KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Projekt Nukleare Fernenergie

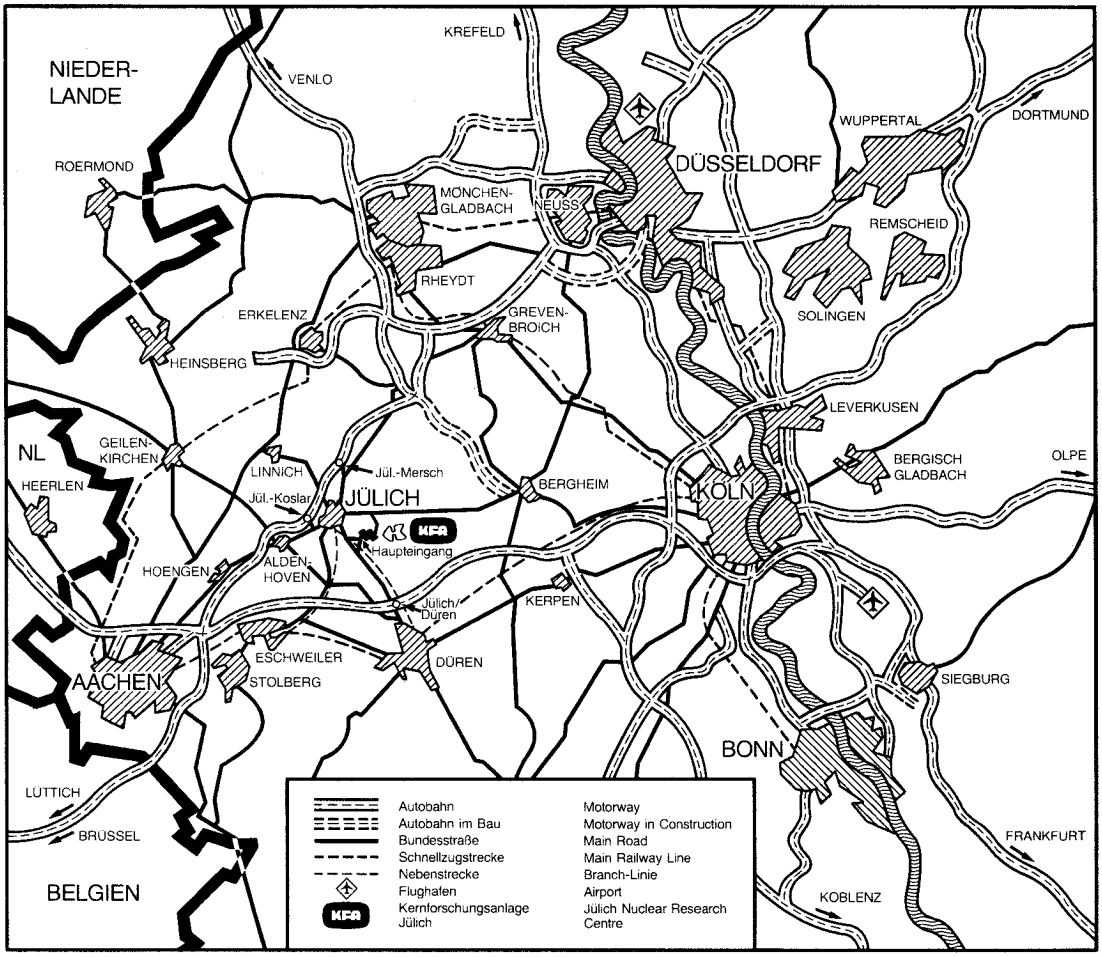
Die Versuchsanlage EVA II / ADAM II

– Beschreibung von Aufbau und Funktion –

von

R. Harth, H.-F. Nießen, V. Vau
H. Hoffmann und W. Kesel

Jül - 1984
März 1985
ISSN 0366-0885



Als Manuskript gedruckt

Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1984

Projekt Nukleare Fernenergie Jül - 1984

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

Die Versuchsanlage EVA II / ADAM II

– Beschreibung von Aufbau und Funktion –

von

R. Harth, H.-F. Nießen, V. Vau
Kernforschungsanlage Jülich GmbH

H. Hoffmann, W. Kesel
Rheinische Braunkohlenwerke AG

Inhaltsverzeichnis Seite

1.	Einleitung	1
2.	Die Vorgeschichte der Anlage	2
3.	Verfahrensbeschreibung	4
3.1	Allgemeines	4
3.2	Methanreformierung	4
3.2.1	Heliumkreislauf	7
3.2.2	Prozeßgasführung	14
3.2.3	Kesselspeisewasser-Prozeßdampf-Kreislauf	16
3.3	Methanisierung	18
3.3.1	Prozeßgas-Führung	24
3.3.2	Dampf- und Heizwasserkreislauf	25
4.	Technische Beschreibung	26
4.1	Allgemeines	26
4.1.1	Standort	26
4.1.2	Gliederung und Aufstellung	28
4.1.3	Emissionen der Gesamtanlage	30
4.1.4	Betriebsmittelverbrauch	31
4.2	Der Heliumkreislauf	32
4.2.1	Die Helium-Druckbehälter	32
4.2.2	Der Heliumerhitzer E102	34
4.2.3	Der Röhrenspaltofen D101	35
4.2.4	Der Dampferzeuger E101	44
4.2.5	Die Koax-Leitung	51
4.2.6	Das Helium-Gebläse	53

4.3	Die Anlage zur Methanisierung	55
4.3.1	Erster Methanisierungsreaktor D202	55
4.3.2	Zweiter Methanisierungsreaktor D203	56
4.3.3	Gegenstromkühlreaktor D203	57
4.3.4	Der Recyclekompressor	57
4.4	Heliumreinigung, Einheit 300	58
4.5	Heliumversorgung, Einheit 400	60
4.6	Instrumentenluftanlage, Einheit 500	61
4.7	Speisewasserversorgung, Eihheit 600	62
4.8	Methanversorgung, Einheit 700	63
4.9	Notstromaggregat, Einheit 800	63
4.10	Gasfackel	65
4.11	Rohrbrücke	65
5.	Instrumentierung und Meß- und Regelungstechnik	65
6.	Erfassung, Kontrolle und Übertragung der Meßdaten der EVA II/ADAM II-Versuchsanlage	67
7.	Der Versuchsbetrieb für NFE	69
8.	Diskussion Betriebserfahrungen	73
8.1	Allgemein	73
8.2	Anfahren	74
8.2.1	Maschinenkontrollen	74
8.2.2	Dichtigkeitsprobe und Kontrolle der Leckverluste	75
8.2.3	Heliumdichtigkeit	75
8.2.4	Dichtigkeit des Prozeßgassystems	77

8.2.5 Zeitbedarf des Anfahrens 78

8.2.6 Heliumreinheit 79

8.2.7 Bemerkungen zur Schnellabschaltung 81

8.2.8 Personalbedarf 83

8.3 Abfahren 84

8.4 Passivieren und Reduzieren der Katalysatoren 85

8.4.1 Passivieren des EVA-Katalysators 85

8.4.2 Passivieren der ADAM-Katalysatoren 86

8.4.3 Reduzieren des EVA-Katalysators und der ADAM-Katalysatoren 87

8.4.4 Katalysatorwechsel 87

9. Anpassung der Versuchsanlage an neue Aufgabenstellungen 88

1. Einleitung

Im Jahre 1976 wurde das Projekt NUKLEARE FERNENERGIE (NFE) gegründet. Vertragspartner sind die Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich (KFA) und die Rheinische Braunkohlenwerke AG, Köln (Rheinbraun).
Aufgabe des Projektes NFE sind gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet des Wärmetransportes mittels chemisch gebundener Energie nach dem Prinzip des thermo-chemischen Kreisprozesses. Dabei soll das System Methanreformierung - Methanisierung bis zur technischen Reife entwickelt werden. Zu diesem Zweck ist eine Großversuchsanlage zu errichten und zu betreiben.

In dieser Großversuchs- und Demonstrationsanlage wird in gleicher Weise wie in einem Prozeßwärme-HTR durch Helium Wärme an ein Spaltrohrbündel und an einen Dampferzeuger übertragen. Das Produktgas der Reformierung wird durch Methanisierung wieder zu Methan zurückgewandelt.

Die Prozesse Methanreformierung und Methanisierung sind in der KFA Jülich im Pilot-Maßstab bereits eingehend untersucht worden und zwar in der EVA I (Einzelspaltrohr-Versuchs-Anlage) und im ADAM I (Anlage mit drei adiabaten Methanisierungsreaktoren). Die neue Großversuchs- und Demonstrationsanlage erhielt daher die Bezeichnung EVA II/ADAM II. Dabei bezeichnet EVA II das gesamte System zur Methanreformierung und ADAM II die gesamte Methanisierungsanlage.

Die Möglichkeit der Erprobung eines Systems der "Nuklearen Fernergie" mit einem Kernreaktor ist mit der "Prototypanlage Nukleare Prozeßwärme" (PNP) vorgesehen. Dabei wird davon ausgegangen, daß der Prozeß der Methanreformierung sowohl in das NFE-System eingekoppelt wird wie auch Gas für die hydrierende Kohlevergasung (HKV) liefert.

Im Hinblick auf diese zweifache Aufgabenstellung wurde die Gesamtanlage EVA II/ADAM II so ausgelegt, daß ein sehr breites Spektrum von Betriebsparametern eingestellt werden kann, wobei

die jeweils optimalen Bedingungen einmal für den NFE-Prozeß und zum anderen für die Gaserzeugung für HKV mit eingeschlossen sind. Das z.Zt. eingebaute Spaltrohrbündel für die Methanreformierung ist speziell für den NFE-Kreisprozeß ausgelegt worden. Dabei wurden die im konventionellen Anlagenbau verfügbaren neuesten Kenntnisse, Fertigungs- und Prüfmethoden angewendet.

Die genaue Einstellung der HKV-Bedingungen erfordert gegenüber den NFE-Bedingungen eine so andere Leistungsaufteilung zwischen Methanreformierung und Dampferzeugung, daß dazu ein anderes Spaltrohrbündel in den Heliumkreislauf der EVA II eingebaut werden muß.

Die Methanisierungsanlage ADAM II ist entsprechend den Aufgaben derartiger Anlagen in einem NFE-Kreisprozeß ausgelegt:

- Es wird eine möglichst vollkommene Umwandlung des Reformergases zu Methan angestrebt.
- Bei der Wärmefreisetzung sollen so hohe Prozeßtemperaturen erreicht werden, daß mit der freigesetzten Wärme einwandfrei überhitzter Hochdruckdampf von ca. 540 ^{o}C erzeugt werden könnte.

Die Rückwandlung des Reformergases in Methan gestattet es, die Gesamtanlage EVA II/ADAM II in allen Lastbereichen zu betreiben ohne Methan oder andere Einsatzgase zu verbrauchen.

2. Die Vorgeschichte der Anlage

Die erste Erwähnung einer Spaltrohrbündelanlage erfolgte im "Entwicklungsprogramm zur Umwandlung fossiler Rohstoffe mit Hochtemperatur-Kernreaktorwärme", das zu dem gemeinsamen Projekt "Nukleare Fernenergie" mit den Partnern KFA, Rheinbraun und Bergbauforschung führte, mit dem Datum 12. Mai 1969 /1/.

Am 6. Juli 1972 ging die Einzelspaltrohr-Versuchs-Anlage (EVA I) erfolgreich in Betrieb. Planung, Errichtung und Betrieb dieser

Anlage waren als KFA-Beitrag ebenfalls im o.g. Entwicklungsprogramm von 1969 aufgeführt. Der einwandfreie, erwartungsgemäß verlaufene Betrieb der EVA I bestätigte die grundsätzlichen Überlegungen zur Nutzung von Kernreaktorwärme als Hochtemperatur-Prozeßwärme von Prof. R. Schulten und seinen Mitarbeitern /2;3;4/ und lieferte den Nachweis für die technische Realisierbarkeit.

In den Jahren 1974 und 1975 wurden im Institut für Reaktorentwicklung der KFA von Prof. Schulten und seinen Mitarbeitern genauere Auslegungen und detaillierte Konstruktionen einer Demonstrationsanlage mit einem Spaltrohrbündel ausgearbeitet /5;6/. Die Leistung der Anlage wurde zu 10 MW angesetzt. Aus versorgungstechnischen Gesichtspunkten wurde dabei von Anfang an eine Methansynthese-Anlage zur Rückumwandlung des Prozeßgases vorgesehen.

Nach den ersten Absprachen zwischen KFA und Rheinbraun über eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet NFE wurden im Dezember 1974 bei den Firmen Lurgi, Uhde und Dr. C. Otto Angebotsstudien für eine heliumbeheizte Methanspaltanlage mit nachgeschalteter Methanisierung in Auftrag gegeben. Mit der Gründung des Projektes NUKLEARE FERNENERGIE durch die KFA Jülich und die Rheinbraun wurde der Bau der Großversuchsanlage EVA II/ADAM II mit einer Leistung von 10 MW beschlossen. Durch die Bewilligung von Fördermitteln an Rheinbraun durch den BMFT wurde die Finanzierung der gesamten Anlage und ihr Betrieb im Rahmen des Projektes NFE sichergestellt.

Nach umfangreichen technischen Detailarbeiten und Überlegungen sowohl seitens der anbietenden Firmen wie auch der NFE-Partnerfirmen und nach Abstimmung mit den sich formierenden Partnerfirmen des Projektes PROTOTYPANLAGE NUKLEARE PROZESSWÄRME (PNP) wurde am 21. Dezember 1976 mit der Firma Lurgi der Vertrag über Lieferung und Errichtung einer betriebsbereiten Versuchsanlage für den Transport chemisch gebundener Energie, bestehend aus einer heliumbeheizten Spaltrohranlage mit Dampferzeuger (EVA II), der Methanisierungsanlage (ADAM II) und den erfolgreichen Nebenanlagen abgeschlosssen.

3. Verfahrensbeschreibung

3.1 Allgemeines

Die Großanlage EVA II/ADAM II in ihrer jetzigen Ausführung dient der Untersuchung und Demonstration der Schlüsselprozesse eines nuklearen Fernenergie-Systems:

- der Methanreformierung mit Wasserdampf bei Wärmezufuhr mittels Helium unter HTR-typischen Bedingungen und
- der entsprechenden Rückreaktion, der Methanisierung, im Temperaturbereich von 300 bis 650 °C.

In der Form von Reaktionsgleichungen stellen sich die beiden Prozesse folgendermaßen dar:

$$CH_4 + H_2O + \Delta H_1 \rightleftharpoons 3\,H_2 + CO \qquad (1)$$

$$CH_4 + 2\,H_2O + \Delta H_2 \rightleftharpoons 4\,H_2 + CO_2 \qquad (2)$$

$$\Delta H_1 = 206 \text{ kJ/mol bei } 298 \text{ K}$$

$$\Delta H_2 = 165 \text{ kJ/mol bei } 298 \text{ K}$$

Die den Gleichungen (1) und (2) entsprechende chemische Umwandlung von links nach rechts ist die endotherme Methanreformierung; in der Gegenrichtung verläuft die exotherme Methanisierung. Beide Umsetzungen laufen bis zur Gleichgewichtseinstellung ab. Bei den angestrebten Prozeßbedingungen wird das chemische Gleichgewicht jedoch nur bei Verwendung geeigneter Katalysatoren erreicht.

3.2 Methanreformierung

Die Anlage EVA II beinhaltet die für nukleare Prozeßwärmeanlagen zur Methanreformierung typischen Elemente:

- geschlossener Heliumkreislauf
- starre heliumseitige Kopplung von Wärmequelle und den Wärmeverbrauchern Röhrenspaltofen und Dampferzeuger
- rekuperative Nutzung der austretenden heißen Prozeßgase zur Einsatzgasüberhitzung sowie Methan- und Speisewasservorwärmung.

In Abb. 1 ist ein Fließschema der Anlage dargestellt.

Die Apparate sind im Bild mit den gleichen Kurzbezeichnungen versehen, wie sie auch in der Versuchsanlage verwendet werden.

Die Kürzel bezeichnen die folgenden Apparate:

1) EVA II (Anlage 100)

D101 Spaltreaktor (RSO)
E101 Dampferzeuger
E102 Heliumerhitzer
E103 Erdgaserhitzer
E104 Speisewasservorwärmer
E107 Kondensatvorwärmer
E108 Spaltgas-Luftkühler
E109 Spaltgas-Schlußkühler
E111 Heizwasser-Zwischenerhitzer
E112 Gaskondensat Luftkühler
E113 Gemischüberhitzer

F101 Hauptentgaser

G101 Heliumgebläse
G102 Erdgas-Trockenlaufkolbenverdichter
G104 Speisewasserpumpe

Charakteristische Meßstellen sind mit Datenkreuzen versehen, die folgenden Größen mit den links unten im Diagramm bezeichneten Einheiten enthalten:

Temperatur	Druck
Massenstrom	Normvolumenstrom

Am Ein- und Austritt jeder Anlageneinheit ist darüber hinaus die trockene Gaszusammensetzung in Molprozent angegeben.

Weitere Angaben sind:
- elektrische Leistung des Heliumerhitzers
- abgegebene Nutzwärme im E111
- molares Dampf/Methanverhältnis
- chemisch eingekoppelte Leistung (Q_{NFE})
- Archivierungsnummer des Meßpunktes (Label)

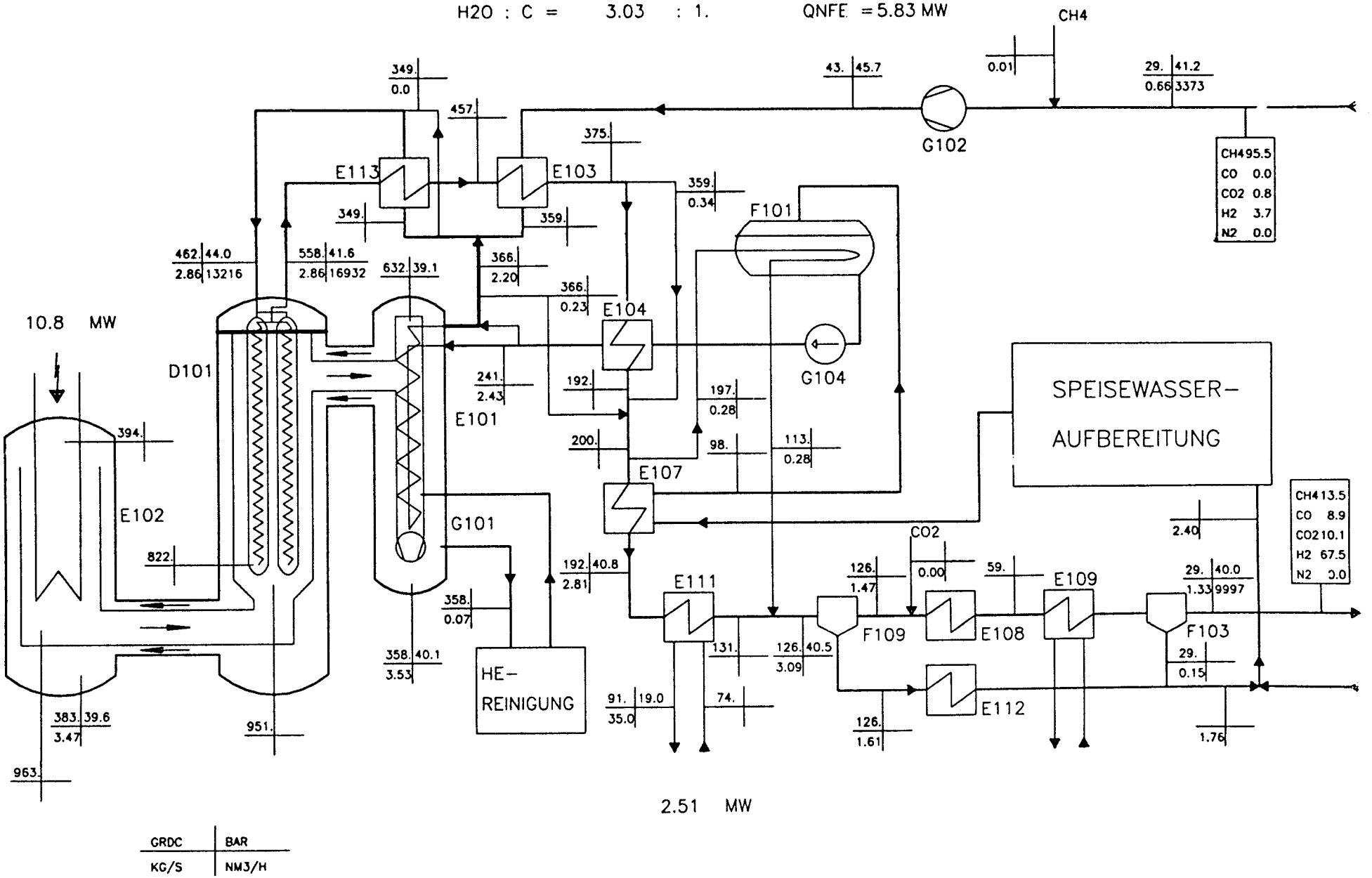


Abb. 1: VERFAHRENSFLIESSBILD DER VERSUCHSANLAGE EVA II

LABEL: 82.P004

Der prinzipielle Energiefluß und die Wärme-Temperatur-Verteilung der EVA II - Anlage soll anhand des Sankey- (Abb. 2) und des Wärme-Temperatur-Diagramms (Abb. 3) für den Auslegungsfall (Meßpunkt Poo4) veranschaulicht werden.

Wie aus dem Sankey-Diagramm hervorgeht, wird die ins Helium eingekoppelte Wärme im RSO direkt und über Dampf indirekt (Dampferzeuger E101) dem Prozeßgas zugeführt, wobei nach Umsetzung und internem Wärmeaustausch ca. 54% als Fernenergie zur Verfügung stehen. Als Heizwärme fallen ca. 22% an. Der Wärmeverlust und die Abwärme sind mit ca. 24% für eine Versuchsanlage sehr niedrig und könnten, wie aus dem Q/T-Diagramm hervorgeht, durch eine nach konventionellen Gesichtspunkten angelegte Auslegung und Optimierung der Wärmetauscher sicherlich verkleinert und teilweise noch als Heizwärme genutzt werden.

Durch die Zuordnung der Wärmemengen zum jeweiligen Temperaturniveau im Q/T-Diagramm wird der interne Wärmeaustausch innerhalb der EVA veranschaulicht.

Die oberen Kurven zeigen den Temperaturverlauf des wärmeabgebenden Mediums, die unteren den des wärmeaufnehmenden Mediums in den Apparaten. Ein idealer Wärmetausch ist durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Somit gibt die Differenz zwischen durchgezogener und gestrichelter Linie auf der wärmeaufnehmenden Seite Auskunft über das Maß des Wärmeverlustes. Sollte die durchgezogene Linie länger als die gestrichelte sein (negativer Wärmeverlust), so ist dies auf fehlerhafte Meßwerte zurückzuführen.

Fehlt bei einem Wärmetauscher die untere Kurve (z.B. E107), so liegen dort keine Meßwerte vor.

3.2.1 Heliumkreislauf

In enger Anlehnung an Schaltungen, die für nukleare Prozeßwärmeanlagen typisch sein werden, sind in dem geschlossenen Heliumkreislauf das Spaltrohrbündel, der Prozeßdampferzeuger

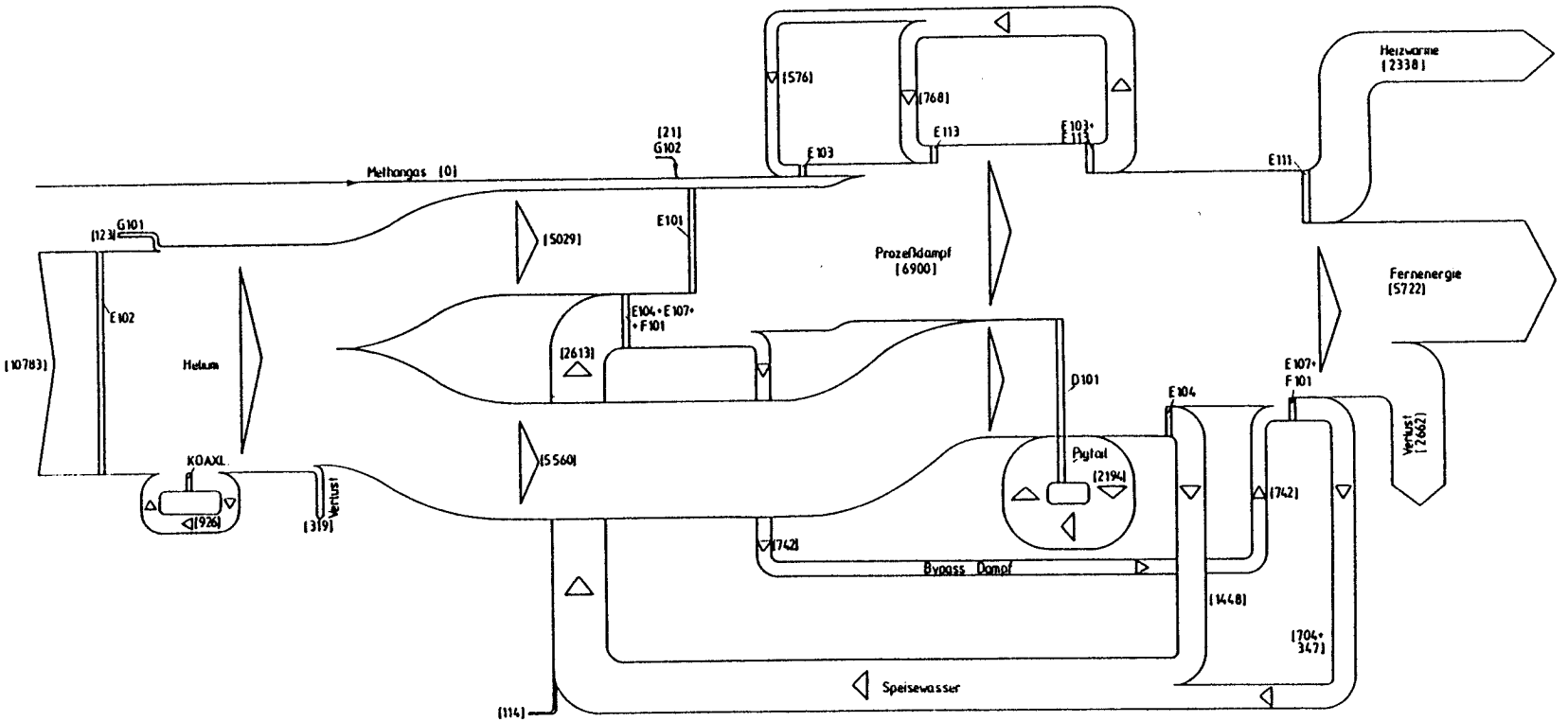


Abb.2: Energiefluß am Anlagenteil EVA II für den Auslegungsbetriebszustand

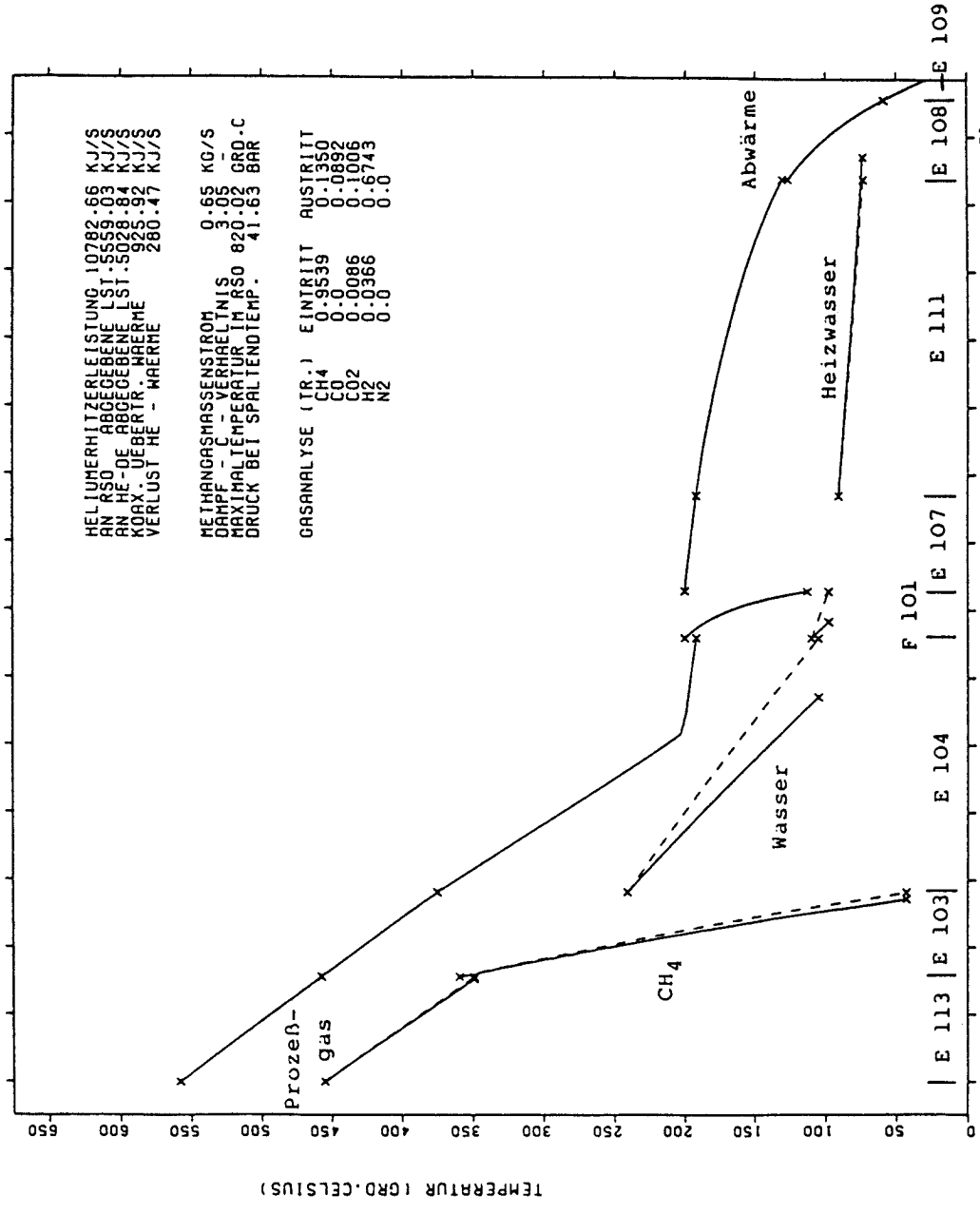


Abb. 3: Wärmenutzung in der Reformierungsanlage

und das He-Kreislaufgebläse angeordnet (siehe Abb. 4).
Der Heliumkreislauf besteht aus 3 senkrecht stehenden Druckbehältern, die durch 2 koaxiale Gasleitungen miteinander verbunden sind. Auch die Druckbehälter werden nach dem Koaxialprinzip vom Helium durchströmt. Das Gas mit der jeweils höheren Temperatur strömt innerhalb des koaxial an der Behälterwand entlang zurückströmenden kalten Gases. Durch dieses Prinzip können die Wärmeverluste des Heliumsystems niedrig gehalten werden. Dies kann aus Abb. 3 abgelesen werden.

Spaltrohrbündel, Dampferzeuger und He-Erhitzer sind in je einem separaten Druckbehälter eingebaut.

Die Wärmezufuhr zum Gesamtsystem erfolgt in einem elektrischen Erhitzer. In dem Elektroerhitzer wird das Helium bei einem Druck von ca. 40 bar auf eine Temperatur von ca. 950 ^{o}C erhitzt und anschließend dem Spaltrohrbündel zugeführt. In diesem Spaltrohrbündel wird das Helium im Gegenstrom zum Methan-Wasserdampf-Gemisch geführt. Dabei gibt das Helium Wärme ab und verläßt mit einer Temperatur von ca. 650 ^{o}C das Spaltrohrbündel.

Das Temperaturgefälle auf der Heliumseite zwischen 950 ^{o}C und 650 ^{o}C wird im Spaltrohrbündel für die Überhitzung des Methan-Wasserdampf-Gemisches von ca. 450 ^{o}C auf die Reaktionsendtemperatur von ca. 825 ^{o}C sowie für die Durchführung der endothermen Methanspaltung genutzt.

Das auf ca. 650 ^{o}C abgekühlte Helium gelangt nach dem Verlassen des Spaltrohrbündels in einen weiteren Wärmetauscher, wo es das vorgewärmte Speisewasser verdampft und überhitzt und dabei selber auf ca. 350 ^{o}C abgekühlt wird.

Mit dieser Temperatur gelangt das Helium dann in ein Gebläse, das den Heliumkreislauf bei einem Druck von ca. 40 bar aufrechterhält.

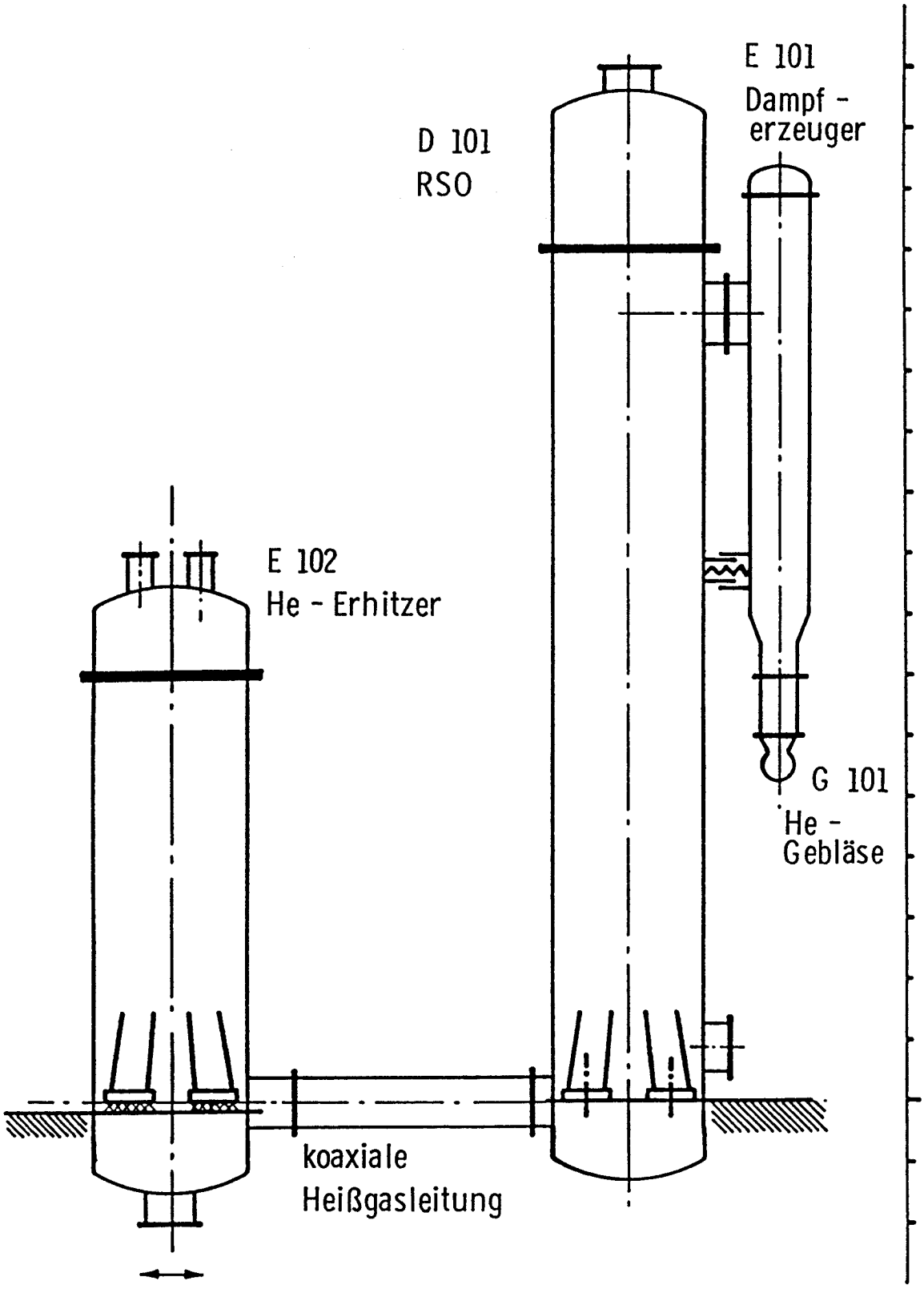


Abb. 4: Anordnung der Druckbehälter des Helium-Kreislaufs

Von der Druckseite des Heliumgebläses wird das Gas wieder dem elektrischen Erhitzer zugeführt, womit dieser Kreislauf geschlossen ist.

Der Heliumkreislauf der Versuchsanlage EVA II entspricht damit einem vollständigen Primärkreislauf eines HTR für nukleare Prozeßwärme. Das Core wird simuliert durch den elektrischen Heliumerhitzer. Durch die unmittelbar nacheinander erfolgende Durchströmung von Spaltrohrbündel und Dampferzeuger ergibt sich die direkte betriebliche Kopplung dieser beiden Komponenten. Damit besteht die Möglichkeit, ein Prozeßwärmesystem in verschiedenen Betriebsphasen zu erproben und dabei sowohl stationäre Zustände wie auch transiente Vorgänge zu untersuchen. Die thermodynamischen Bedingungen sind dabei heliumwie prozeßgasseitig identisch mit denen in nuklearen Prozeßwärmeanlagen. Leistung und geometrische Größe der Versuchsanlage EVA II lassen damit eine unmittelbare Extrapolation auf eine nukleare Prototypanlage zu.

In Tab. 1 sind die Hauptauslegungsdaten zusammengefaßt. Dabei sind hinter dem Schrägstrich auch die im Abnahmeversuch eingestellten Daten angegeben.

		Auslegung NFE	Auslegung PNP
Leistung des Heliumerhitzers			
netto für Prozeß	MW	11,0/10,0	10,0/10,0
brutto	MW	11,0/10,4	11,0/10,0
Leistung des Spaltreaktors			
netto	MW	5,8/5,4	5,0/ 4,9
Leistung des Dampferzeugers			
netto	MW	4,2/4,6	5,0/5,0
Heliummassenstrom im Hauptkreislauf	kg/s	3,2/3,4	3,85/3,92
Temperaturen des Heliums			
Eintritt Spaltreaktor	°C	950/955	950/955
Austritt Spaltreaktor	°C	600/650	700/700
Eintritt Dampferzeuger	°C	600/650	700/700
Austritt Dampferzeuger	°C	350/375	450/450
Drücke des Heliums			
Austritt Heliumgebläse	bar	40	40
Differenzdruck des He-Gebläses	bar	1,20	1,67
Regelbereich des Heliummassenstroms im Hauptkreislauf	kg/s	1,90 ÷ 4,0	

Tab. 1: Hauptauslegungsdaten des Heliumkreislaufs (Auslegungswert/im Abnahmeversuch gemessen)

3.2.2 Prozeßgasführung

Der Verdichter G102 übernimmt das von der Methanisierungsanlage kommende, gekühlte Methangas (ca. 95% Methan, 1% CO_2, 4% H_2) und verdichtet es auf den erforderlichen Druck. Zur Einstellung der erforderlichen Methan-Durchsatzleistung dient ein handbetätigtes Stellventil auf der Saugseite des Verdichters, die genaue Mengeneinstellung erfolgt durch einen Mengenregler auf der Druckseite.

Im Wärmetauscher E103 wird das Methan vom Spaltgas auf etwa 360 ^{o}C vorgewärmt. Nachfolgend wird das vorgewärmte Methan mit Prozeßdampf im Verhältnis (molares C-Dampf-Verhältnis beim NFE-Auslegungsfall) 1:3 gemischt. Im QT-Diagramm (Abb. 3) ist deutlich die Temperaturabsenkung durch die adiabate Drosselung zu beobachten. Im Gemischüberhitzer E113 wird das so gewonnene Prozeßgas auf die erforderliche RSO-Eintrittstemperatur von ca. 460 ^{o}C überhitzt. Die genaue Temperatureinstellung geschieht über einen geregelten Bypass und den E113.

Das Einsatzgemisch wird im Röhrenspaltofen auf die parallel geschalteten Spaltrohre aufgeteilt. Die Spaltrohre sind mit einem zur Methanspaltung geeigneten Katalysator gefüllt.

Innerhalb der Katalysatorfüllung der Spaltrohre sind gewendelte Rückführungsrohre (pigtails) eingebaut (Abb. 5), wodurch das abströmende Spaltgas einen Teil seiner Wärme wieder für den Spaltprozeß abgibt. Der Anteil der auf diese Weise intern getauschten Wärmen wird im Sankey-Diagramm (Abb. 2) veranschaulicht.

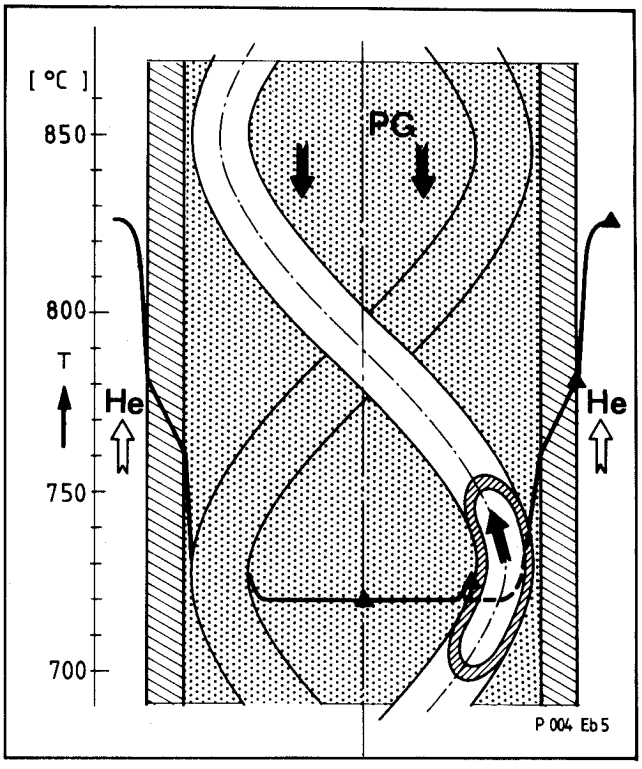


Abb.5: Längsschnitt durch ein Spaltrohr (schematische Darstellung)

Beim Durchströmen des Katalysators erwärmt sich das Prozeßgas im Gegenstrom zu Helium auf ca. 825 °C, wobei es zu Synthesegas (Spaltgas) reagiert (Zusammensetzung (trocken): 10% CH_4, 10% CO, 10% CO_2, 70% H_2).

Durch den Katalysator wird dabei eine selektive Reformierungsreaktion möglich. Beim Verlassen der Katalysatorschüttung und bei der anschließenden Abkühlung im Pigtail auf ca. 560 °C findet normalerweise keine Rückreaktion statt. Eine Verschiebung der Gaszusammensetzung ist lediglich bei ungünstigen Versuchsparametern über die Konvertierungsreaktion

und durch heterogene Reaktionen möglich (Rußbildung bei ungünstigen Versuchsparametern; z.B. niedrige Dampf:C-Verhältnisse).

Nach Verlassen des RSO wird das Spaltgas im E113 und E103 auf 460 °C bzw. 375 °C abgekühlt.

Die Differenzenthalpie bis zur Kondensationstemperatur wird im E104 zur Speisewasservorwärmung genutzt. Dabei kann eine Taupunktunterschreitung auftreten, was im QT-Diagramm deutlich durch die abknickende Abkühlkurve angezeigt wird. Um eine definierte Speisewassertemperatur zu gewährleisten, ist der E104 spaltgasseitig mit einem regelbaren Bypass ausgestattet. Der zur Mengenregelung notwendige Prozeßdampfüberschuß wird hinter dem E104 zugespeist. Dabei tritt eine deutliche Temperaturerhöhung auf (s. Abb. 3), die sogar zur Taupunktüberschreitung führen kann. Der Gemischstrom wird dann aufgeteilt, wobei ein kleiner Teilstrom (ca. 10%) zur Beheizung des Hauptentgasers F101 dient. Der Hauptstrom dient im E107 zur Speisewasservorwärmung und im E111 zur Heizwasseraufwärmung genutzt (Nachwärmenutzung). Hier können in der EVA bereits 2,5 MW Heizleistung ausgekoppelt werden, wobei der größte Anteil davon durch Kondensation des Wasseranteils im Prozeßgas frei wird. Nach Zumischen des Teilstromes durch den Hauptentgaser erfolgt die Schlußkühlung über einen Luft- und einen Wasserkühler (E108 und E109).
Das aus dem Spaltgas anfallende Kondensat wird in Kondensatabscheidern F109 und F103 vom Gasstrom getrennt und der Speisewasseraufbereitung zugeführt.

3.2.3 Kesselspeisewasser-Prozeßdampf-Kreislauf

Für die Prozeßdampferzeugung werden die in den Anlagenteilen EVA II und ADAM II anfallenden Kondensate verwendet. Nur zur Deckung unvermeidlicher Verluste wird etwa 1 m^3/h Zusatzkesselspeisewasser benötigt.

Die anfallenden Kondensate aus Reformierungs- und Methanisierungsanlage werden zusammengeführt und durch mehrmaliges Entspannen und Aufwärmen gemeinsam entgast.

Die Hauptmenge der gelösten Gase fällt im Vorentgaser F106 an, wird aufgefangen und mit dem Kompressor G103 wieder in das Prozeßgassystem eingespeist. Nach weiterer Feinentgasung (F102; F101) und Vorwärmung (E107) fördert die Hauptkesselspeisepumpe G104 das Speisewasser über den Vorwärmer E104 in den Prozeßdampferzeuger. Als Reserve ist eine gleichartige Reservepumpe installiert.

Bei Netzausfall wird der Antrieb einer Speisewasserpumpe automatisch durch ein Notstromaggregat mit Energie versorgt.

Vom Wärmetauscher E104 gelangt das Speisewasser in den Dampfkessel E101, der als Zwangsdurchlaufkessel nach dem Benson-Prinzip ausgeführt ist. Das vorgewärmte Speisewasser wird zunächst bei einem Druck von ca. 50 bar bis zum Siedepunkt erhitzt und anschließend verdampft. Im oberen Teil des Kessels erfolgt die Überhitzung des Dampfes.

Für die Regelung des Kessels wird die in den Prozeß eingespeiste Dampfmenge als Führungsgröße gewählt.

Die Dampfabgabe in den Prozeß erfolgt über einen Druckregler, welcher den Betriebsdruck des Kessels konstant hält.

Zur genauen Mengenregelung des Prozeßdampfstromes ist ein Überschuß von ca. 10% erforderlich, der dann dem Spaltgas nach dem E104 zugespeist wird.

Durch die Aufbereitung des Kondensats zu Kesselspeisewasser ist ein Kreislauf möglich, der jedoch durch die für die Entgasung notwendige Aufwärmung mit Wärmeverlusten verbunden ist (siehe QT-Diagramm, Hauptentgaser F101).

Die Hauptdaten des Prozeßdampfsystems enthält Tabelle 2.

	Dimension	Auslegung NFE	Auslegung PNP
Dampfdruck	bar	45/47	45/47
Temperatur Speisewasser	°C	250/200	215/215
Temperatur Dampferzeuger-Austritt	°C	/515	/625
Erzeugte Dampfmenge	kg/h	7.745/7.950	7.745/8.400

Tab. 2: Hauptdaten des Prozeßdampfsystems
(Auslegungswert/im Abnahmeversuch gemessen)

3.3 Methanisierung

Für die Methanisierung des Spaltgases der EVA II wurde ein 3-stufiger Prozeß mit Recycle um die erste Stufe gewählt. Aus Gründen der Katalysator-Lebenszeit ist die Begrenzung der maximalen Prozeßtemperatur auf etwa 650 °C notwendig.
Abb. 6 zeigt das Prozeßschema.

Die Apparate sind im Bild mit den gleichen Kurzbezeichnungen versehen, wie sie auch in der Versuchsanlage verwendet werden.

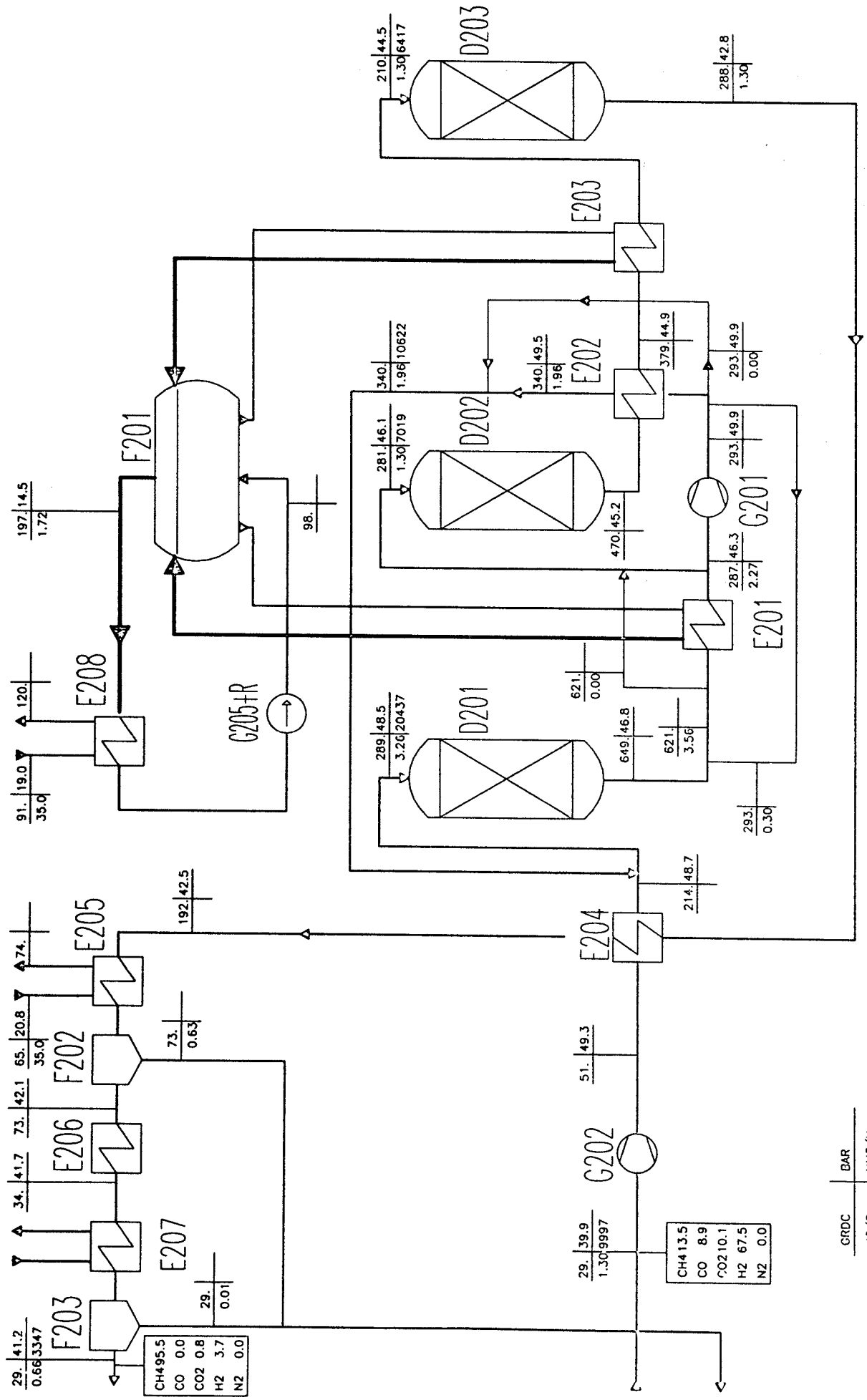


Abb. 6: VERFAHRENSFLIESSBILD DER VERSUCHSANLAGE ADAM II

Die Kürzel bezeichnen die folgenden Apparate:

ADAM II (Anlage 200)

D201 1. Methanisierungsreaktor

D202 2. Methanisierungsreaktor

D203 3. Gegenstromkühlreaktor

E201 Dampferzeuger

E203 Dampferzeuger

E202 Kreislaufgas-Vorwärmer

E204 Spaltgasvorwärmer

E205 Heizwasservorwärmer

E206 Methangas-Luftkühler

E207 Erdgas-Schlußkühler

E208 Dampfkondensator

F201 Dampftrommel

G201 Kreislaufgebläse

G202 Spaltgasverdichter

G205 Speisewasserpumpe

Wie aus dem Energieflußdiagramm (Abb. 7) hervorgeht, wird die im Synthesegas enthaltene Fernenergie zu ca. 93% als Heizwärme genutzt. Auffällig ist auch der im Recyclegas enthaltene hohe Energieinhalt, bedingt durch den relativ großen Massenstrom.

Durch die Zuordnung der Wärmemengen zum jeweiligen Temperaturniveau im Q/T-Diagramm (Abb. 8) wird der interne Wärmeaustausch innerhalb des ADAM veranschaulicht. Der vertikale Kurvenverlauf der drei ADAM-Reaktoren läßt deutlich ihre Bauweise als adiabate Reaktoren erkennen.
Eine Abweichung der Kurven der adiabaten Reaktoren von der Vertikalen bedeutet ebenfalls einen Wärmeverlust.

Die Temperaturverläufe der wärmeaufnehmenden Medien in den Dampferzeugern E201 und E203 sind Hilfskonstruktionen und werden aus den Ein- und Austrittszuständen der Dampftrommel berechnet.

Die Hauptdaten der Methanisierungsanlage sind in Tab. 3 aufgelistet.

	Dimension	Auslegung NFE	Auslegung PNP
Spaltgasmenge, trocken	m^3/h	9.591/9.700	7.105/7.650
Methangasmenge, trocken	m^3/h	3.173/3.250	1.850/2.100
CH_4-Gehalt des Methangases (trocken)	Vol%	95,0/95,5	- /95,5
max. Katalysatoraustritts-temperatur	°C	650/650	650/650
Sattdampferzeugung, Druck	bar	18,5/15,5+17,0	18,0/15,5
Druck nach Kreislaufgebläse	bar	46/50	46/48

Tab. 3: Hauptdaten der Methanisierungsanlage ADAM II (Auslegungswert/Meßwert im Abnahmeversuch)

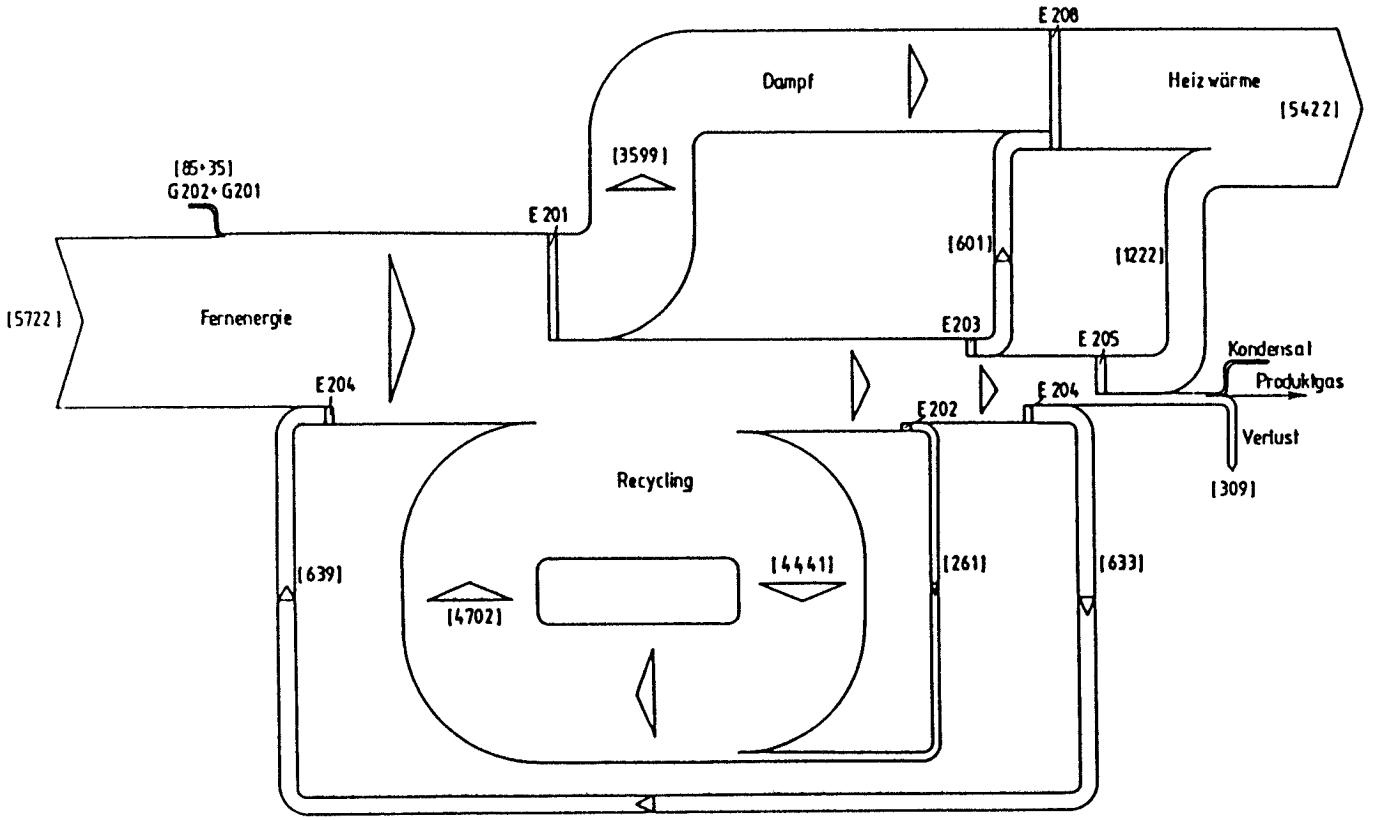


Abb. 7: Energieflußdiagramm für die Methanisierungsanlage ADAM II

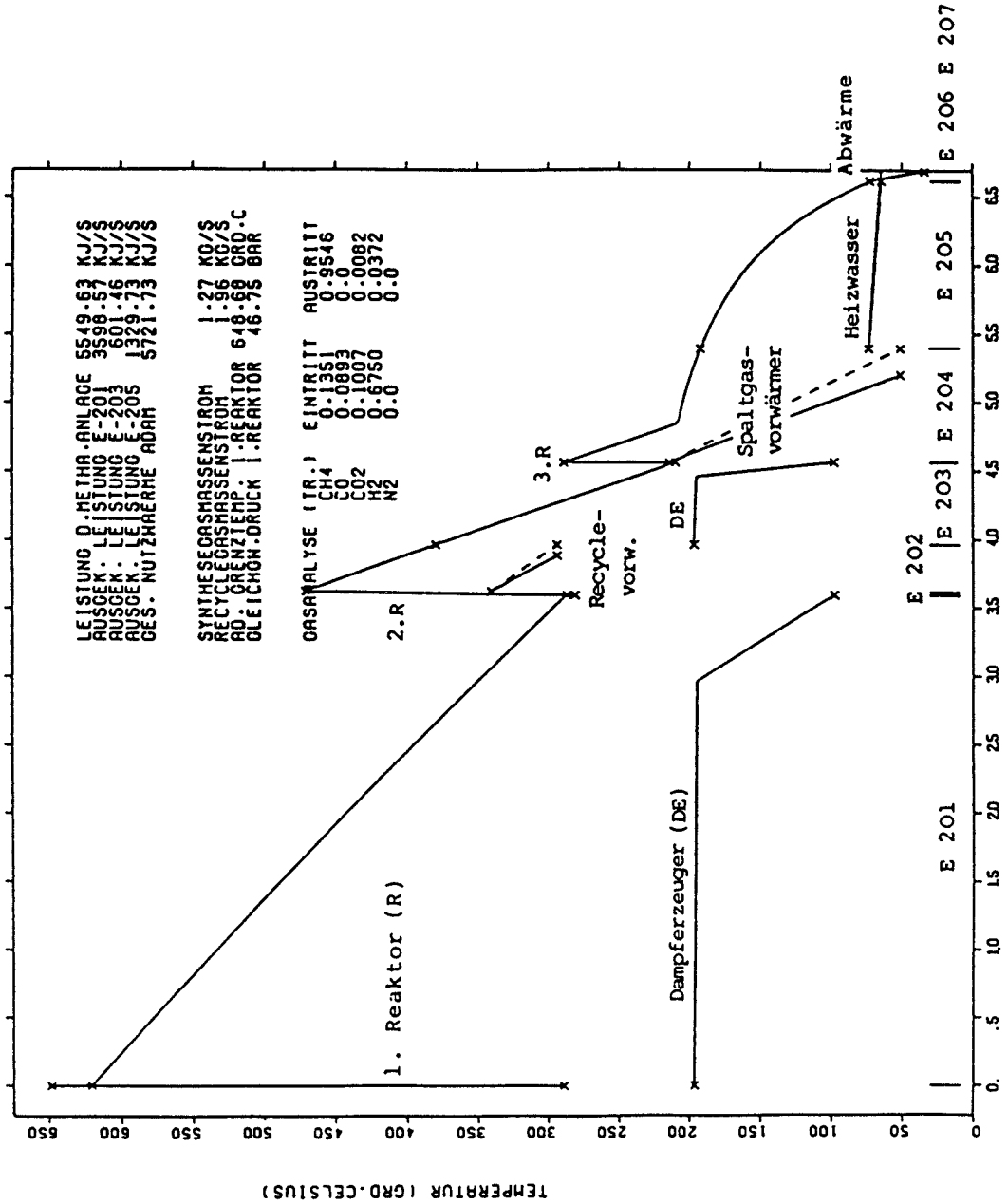


Abb. 8: Wärmenutzung im Anlagenteil ADAM II

3.3.1 Prozeßgas-Führung

Das von der Spaltanlage kommende Spaltgas wird im Verdichter G202 auf den vorgesehenen Betriebsdruck (49 bar) komprimiert. Im Wärmetauscher E204 erfolgt die Vorwärmung auf 214 °C, und nach Zumischung des auf 340 °C erwärmten Recyclegases hat die Mischung die für den Katalysator (MCR-2x, Haldor Topsøe) notwendige Starttemperatur von ca. 280 °C. Im ersten Methanisierungsfestbettreaktor reagiert das Gas dann adiabat bis zur gewünschten Grenztemperatur von 650 °C. Der Methangehalt (trocken) liegt dann entsprechend dem Methanisierungsgleichgewicht bei ca. 65%. Die Grenztemperatur wird über den Recyclemassenstrom geregelt. Für unverdünntes Frischgas würde die adiabate Grenztemperatur bei ca. 820 °C liegen.
Nach Verlassen des Reaktors tritt das Gas dann in den Dampferzeuger E201 ein, wo die durch die chemische Umsetzung freigesetzte Wärme zur Dampferzeugung dient.

Um den E201 ist ein regelbarer Bypass zur Eintrittsleitung des 2. Methanisierungsreaktors D202 installiert, um unabhängig von der maximalen Gebläseeintrittstemperatur des G201 eine minimale Gaseintrittstemperatur von ca. 280 °C in den Reaktor zu gewährleisten. Hinter dem E201 findet dann die Abtrennung des Recyclegasstromes statt.

Das Recyclegebläse komprimiert das Gas wieder auf ca. 50 bar, und im Recyclegasvorwärmer E202 wird das Gas auf 340 °C aufgeheizt und dann wie beschrieben vor dem 1. Methanisierungsreaktor zugespeist. Um den E202 befindet sich ein regelbarer Bypass, mit dem die Austrittstemperatur des Recyclegases und damit auch die Eintrittstemperatur in den 1. Reaktor eingestellt wird.
Der 2. Reaktor ist ebenfalls ein adiabater Festbettreaktor. Die adiabate Grenztemperatur liegt bei 470 °C und entspricht damit einem Methangehalt (trocken) von ca. 85%. Das Reaktionsgas dient anschließend im E202 zur Vorwärmung des Recyclegases und tritt mit einer Eintrittstemperatur von 380 °C in den

Dampferzeuger E203 ein. Durch Änderung des Dampfdruckes und damit der Verdampfungstemperatur kann die Eintrittstemperatur in den 3. Methanisierungsreaktor variiert werden.
In diesem Festbettreaktor strömt das Gas im Gegenstrom durch Rohre, die innerhalb des Katalysatorbettes geführt sind und erwärmt sich dabei von 210 °C auf ca. 315 °C. Beim Durchströmen des Katalysators erwärmt sich das Gas infolge der exothermen Reaktion auf max. ca. 360 °C und kühlt sich dann durch die Gegenstromkühlung auf ca. 290 °C ab.

Der der Katalysator-Austrittstemperatur von ca. 310 °C entsprechende Methangehalt (trocken) beträgt 95,5%. Durch die interne Vorwärmung kann das Gas mit einer relativ niedrigen Eintrittstemperatur (unterhalb der Katalysatorstarttemperatur) in den Reaktor eintreten und senkt die Katalysatoraustrittstemperatur, wodurch der geforderte Methangehalt erreicht wird. Durch die Verwendung des Gegenstrom-Kühlreaktors wird ein vierter Reaktor zur Erreichung der gewünschten Gaszusammensetzung vermieden.
Nachteile der verwendeten Bauweise sind der hohe Druckverlust von 1,7 bar und die komplizierte Bauweise (Baukosten).

Im weiteren Gasweg wird die fühlbare Wärme des Methangases und unterhalb des Wasserdampftaupunktes zusätzlich die Kondensationswärme in weiteren Wärmetauschern zur Spaltgas- und Heizwasservorwärmung (E204 bzw. E205) genutzt.

Das auf ca. 100 °C abgekühlte Methan wird durch weiteren Wärmetausch im Luftkühler E206 und dem nachgeschalteten Schlußkühler auf die geforderte Ansaugtemperatur der Methanspaltung von 40 °C gebracht. Das anfallende Gaskondensat in den Abscheidern F202 und F203 wird gemeinsam mit den Kondensaten aus der Methanreformierung dem Entspannungsbehälter F106 zugeführt.

3.3.2 Dampf- und Heizwasserkreislauf

Zur Abführung der ausgekoppelten Fernenergie im ADAM dient ein Dampf- und ein Heizwasserkreislauf. Nach dem 1. und nach dem 2. Methanisierungsreaktor sind je ein Dampferzeuger

angeordnet, der jeweils durch eine Dampftrommel versorgt wird. Im Q/T-Diagramm (Abb. 8) und im Energieflußdiagramm (Abb. 7) ist deutlich zu sehen, daß dabei der E201 den Hauptanteil der Energie auskoppelt. Die Temperatur wird über den Druck geregelt (Auslegungsfall Dampf: T = 197 °C, p = 14,5 bar).

Der Dampf wird im E208 kondensiert und auf 98 °C abgekühlt, wobei Wärme an Heizwasser abgegeben wird. Die Pumpe G205 fördert das KSW zurück in die Dampftrommel, womit der Dampfkreislauf geschlossen ist.

Die ausgekoppelte Fernenergie wird über das Heizwasser an das Heizwerk der KFA abgegeben. Beim An- und Abfahren oder falls das Heizwerk keine Wärme abnehmen kann, wird das Heizwasser in Parallelschaltung zum Heizwerk durch einen Luftkühler abgekühlt. Vom Heizwerk bzw. Luftkühler mit 65 °C kommend wird das Heizwasser im E205, im E111 und im E208 auf 120 °C erwärmt. Mit dieser Temperatur strömt das Heizwasser zurück zum Heizwerk bzw. Luftkühler.

Im NFE Auslegungsfall werden dabei 4,2 MW über Dampf (E208), 1,2 MW im E205 und 2,4 MW im E111 (EVA) über Heizwasser ausgekoppelt.

4. Technische Beschreibung

4.1 Allgemeines

4.1.1 Standort

Als Standort für die Anlage EVA II/ADAM II wurde nach einer vorhergehenden Standortanalyse ein ca. 90 m x 60 m großes Gelände in der Kernforschungsanlage Jülich ausgewählt. Der Anordnungsplan für die Anlage ist in Abb. 9 dargestellt.

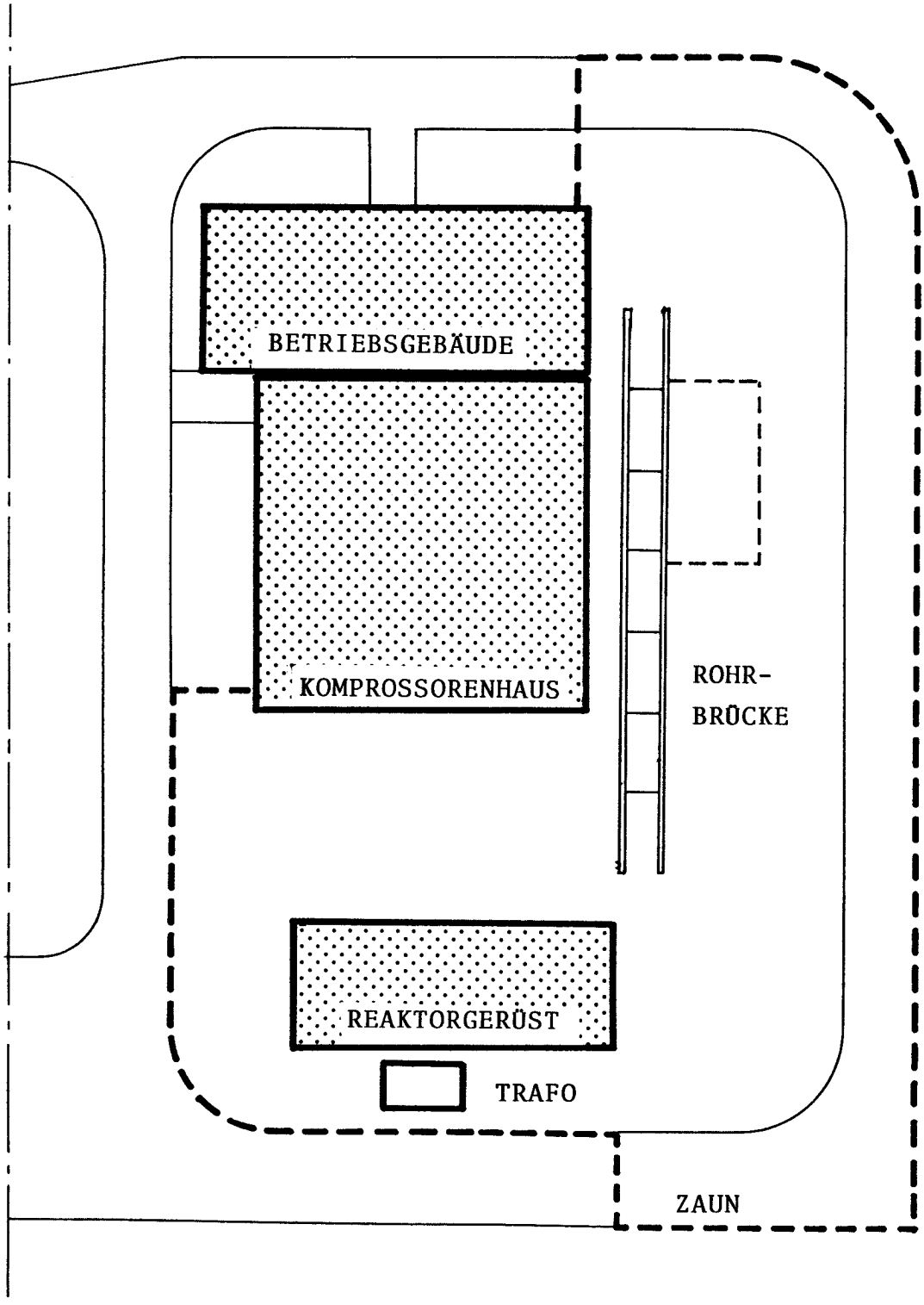


Abb. 9: Anordnungsplan der Versuchsanlage EVA II/ADAM II

Auf diesem ca. 5.400 m^2 großen Gelände wurden die Anlagen sowie alle zum Betrieb notwendigen Nebenanlagen einschließlich des für die Betriebsmannschaft erforderlichen Büro- und Sozialgebäudes errichtet.

Die Einbindung der Anlage in die bestehenden Ver- und Entsorgungssysteme der KFA sowie die Errichtung der benötigten Dampf- und Kondensatleitungen zur Fortleitung der von ADAM II freigesetzten Wärme zum Heizwerk der KFA ließen sich aufgrund des gewählten Standortes kostengünstig realisieren.

Eine Beeinträchtigung benachbarter Institute und Einrichtungen durch Lärm ist aufgrund der ausreichend großen Abstände (sowie Lärmschutzmaßnahmen) nicht zu erwarten.

4.1.2 Gliederung und Aufstellung

Die Gesamtanlage EVA II/ADAM II ist infolgende Teilanlagen gegliedert worden:

Methanreformierung	Einheit 100
Methanisierung	Einheit 200
Heliumreinigung	Einheit 300
Heliumversorgung	Einheit 400
Instrumentenluftversorgung	Einheit 500
Speisewasserversorgung	Einheit 600
Methanversorgung	Einheit 700
Notstromversorgung	Einheit 800

Die wesentlichen Bestandteile der Spaltanlage, nämlich

- der heliumbeheizte Reaktor D101 zur katalytischen Umsetzung des Wasserdampf-Methan-Gemisches,
- der heliumbeheizte Dampferzeuger E101,
- das Heliumkreislaufgebläse G101 sowie
- der elektrisch versorgte Heliumerhitzer E102

wurden in ein etwa 40 m hohes Stahlgerüst eingebaut, das verkleidet und zwangsbelüftet wird. Dieses Stahlgerüst nimmt außerdem die elektrische Versorgungseinheit des Heliumerhitzers

sowie die zum Betrieb des Heliumkreislaufgebläses erforderlichen Nebenaggregate auf. Ein Montage- und Abstellraum innerhalb des Stahlgerüstes wurde komplett abgetrennt, besitzt eine Überdruckbelüftung und ist nur über Schleusen zugänglich.
Die übrigen Apparate mit Ausnahme von Maschinen der Spaltanlage wurden im Freien aufgestellt, wie auch die Methanisierung, die Speisewasserversorgung, die Helium- und die Methanversorgung als Freianlagen ausgebildet sind.

Hauptsächlich aus Gründen des Lärmschutzes wurden alle größeren Maschinen wie Methanverdichter G102 und Spaltgasverdichter G202, Methanisierungskreislaufgebläse G201, sowie die größeren Pumpen in einem geschlossenen Kompressorenhaus untergebracht, welches zur Sicherung ausreichender Luftwechselzahl zwangsbelüftet wird. Sämtliche Einrichtungen dieses Kompressorenhauses sind in explosionsgeschützter Ausführung, teilweise in druckfester Kapselung, ausgeführt.

Für die Freianlagen wurden, soweit in ihnen die Handhabung von in Luft explosionsfähiger Gase erfolgt, ebenfalls explosionsgeschützte Einrichtungen installiert.

An das Kompressorenhaus schließt sich ein völlig abgetrenntes Betriebsgebäude an, das die Meßwarte, die elektrische Schalt- und Verteilstation sowie Büro-, Sozial- und Nebenräume aufnimmt und aufgrund seiner Lage nicht als explosionsgefährdet anzusehen ist.

- Für diese Anlage wurde die Betriebserlaubnis gemäß § 19 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (vereinfachtes Verfahren) für 18 000 Betriebsstunden, verteilt auf 5 Jahre, bei jährlich ca. 3 600 Betriebsstunden erteilt.

4.1.3 Emission der Gesamtanlage

Das NFE-Prinzip mit einem geschlossenen System vermeidet generell Emissionen von Verbrennungsprodukten und damit auch die Freisetzung verbrennungstypischer Schadstoffe. So wird in der Versuchsanlage EVA II/ADAM II das gesamte, den beiden thermochemischen Umwandlungs-Reaktionen unterworfene Prozeßmedium in einem druckdichten Kreislaufsystem von Druckbehältern, Rohrleitungen und Maschinen eingeschlossen. Zum Zwecke des Wärmetransportes zirkuliert es zwischen den Anlagenteilen Methanreformierung (EVA II) und Methanisierung (ADAM II). Das an verschiedenen Stellen anfallende Kondensat (Wasser) wird zwar aus dem Prozeßgassystem ausgeschleust, jedoch als Kesselspeisewasser wiederverwendet.

Wie regelmäßige gründliche Analysen gezeigt haben, setzen sich die Prozeßgase nur aus folgenden Bestandteilen zusammen: CH_4 - H_2 - CO - CO_2 - H_2O. Diese liegen in den verschiedenen Anlagenteilen in jeweils unterschiedlicher Konzentration vor. Neben diesen an den Umwandlungsprozessen beteiligten Gaskomponenten wurden nur noch geringe Mengen an Stickstoff gefunden. Dies sind Reste der N_2-Füllung des Rohr- und Behältersystems in Stillstandszeiten. Schwefelhaltige Verbindungen und höhere Kohlenwasserstoffe können mit Gehalten < 0,1 ppm vorkommen. Bei eventuellem Entweichen von Prozeßgasen ind die Umwelt bestünden demnach schlimmstenfalls Gefahren aufgrund der Brennbarkeit des Gasgemisches und aufgrund der bekannten Giftigkeit des CO-Anteiles bei Einatmung. Aus diesen Gründen ist die gesamte Anlage explosionssicher ausgeführt und zusätzlich mit Detektoren zum Aufspüren von Gasleckagen ausgerüstet.

Beim planmäßigen Anfahren und Abstellen der Anlage EVA II/ ADAM II sowie bei eventuellen extremen Betriebsstörungen wird das Prozeßgas aus dem abgeschlossenen System über eine Fackelanlage in 43 m Höhe verbrannt. Die vollkommene Schwefelfreiheit und der begrenzte Inhalt des Prozeßgassystems entsprechend etwa 350 m^3 (i.N.) Methan gewährleisten bei derartigen selten

und nur kurzzeitig eintretenden Vorkommnissen außer einer geringfügigen Stickoxid-Bildung in der Fackelflamme keine Emission von gasförmigen Schadstoffen in die Atmosphäre.

Verunreinigungen des Abwassers sind bei Normalbetrieb auch bei unterschiedlichen Lastfällen nicht aufgetreten.

Für Schallemissionen wurde bei der Auslegung der Gesamtanlage eine Obergrenze von 70 dB(A) an der Anlagengrenze vorgegeben. Dieser Wert wird bei jedem Betriebszustand unterschritten.

4.1.4 Betriebsmittelverbrauch

Der Energieverbrauch der Gesamtanlage wird im wesentlichen durch die Leistungsanforderung des elektrischen Helium-Erhitzers bestimmt. Diese ergibt sich jeweils unmittelbar aus den Vorgaben für den einzustellenden Betriebszustand der Anlage. Bei der Auflistung der Leistungsaufnahme wird deshalb ein stationärer Betrieb bei NFE-Auslegungsbelastung angegeben.

- Leistungsaufnahme des He-Erhitzers	10,3	MW
- elektrische Energie für sonstige Verbraucher	ca. 1	MW
- Kühlwasser Δt = 10 K	100	m^3/h
- Frischwasser	0,5	m^3/h
- Erdgas	0,3	m^3/h (i.N.)
- Methan	12	m^3/h (i.N.)
- Helium	2,5	m^3/h (i.N.)
- Kohlendioxid	1,2	kg/h
- Sauerstoff	0,01	m^3/h (i.N.)
- Stickstoff	8	m^3/h (i.N.)

den angegebenenVerbräuchen sind die Verluste durch die vielfältigen Gasprobenentnahmen und Regeneration von Gasreinigungskomponenten enthalten. Teilweise höhere Gasmengen werden benötigt für

- Reduzieren von Katalysatoren
- Inertisieren von Anlagenteilen
- Aufheizen von Anlagenteilen u.ä.

4.2 Der Heliumkreislauf

4.2.1 Die Helium-Druckbehälter

Als wesentlichste Komponente der Methanreformierung werden die Komponenten des Heliumkreislaufes betrachtet. Ihre Eigenschaften, ihr Betriebsverhalten und ihr Zusammenwirken in dem gekoppelten System soll unter verschiedenen regulären und störfallmäßigen HTR-typischen Bedingungen untersucht werden.

Die Komponenten des Helium-Systems sind in 3 Druckbehältern untergebracht, die durch koaxial ausgebildete Leitungen starr miteinander verbunden sind, siehe Abb. 4. Der größte Behälter D101 enthält das Spaltrohrbündel. Er ist auf 4 Pratzen aufgestellt und fest an der Auflagestelle verankert.

Der relativ kleine Druckbehälter des Dampferzeugers E101 ist im oberen Teil über eine kurze Koaxial-leitung an den Behälter D101 angeflanscht und wird mit seinem gesamten Gewicht von etwa 11 t auf diese Weise getragen. Zum Ausgleich des Kipp-Momentes ist eine Abstützung vorgesehen.

Der elektrische Heliumerhitzer E102 ist mit seinem Druckbehälter über eine 5 m lange waagerechte koaxiale Leitung, deren Achse in der Ebene der Auflagen der Druckbehälter D101 und E102 verläuft, fest verbunden. Die Wärmedehnungen des Druckrohres der Koaxleitung werden dadurch ausgeglichen, daß der Heliumerhitzer auf seiner Auflage gleitend der Längenänderung folgen kann.

Diese gewählte Anordnung der Druckbehälter ergibt für alle wichtigen Flanschverbindungen nur Belastungen in Achsrichtung der Verbindungsstelle. Dadurch werden die Dichtflächen sehr gleichmäßig beaufschlagt. Für die großen Flansche werden 3 unterschiedliche Dichtsysteme verwendet (siehe Abb. 10):

- gasgefüllte Metall-O-Ringe
- gasdruck-gestützte Metall-O-Ringe
- Silber-Flachdichtungen.

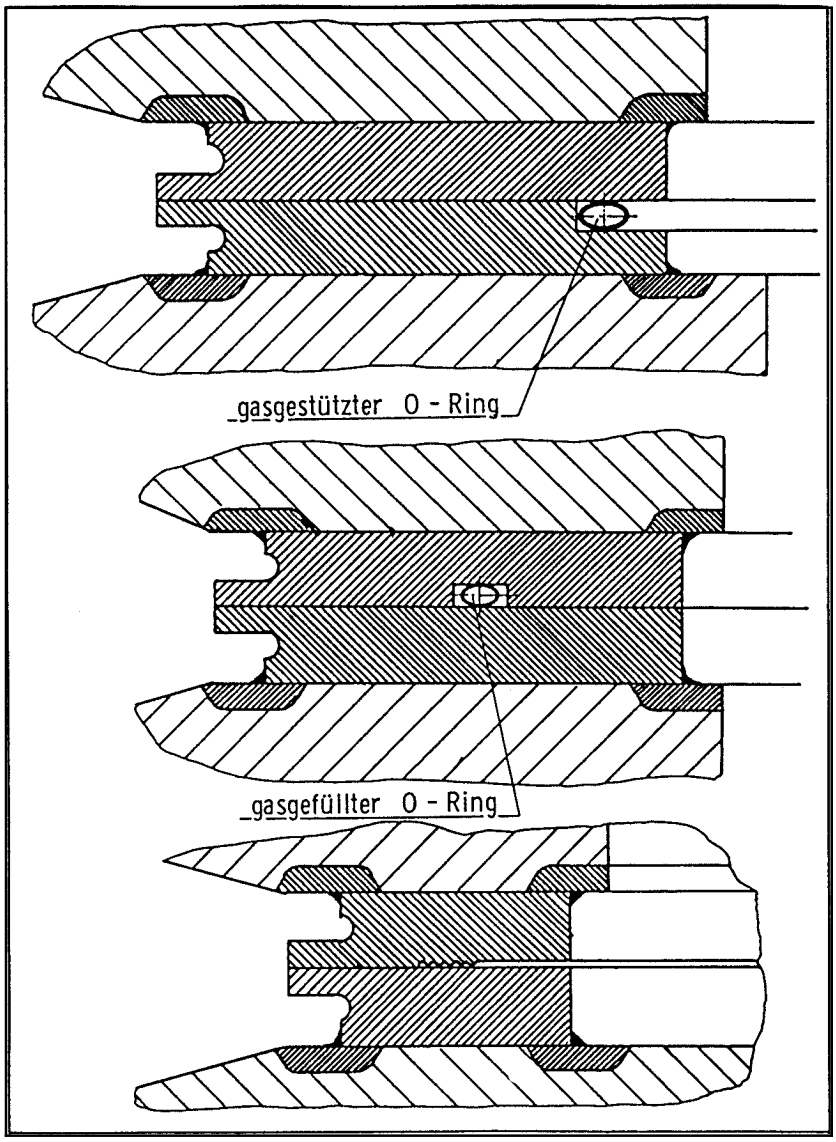


Abb. 10: Flanschdichtungen im Helium-System

Alle Dichtungstypen sind mit Schweißlippen kombiniert, die bei Dichtschwierigkeiten zugeschweißt werden können.

Alle Druckbehälter und -rohre sind aus dem Werkstoff 13 CrMo 44, Wst.-Nr. 1.7335, gefertigt. Sie wurden entsprechend den gültigen Richtlinien gefertigt und geprüft. Von der Genehmigungsbehörde war für jede Flanschverbindung zusätzlich der Nachweis verlangt worden, daß bei einem Rundum-Abriß bei vollem Betriebsdruck kein Teil vom Standort der Anlage bis zu einer der nuklearen Einrichtungen der KFA fliegen könne. Ein rechnerischer Nachweis wurde anerkannt.

4.2.2 Der Heliumerhitzer E102

Die Aufheizung des Heliums erfolgt durch elektrischen Strom in einem separaten Druckbehälter. Im unteren Teil des Druckbehälters ist radial der Anschlußstutzen für die Koaxleitung des Heliumein- und austritts angeordnet. Die Zuführung des elektrischen Stromes erfolgt durch den oberen Behälterdeckel mit 6 axial verlaufenden Stahlelektroden.

Daten des Druckbehälters:

Länge	11.000	mm
Durchmesser	2.500	mm
Wandstärke	63	mm
Werkstoff	23CrMO 44	
Gesamtgewicht (incl. Einbauten)	135	t
Betriebstemperatur	505	^{o}C
Betriebsdruck	45	bar

Der Erhitzer arbeitet nach dem Prinzip der elektrischen Widerstandsheizung. Als Heizelemente dienen 48 Heizrohre:

Länge	8.030	mm
Innendurchmesser	28	mm
Wandstärke	3,5 bis 6	mm
Werkstoff	Nicofer 7216	

Die Wandstärke der Heizrohre ist nicht konstant über die Länge. Dadurch wird die Leistungsfreisetzung ungleichmäßig über die Rohrlänge verteilt. Aufgrund der Proportionalität von Wärmestromdichte und Temperaturdifferenz wird mit dieser Maßnahme die maximale Heizrohrtemperatur bei möglichst kompakter Bauweise unterhalb der zulässigen Grenze freigehalten.

Die Leistung des Heliumerhitzers beträgt 10 MW. Die Auslegung gestattet bei einem Druck von 40 bar die Aufheizung von 350 ^{o}C auf 950 ^{o}C bei einem He-Durchsatz von 3,2 kg/s, oder von 450 ^{o}C auf 950 ^{o}C bei 3,85 kg/s.

Die elektrische Leistung wird als Gleichstrom, im Auslegungspunkt 250 V bei 40.000 A, zugeführt. Zur Energieversorgung wird eine Anordnung von Stufentransformator mit nachgeschaltetem Transduktor und ungesteuerter Drehstrombrücke verwendet. Auf der Gleichstromseite werden 2 um 30^{o} elektrisch versetzte 6-pulsige Drehstrombrücken parallel geschaltet. Die sich ergebenden Oberwellen auf der 10 kV-Oberspannungsseite der Gleichrichteranordnung werden durch Saugkreise weitgehend abgefiltert.

Die Regelung des He-Erhitzers erfolgt über die He-Austrittstemperatur. Diese wird gemessen und regelt als Istwerte die Einstellung der elektrischen Spannung und damit der Heizleistung. Für das Anfahren wird durch eine überlagerte Regelung der maximal erlaubte Temperaturgradient eingehalten.

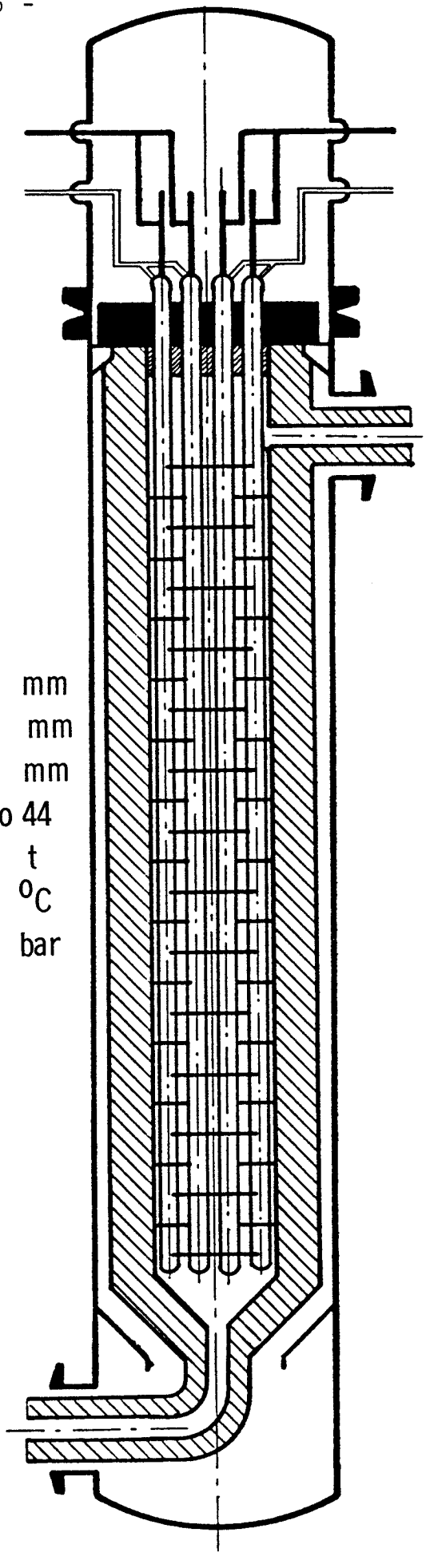
4.2.3 Der Röhrenspaltofen D101

Das Spaltrohrbündel ist im größten Druckbehälter des Systems untergebracht, siehe Abb. 4 und Abb. 11.

Druckbehälter-Daten:

Gesamtlänge	18126	mm
Durchmesser	2300	mm
Wandstärke	54	mm
Werkstoff	13 CrMo 44	
Gesamtgewicht (mit Einbauten)	171	t
Betriebstemperatur	500	^{o}C
Betriebsdruck	45	bar

In die obere, abnehmbare Haube sind die Durchführungen der 10 Prozeßgas-Eintritts- und der 10 Reformergas-Austrittsleitungen auf einer Umfanglinie strahlenförmig in die Behälterwand eingeschweißt.
Am unteren Ende des Druckbehälters befindet sich der Anschluß an die koaxiale Verbindungsleitung zum Heliumerhitzer E102,



D 101

RSO

L	18.126	mm
∅	2.300	mm
δ	54	mm
Wst	13 Cr Mo 44	
M	171	t
T	500	°C
P	45	bar

Abb. 11: Längsschnitt durch den Röhrenspaltofen

aus der das 950 °C heiße Helium zuströmt. Im oberen Teil des Behälters, unterhalb des Haubenflansches, ist die Koaxleitung zum Dampferzeuger E101 angeflanscht.

Für die Aufnahme des Spaltrohrbündels besteht eine zentrale Kaverne von:

Länge	11 000	mm
lichter Durchmesser	1 200	mm

Die Begrenzung wird durch eