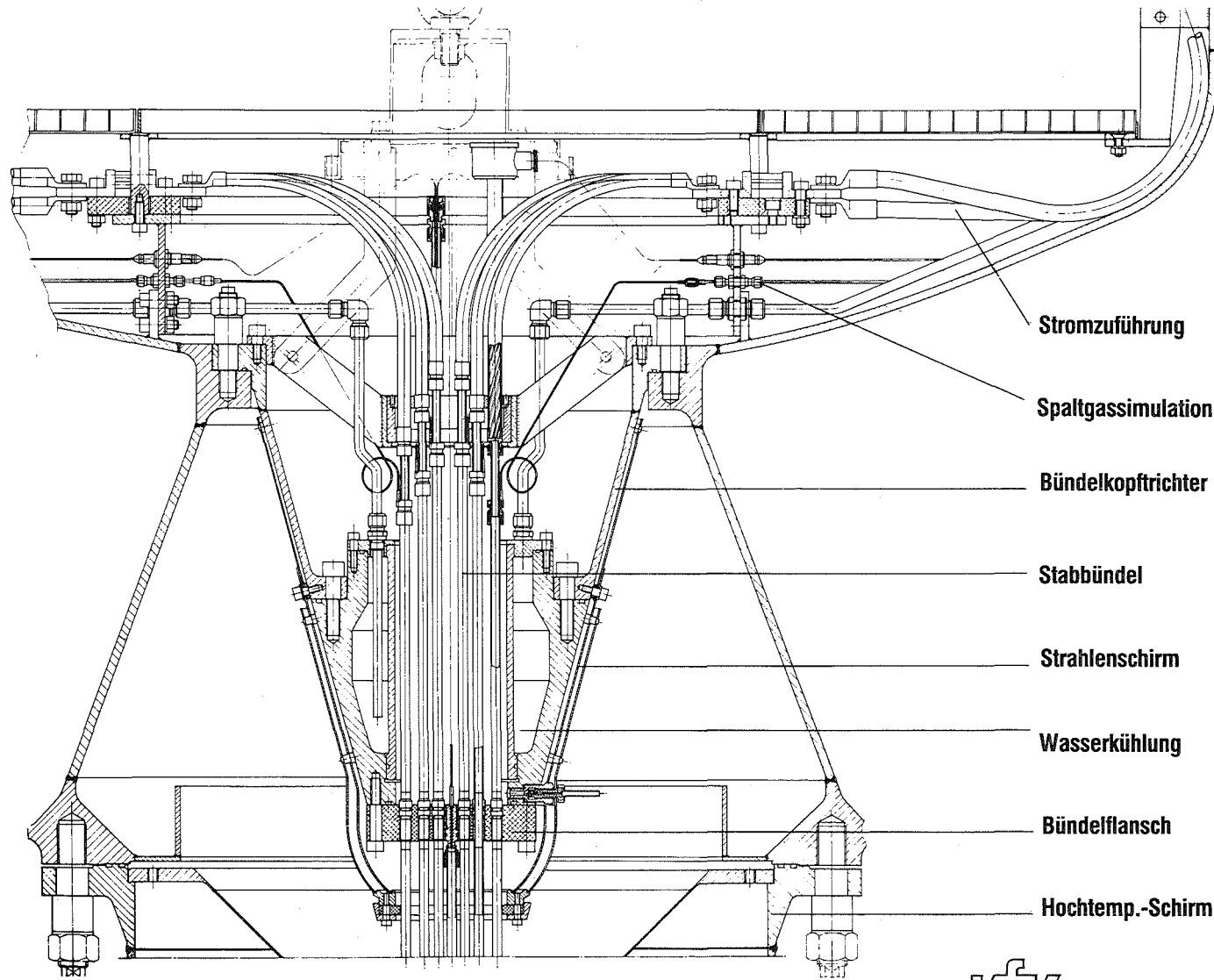


- 50 -



SFD-Versuchsanlage CORA Brennstab-Simulatorbündel, Typ a

Abb. 8:



Stromzuführung

Spaltgassimulation

Bündelkopftrichter

Stabbündel

Strahlenschirm

Wasserkühlung

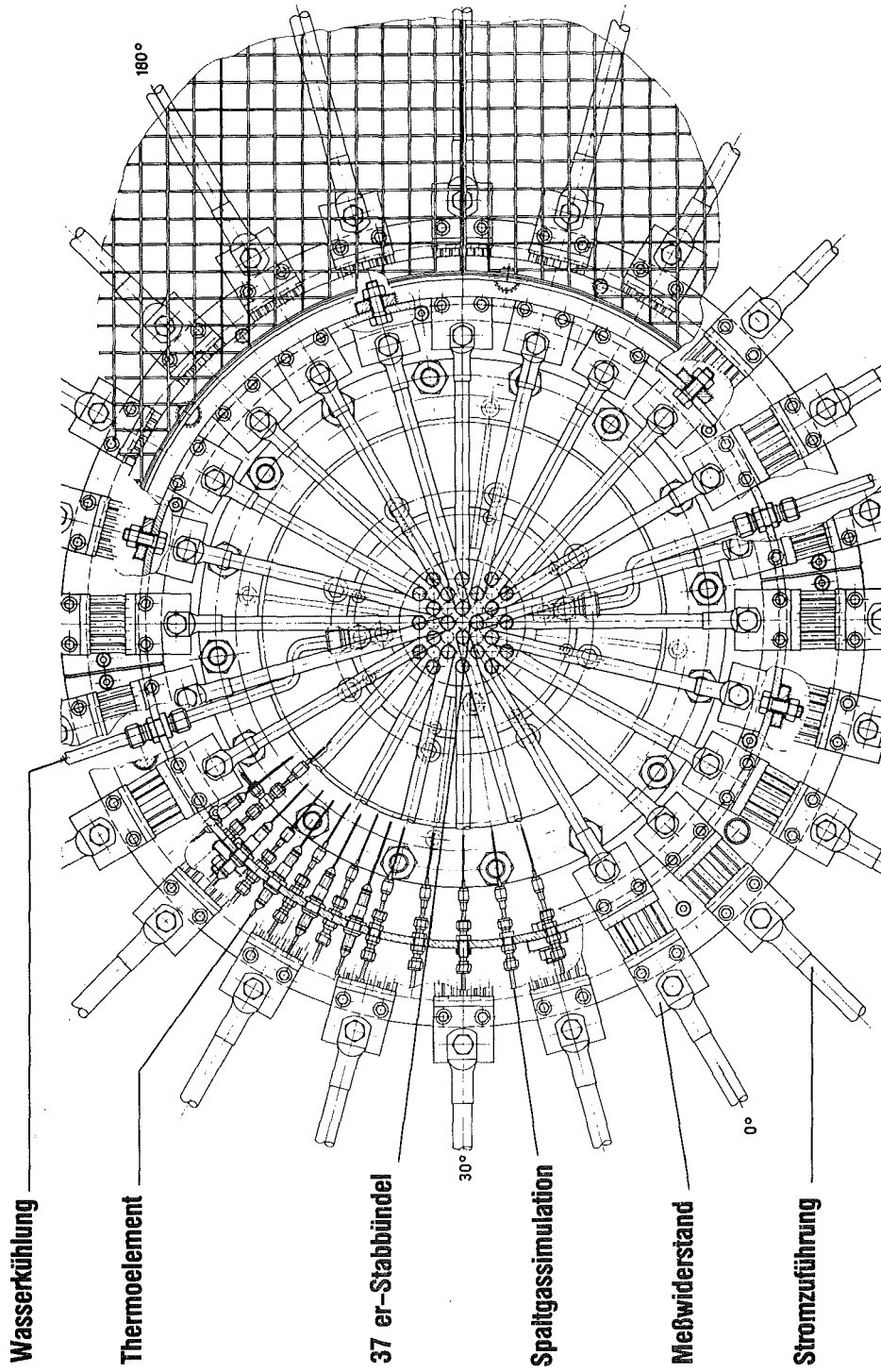
Bündelflansch

Hochtemp.-Schirm

KfK

IT-1984

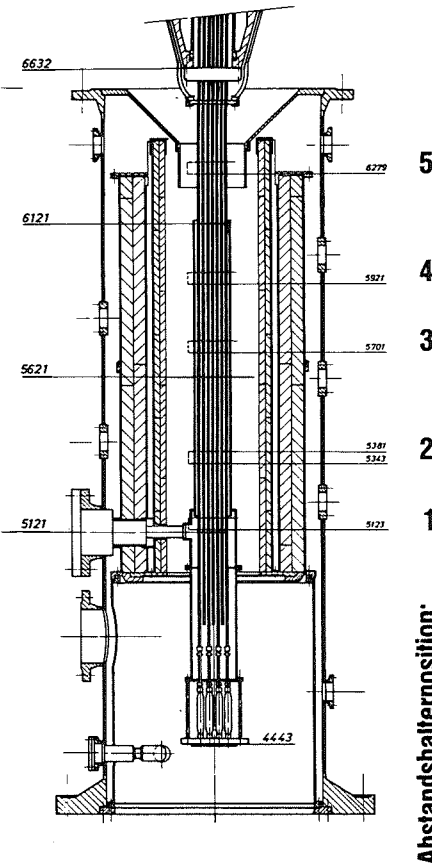
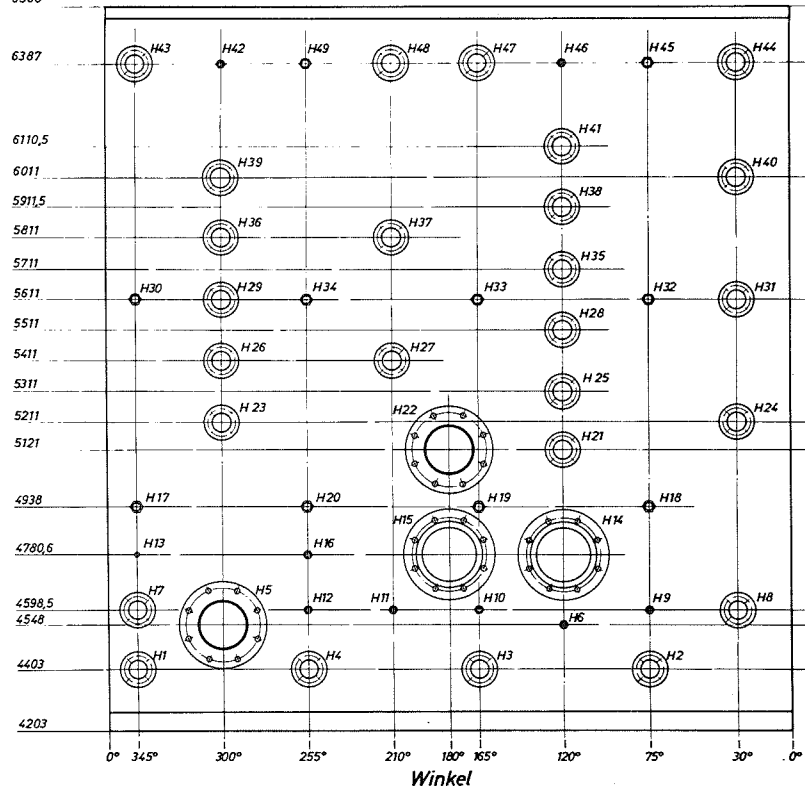
SFD-Versuchsanlage CORA-Bündelkopftrichter



IT-1984

SFD--Versuchsanlage CORA--Bündelkopftrichter

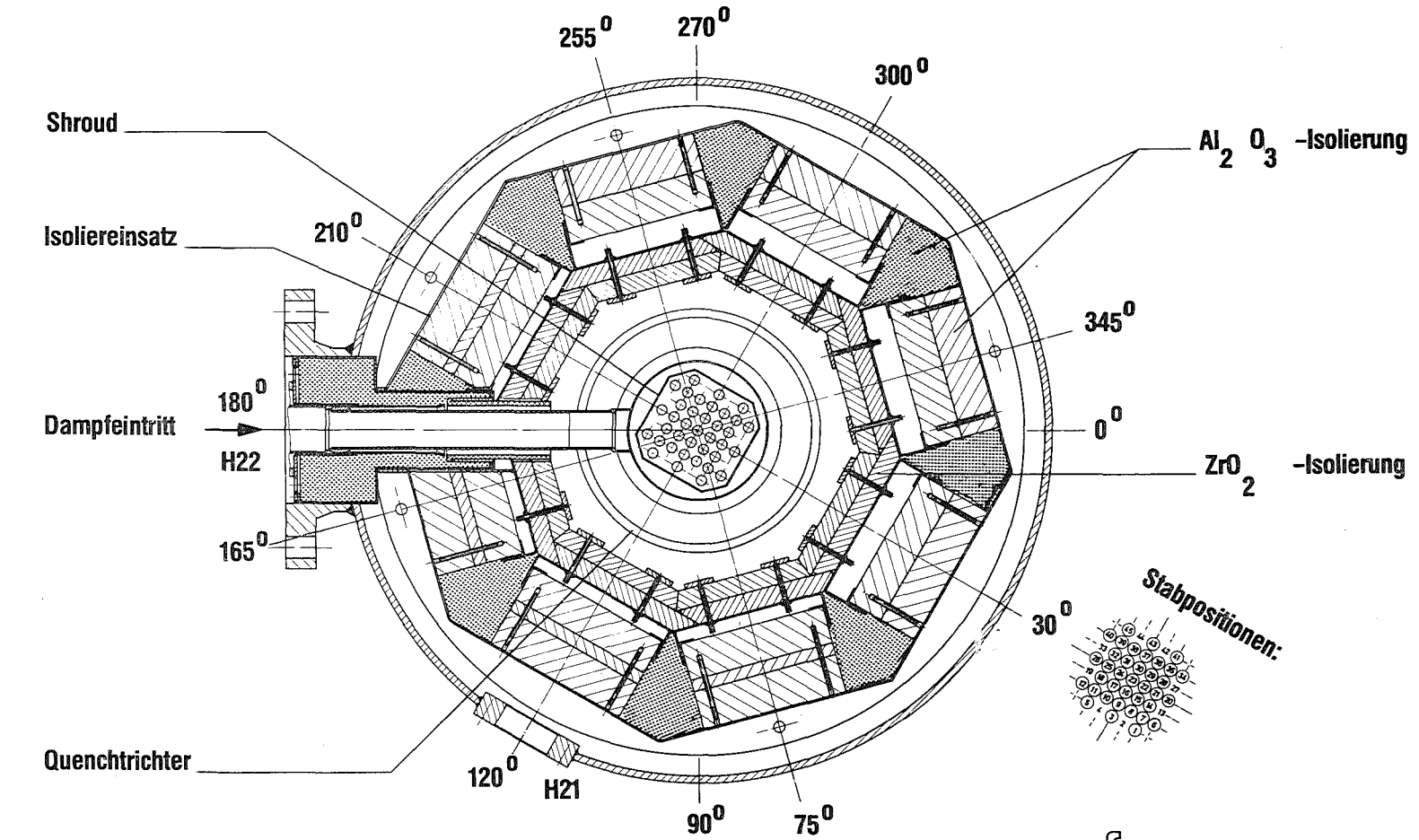
Kote (mm)
6568



IT-1984

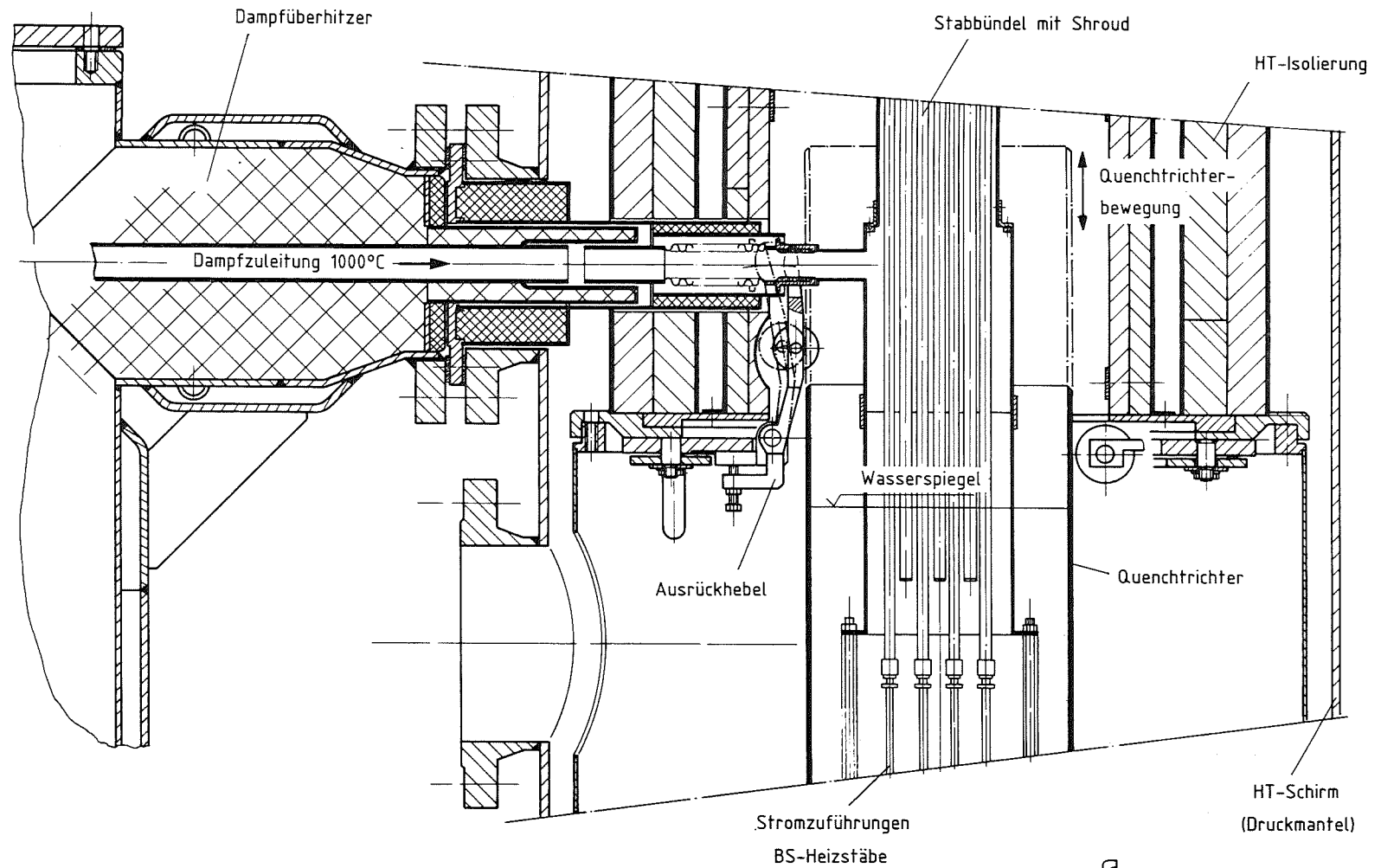
SFD-Versuchsanlage CORA – Stutzenlage HT-Schirm

Abb. 11:



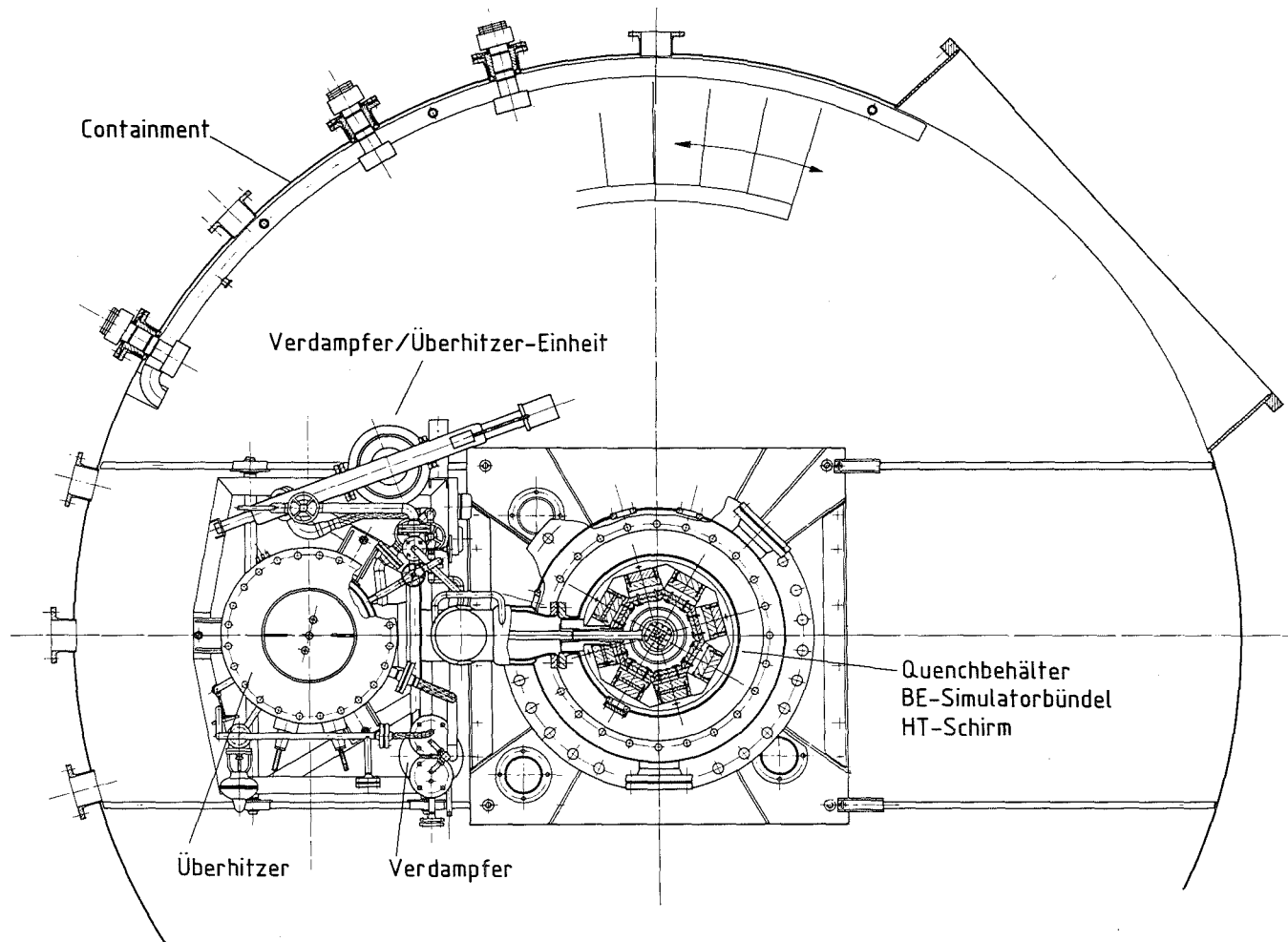
IT-1984

SFD-Versuchsanlage CORA – Querschnitt durch den HT-Schirm



SFD-Versuchsanlage CORA
 Ausrückmechanismus für die Dampfzuleitung zum BS-Bündel

Abb. 13:

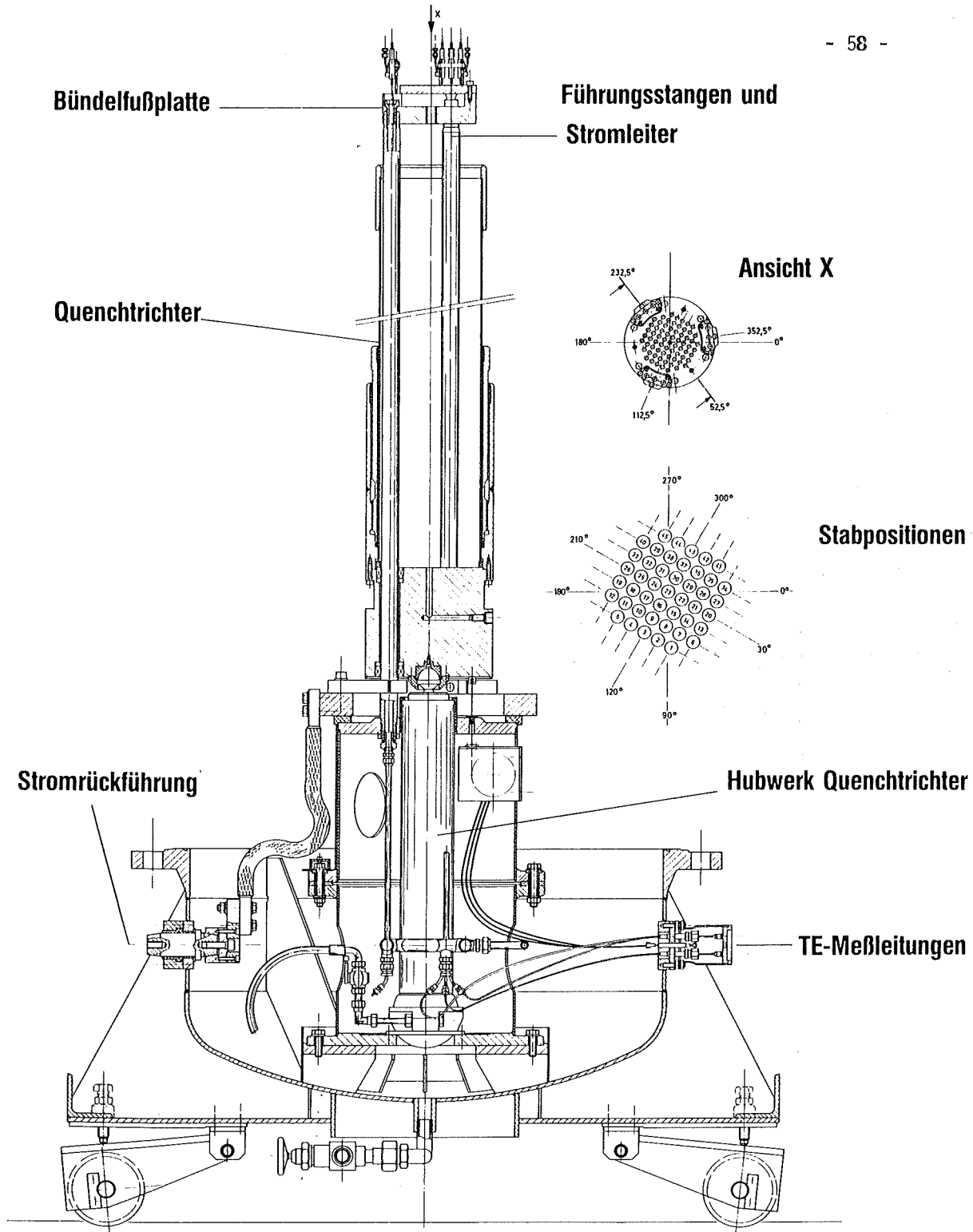


- 57 -



SFD-Versuchsanlage CORA
 Draufsicht auf den Quenchbehälter und Verdampfer/Überhitzer im Containment

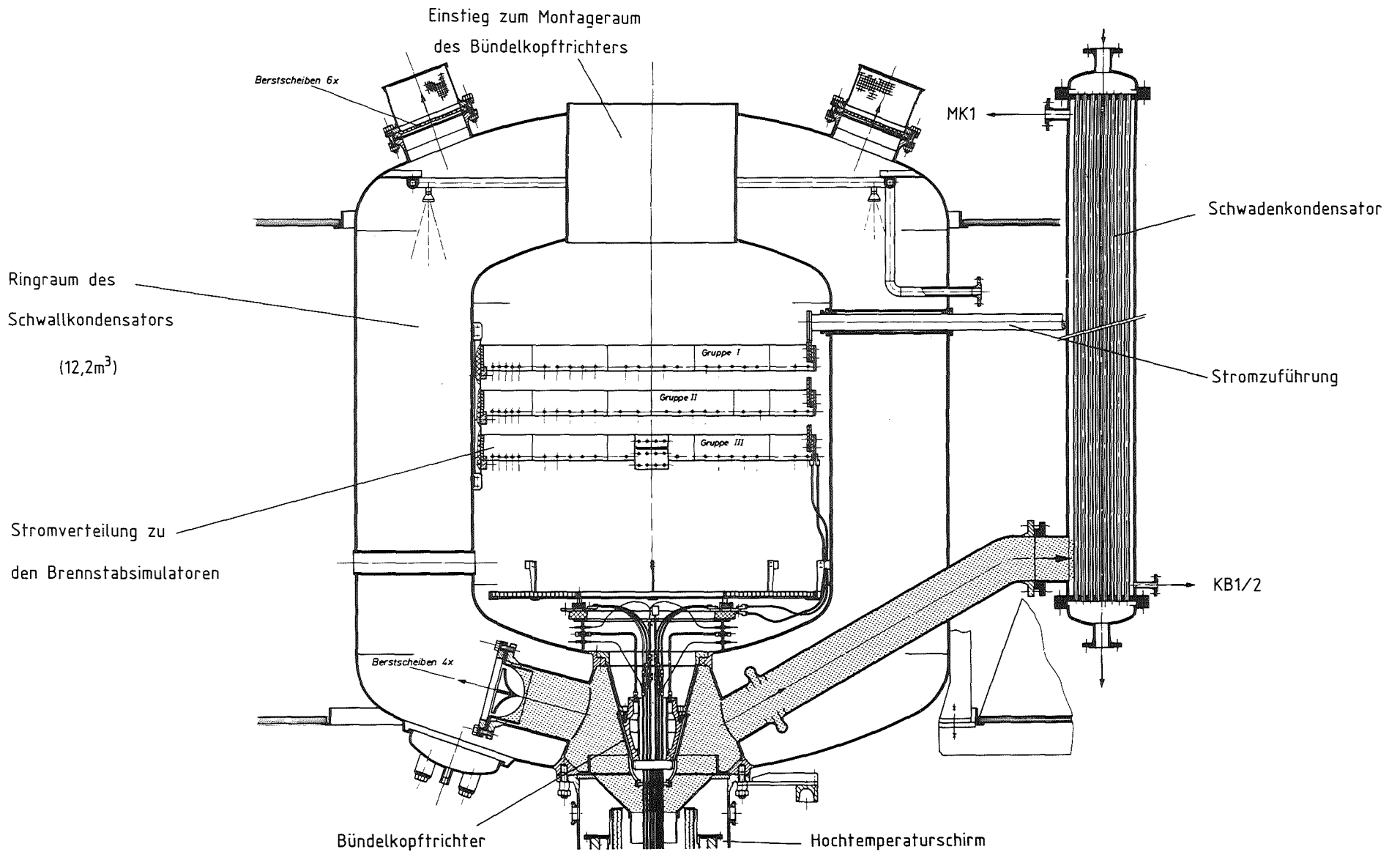
Abb. 14:



IT-1984

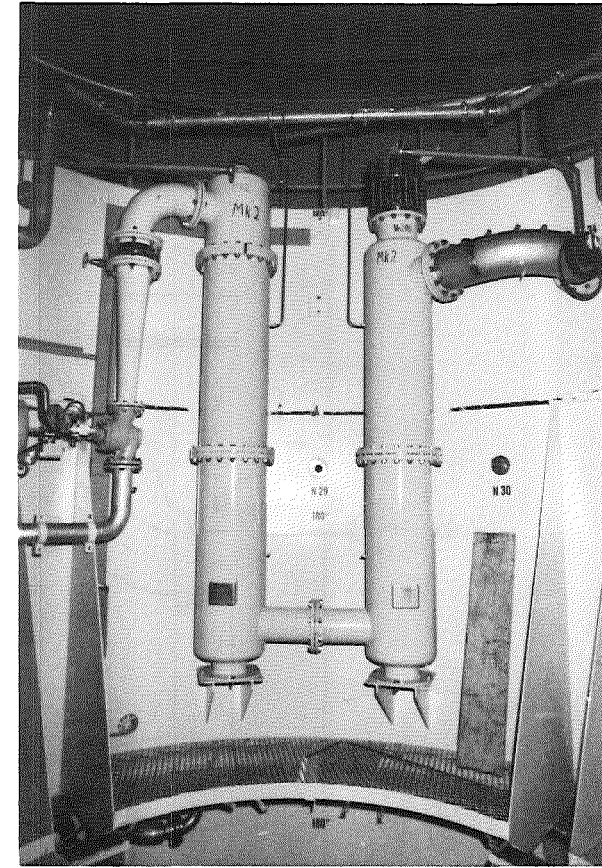
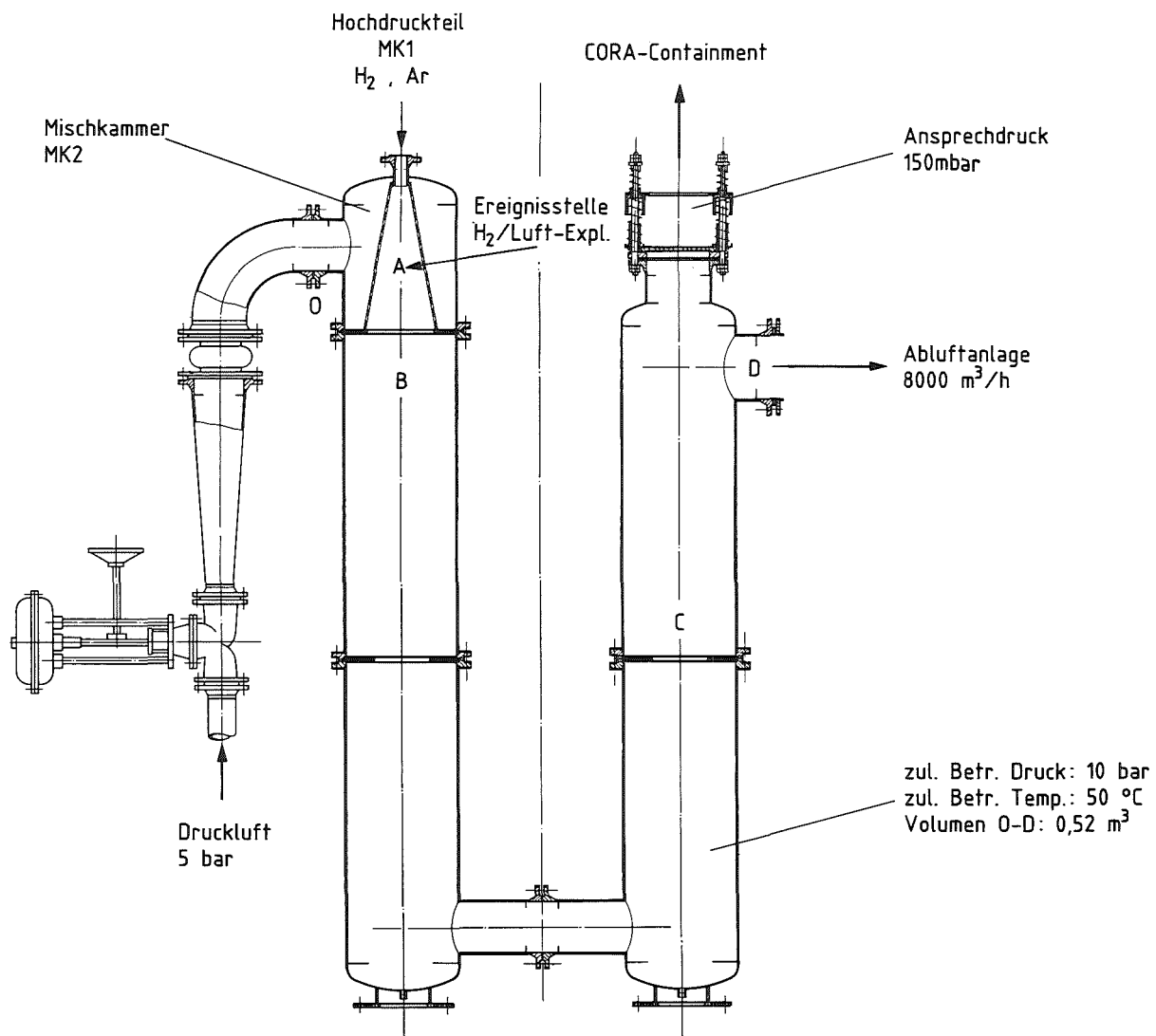
SFD-Versuchsanlage CORA - Quenchbehälter Unterteil mit Hubwerk

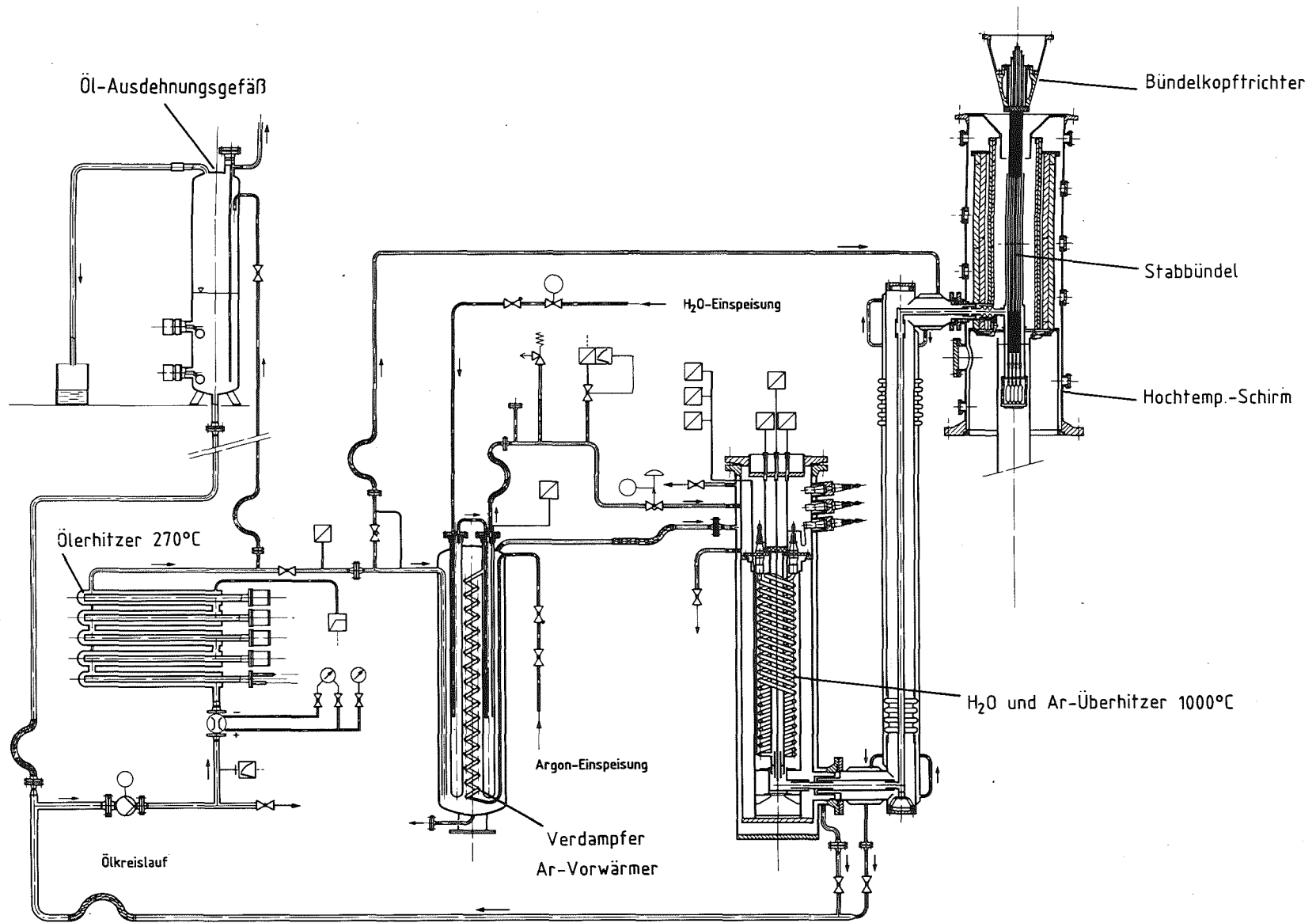
Abb. 15:

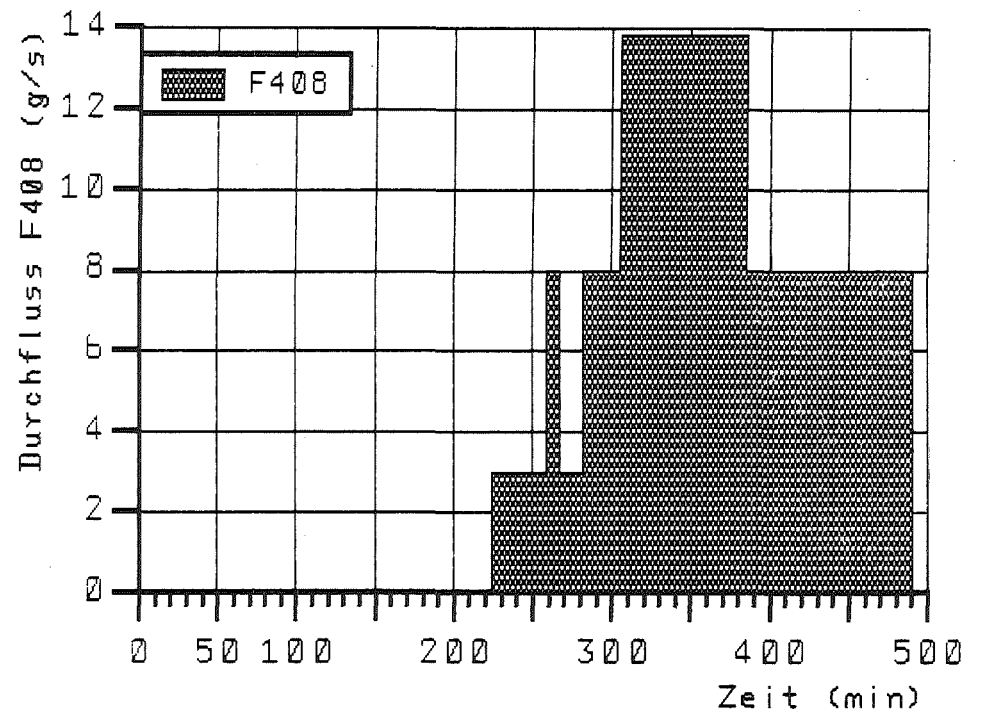
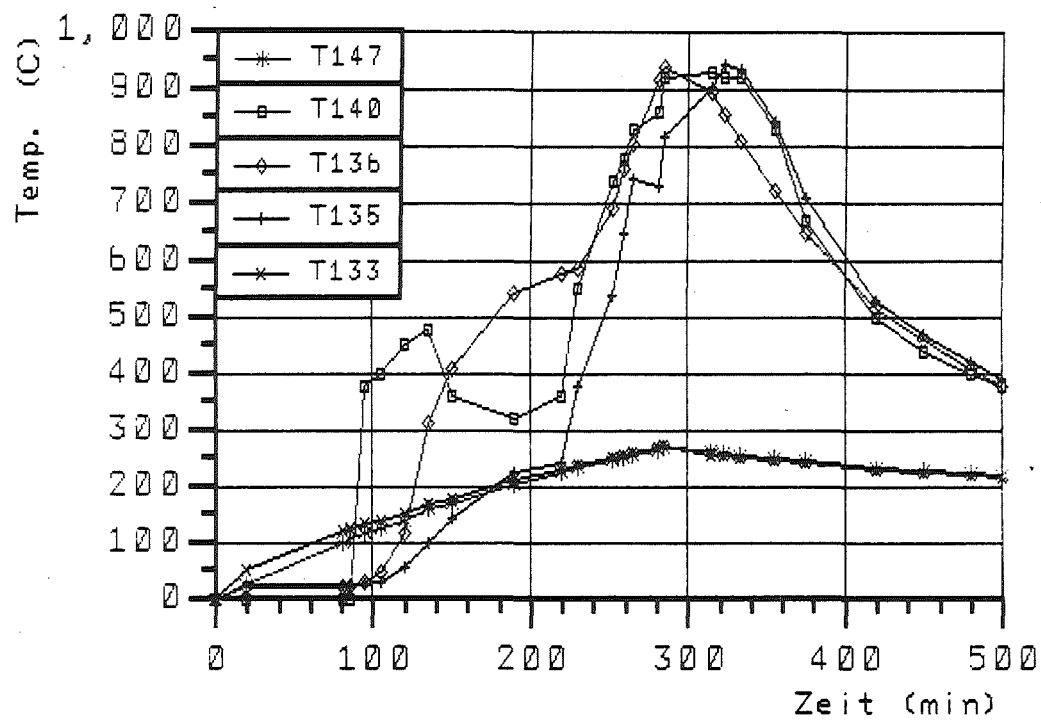


SFD-Versuchsanlage CORA, Schwallkondensator

Abb. 16:







T133 = Öltemperatur am Eintritt zum Verdampfer

T135 = Ar-Temperatur am Ende der Überhitzerspirale
(Mischpunkt)

T136 = Temperatur in der Mitte der Überhitzerspirale
ohne Rohrwandkontakt

T140 = Rohrschlangentemperatur am Überhitzerspiralenende

T147 = Ar-Temperatur im Verdampferrohr

F408 = Ar-Durchfluß durch den Überhitzer

- 62 -

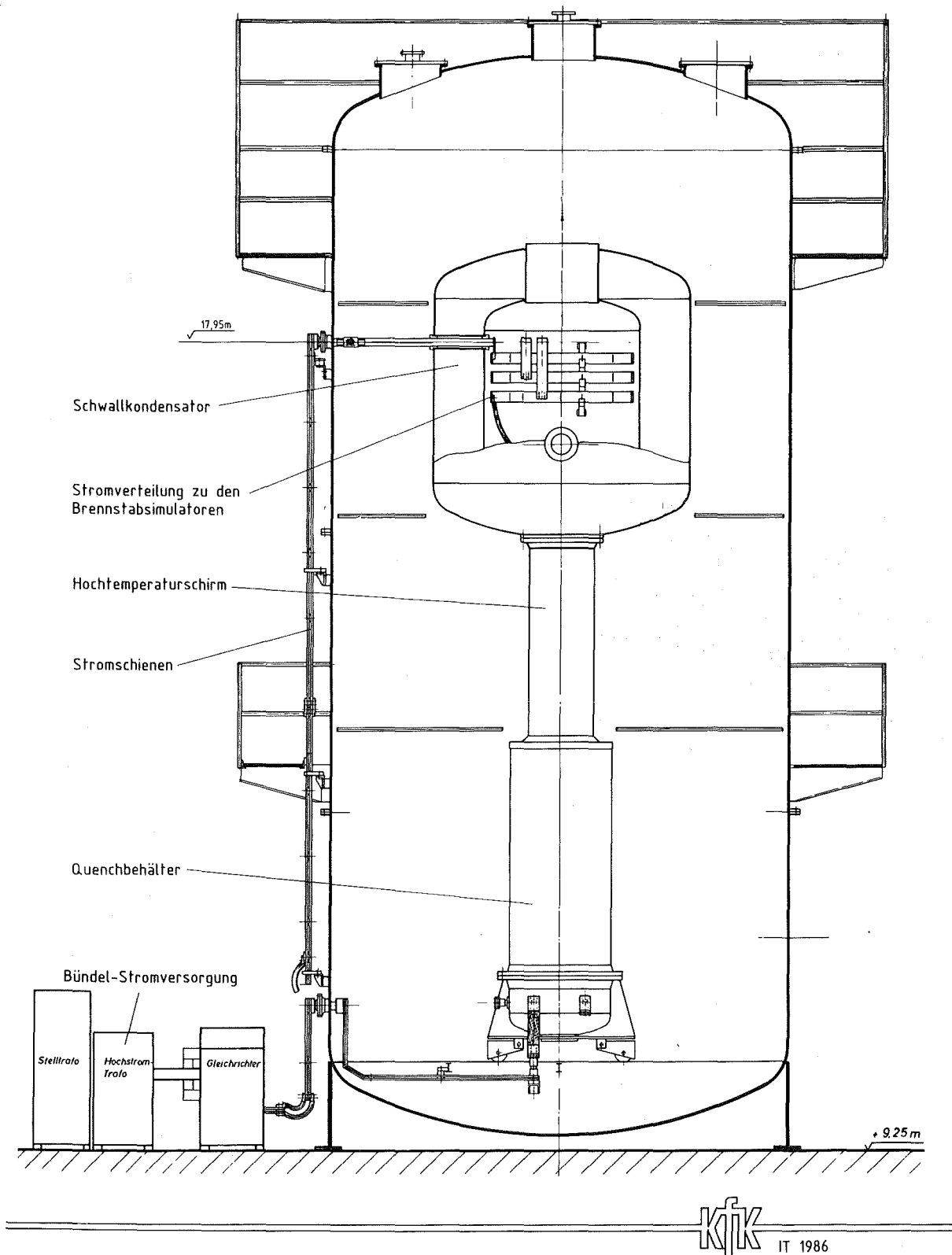
<u>Bündel</u> daten:	Hüllrohr:	10,75 Ø x 0,725mm, di = 9,3mm, l ~ 2175mm Werkstoff: Zirkaloy 4
	Ringpellet:	9,2/6,1 Ø x 10mm, s = 1,55mm, Brennstoff: UO ₂ , natürliche Isotopenzus. bzw. angereichert 0,3 % U235
	aktive Heizstablänge:	1000mm
	Heizstab:	6,0 Ø x 1000mm, Werkstoff: Wolfram
	Bündel:	37 Stäbe davon 24 Heizstäbe in 3 Gruppen
	Stabanordnung:	7 x 7, Rastermaß 14,3mm

Elektr. Daten der Heizstäbe:
(ohne Kaltenden) ¹⁾

	Aufheizgeschw. 0,5 K/s		Aufheizgeschw. 4 K/s	
	Beginn (RT)	Ende (2000 °C)	Beginn (RT)	Ende (2000 °C)
1. Einzelstab mit Shroud				
Strom (A)	222	600	601	796
Spannung (V=)	0,6	16,6	1,23	24,8
Leistung (kW)	0,124	9,5	0,742	19,8
(W/cm)	1,24	95	7,42	198
2. 37-Bündel mit Shroud				
Strom (A)	3 x 2000	3 x 1344	3 x 5672	3 x 2333
Spannung (V=)	0,5	4,3	1,45	9,7
Leistung (kW)	3 x 0,7 = 2,1	3 x 5,73 = 17,2	3 x 8,23 = 24,7	3 x 27,38 = 82,1
(W/cm)	0,87	7,1	10,3	34,2

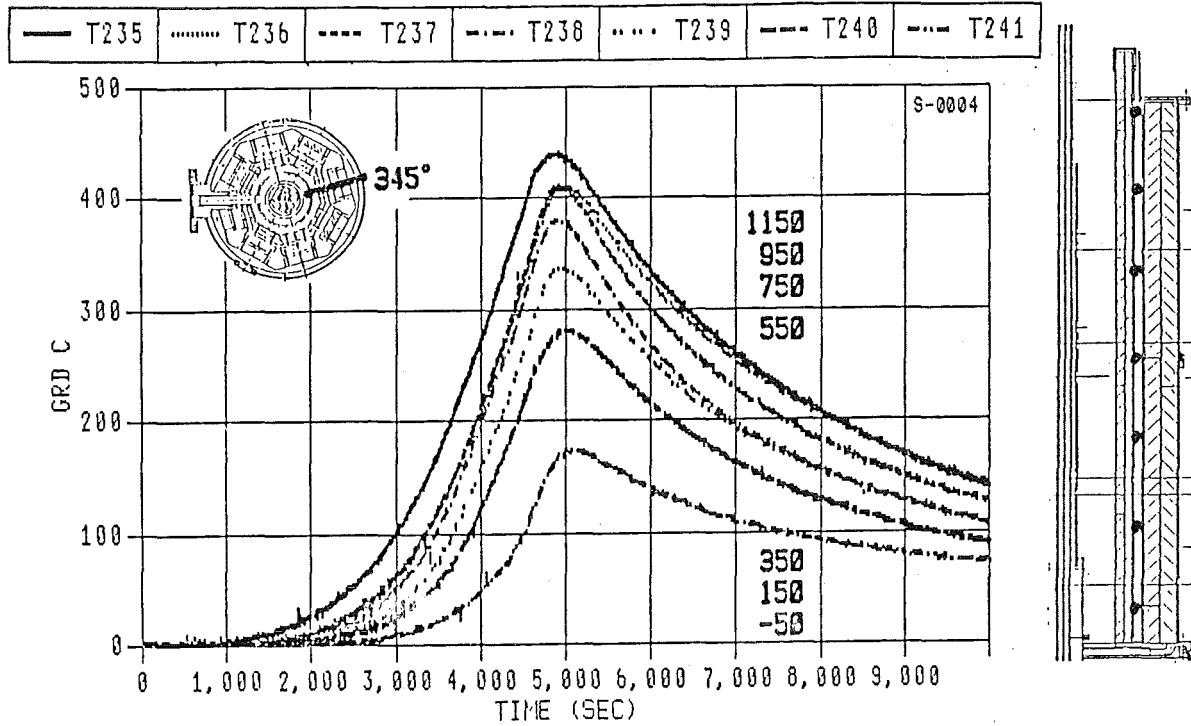
¹⁾ Wärmeverlust berechnet nach STATI 4 (eindimensionales Wärmestromprogramm)

□ u. □ = Grenzwerte der Stromversorgungseinheiten

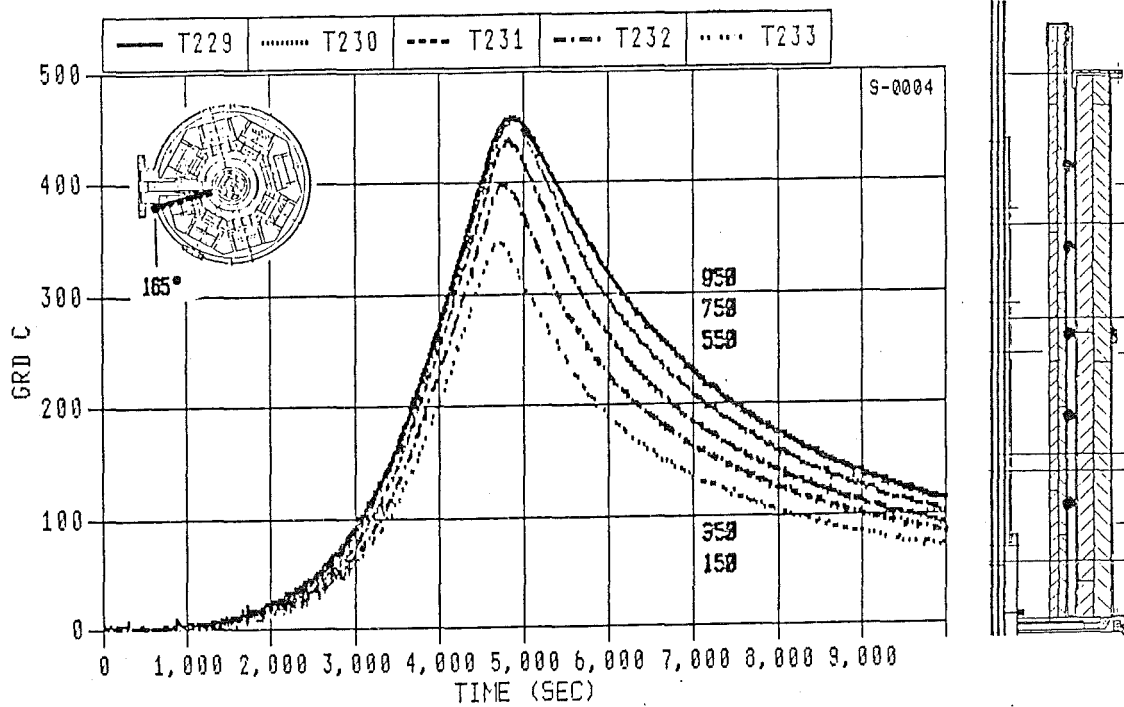


SFD-Versuchsanlage CORA
Stromschienenführung für die Bündelheizung

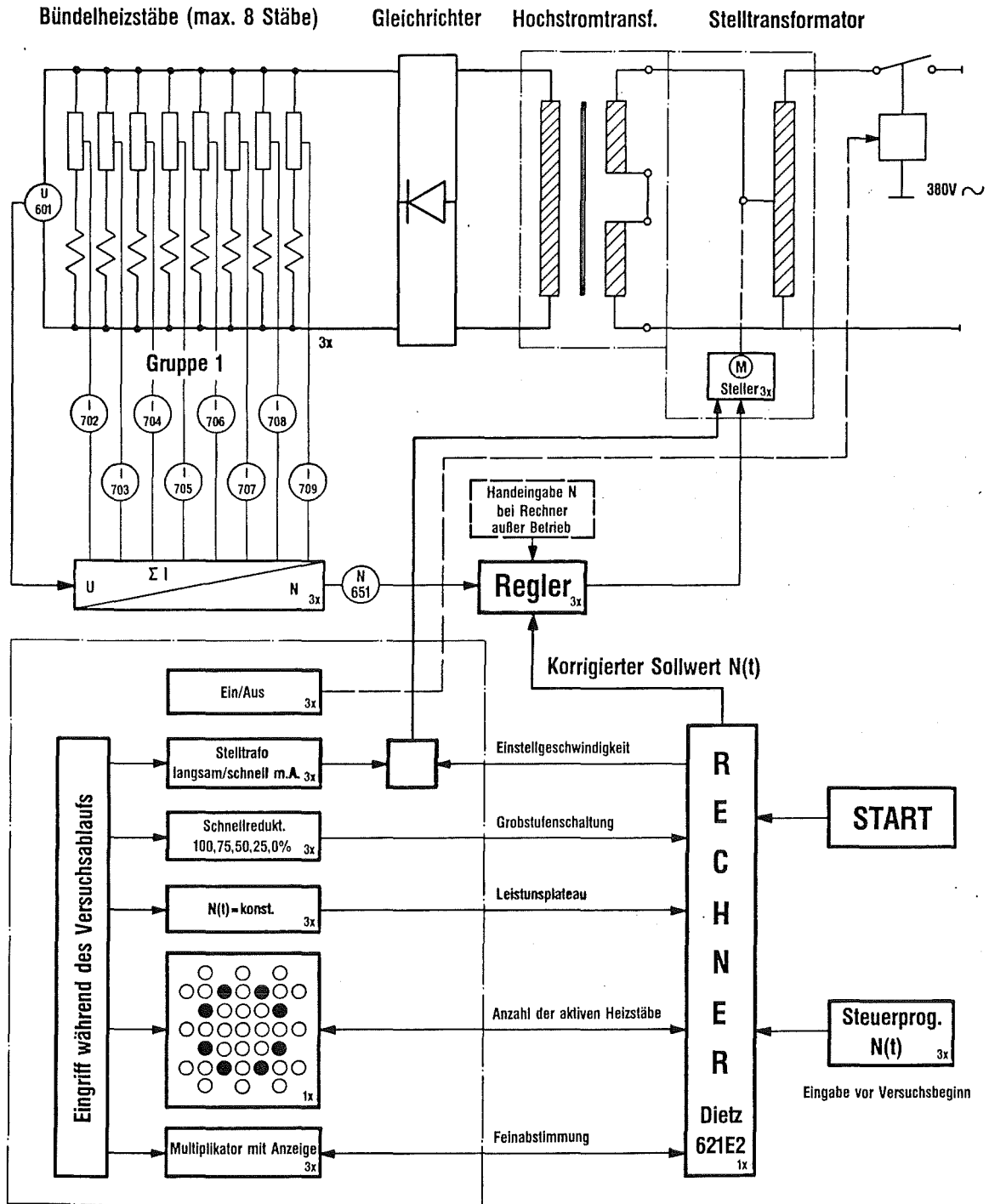
Abb. 24:



Temperature in insulation; radius 192mm; elevation 1150, 950, 750, 550, 350, 150, -50 mm ; at 345°; for high temperature test CORA bundle B



Temperature in insulation; radius 192 mm; elevation 950, 750, 550, 350, 150 mm; at 165°; for high temperature test CORA bundle B



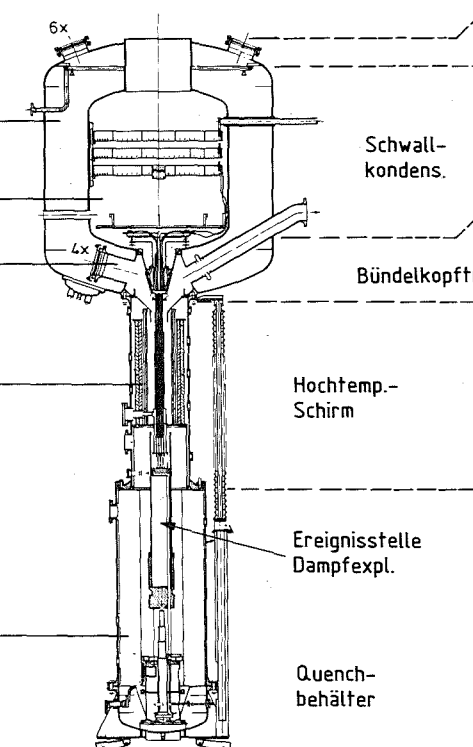
IT-1984

SFD-Versuchsanlage CORA

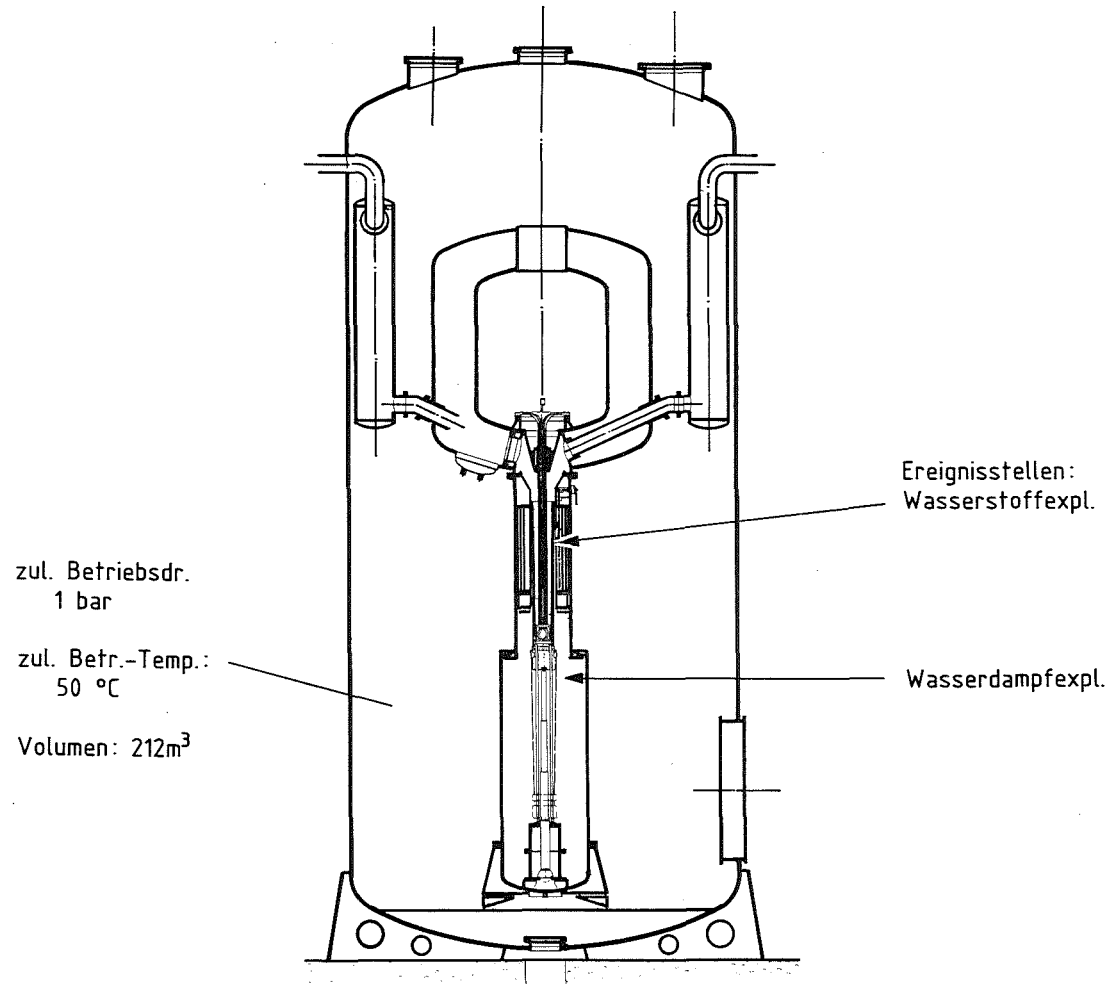
Steuerungskonzept der Bündelheizung (Beispiel Gruppe 1 von 3)

Abb. 27:

zul. Betriebsdr. (bar)	zul. Betriebstem. (°C)	Volumina (m ³)	angenommene Dampfexplosion bei Quenchbetrieb		ang. Dampfexpl. o. Quenchbetrieb	
3	100	12,2	3 ± 10% (20°)	Kein Ansprechen der Berstscheiben	Berstscheiben können wegen kurzzeitlicher Druckspitze ansprechen	
12 -1	500 20	4,7 0,2	12 ± 10% (350°) 129 (22°)	2,0 + 1,6 <u>3,6 bar</u>	Kein Ansprechen der Berstscheiben Δp _{stat} : 1,6 bar	Berstscheiben sprechen an (Druckspitze) Versuchsdr. 10 Δp _{stat} + 1,6 <u>11,6 bar</u>
12 -1	150	0,9	Ansprechdrücke der Berstscheiben :	Druckwelle	Temp. der Schmelze : 2800 K Schmelzgut : 23,2 kg ≤ äquivalente TNT-Menge : 0,16 kg dyn. Reflexionsdr. : Δp _r = 6,5 bar Δp _{stat} = 1,9 bar erforderl. Ausleg.-Druck : 4 bar	dyn. Überdruck : 6,5 Versuchsdruck +10 <u>16,5 bar</u> Δp _{stat} = 1,9 bar erforderl. Ausleg.-Druck : 11,9 bar
12 -1	150	2,9		Druckwelle 1 bar	Wasservolumen : 55 kg Wassertemperatur : 298 K dyn. Reflexionsdr. Δp _r = 62 bar über t _r = 0,22 ms Δp _{stat} = 1,82 bar erforderl. Ausleg.-Druck : 4 bar	Schmelze läuft in den unten stehenden Quenchtrichter
			Versuchsdruck 2 bar		Versuchsdruck 10 bar	



SFD-Versuchsanlage CORA-Angenommene Wasserdampfexplosion im Hochdruckteil



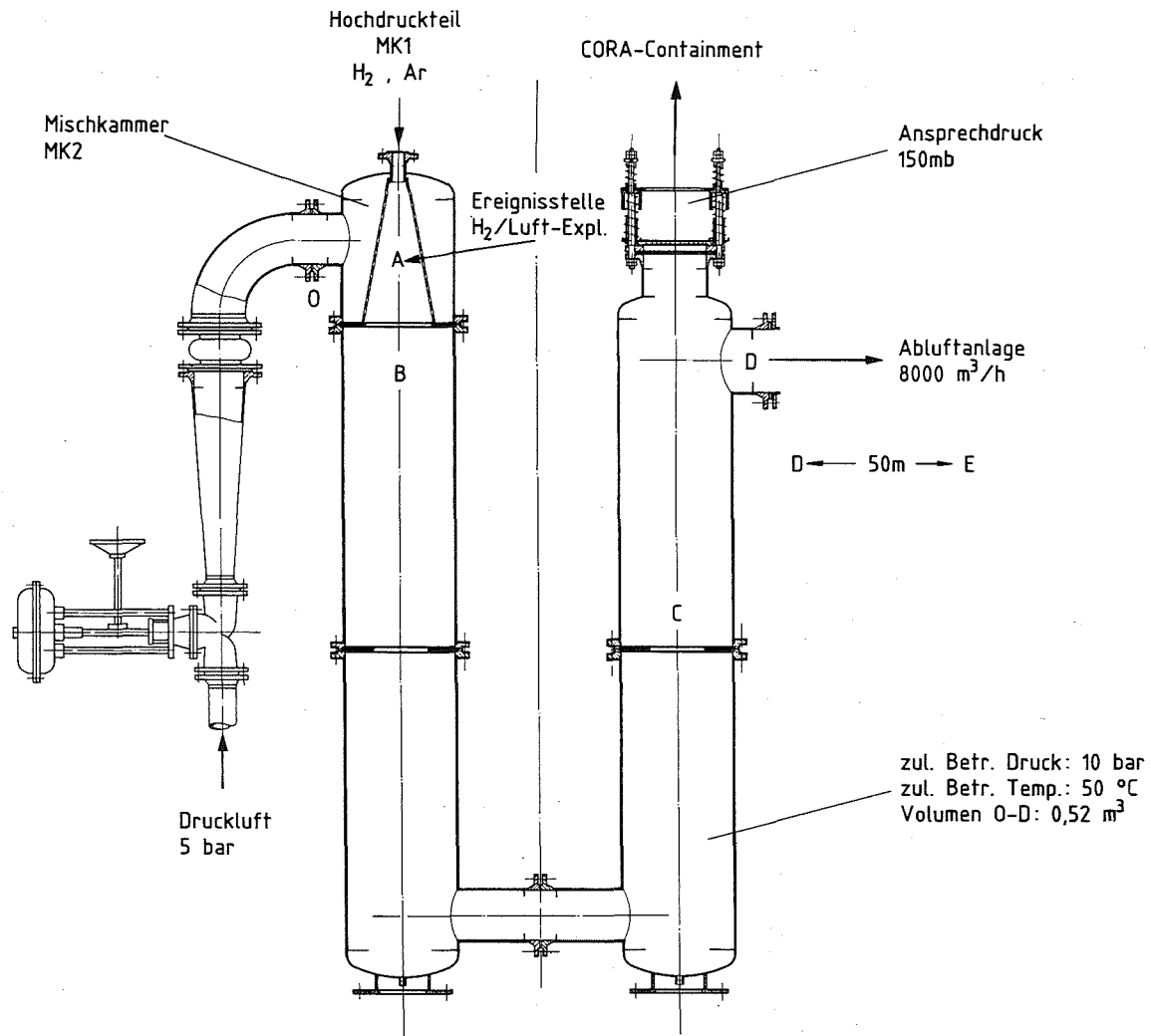
Wasserdampfexplosion im Quenchbehälter	Wasserstoffexplosion im HT-Schirm
Explosion mit freier Druckausbreitung, also ohne HT-Schirm u. Quenchbehälterdruckwand angenommen.	
dyn. Reflexionsdruck: $\Delta p_r = 4 \text{ bar}$	Belastungsdruck <1 bar
$\Delta p_{st} = 0,38 \text{ bar}$	
erforderl. Auslegungs- druck des Containments: 0,4 bar	
angen. Druck im Hochdruckteil vor der Expl.:	
max. zul. Druck 12bar	Versuchsdruck 10bar

zul. Betriebsdr. (bar)	zul. Betriebstemp. (°C)	Volumina (m ³)	angenommene Wasserstoffexplosion, Freisetzungsrate 4g/s $\hat{=}$ 290g/Vers.				
3	100	12,2	Schwall-Kondens.	3 \pm 10% (20°)	Berstscheiben können ansprechen	Berstscheiben sprechen an	
					Druckanstieg auf 3,1 bar	Druckanstieg auf 3,8 bar	
12 -1	500 20	0,2	Bündelkopftr.	12 \pm 10% (350°)	Kein Ansprechen der Berstscheiben	Berstscheiben sprechen an	
				12,9 (22%)	Berstscheiben sprechen an	Berstscheiben sprechen an	
12 -1	150	0,9	Hochtemp.-Schirm Ereignisstelle Wasserstoffexpl.	stöchiometrisches Wasserstoff/Luft-Gemisch 1000°C (Vol. %):			
				24 H ₂ , 18.8 Ar, 120 ₂ , 45.2 N ₂	16 H ₂ , 45.9 Ar, 80 ₂ , 30.1 N ₂	15.3 H ₂ , 48.3 Ar, 7.60 ₂ , 28.8 N ₂	
12 -1	150	2,9	Quenchbehälter	Ansprechdrücke der Berstscheiben :	Expl. Druck : 4,4bar Versuchs Druck : 2 bar Ges. Druck : 6,4bar	Expl. Druck : 14,1 bar 10 bar 24,1 bar	Expl. Druck : 16,4 bar Behält. Druck : 12 bar Ges. Druck : 28,4 bar
					Versuchsdruck 2 bar	Versuchsdruck 10 bar	max. zul. Druck 12 bar

- 69 -



SFD-Versuchsanlage CORA-Angenommene Wasserstoffexplosion im Hochdruckteil



Betr.-Unterdruck an der Stelle D: 9,5 - 13,5 mb	
Explosionsdruck $\Delta p = 7,1$ bar	Explosionsdruck $\Delta p = 6,4$ bar
Druckstöße an der Stelle::	
A : 7,1 bar	
B : 1,45 bar	
C : 0,37 bar	
D : 0,55 bar	
E : 40 bar	
Vordruck im Hochdruckteil (2000°C):	
2 bar	10 bar

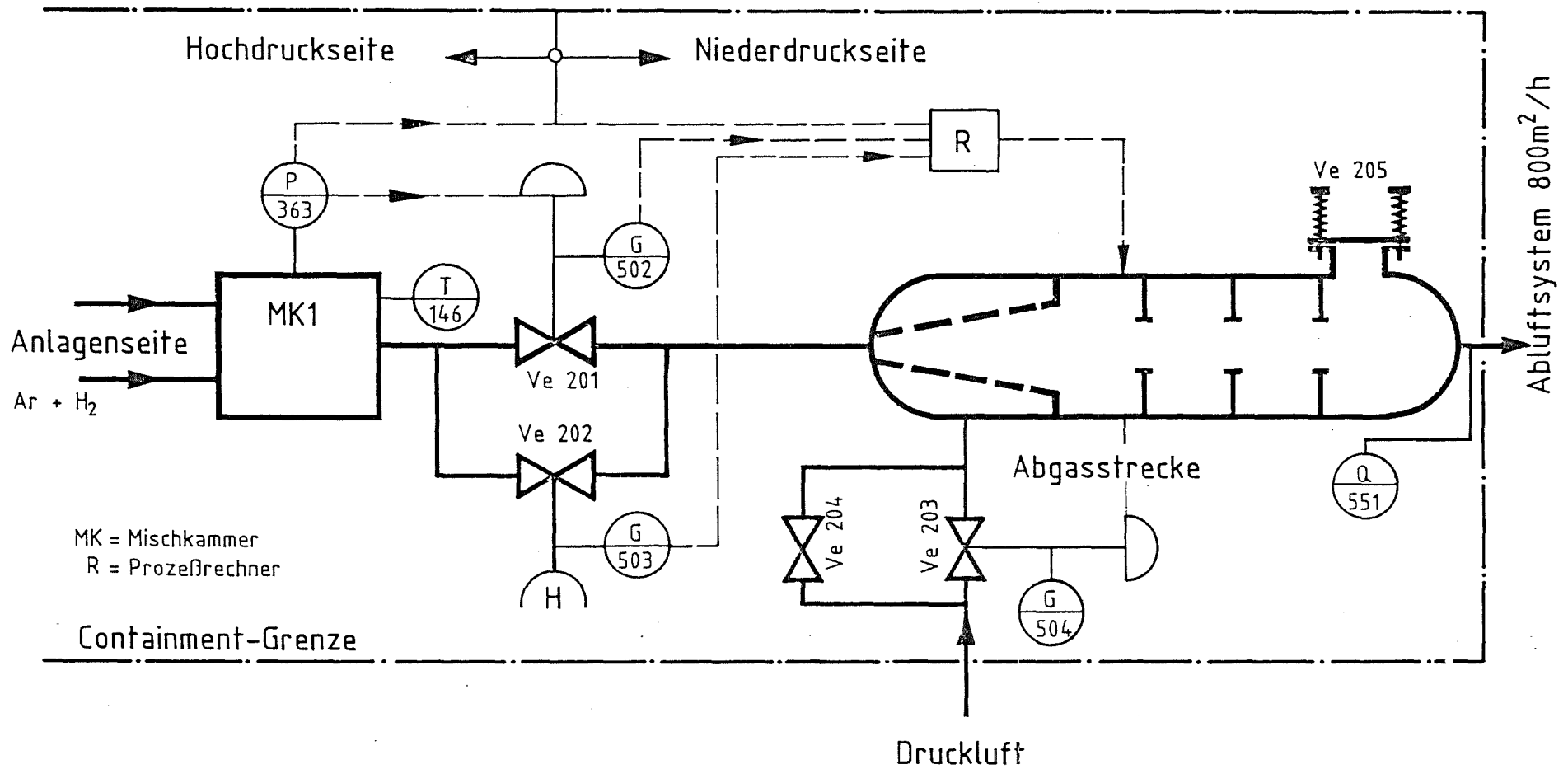
- 70 -



IT 1986

SFD-Versuchsanlage CORA - Angenommene Wasserstoffexplosion in der Abgasstrecke

Abb. 31:



SFD-Versuchsanlage CORA-Ventilgruppe Abgasregelung

Abb. 32: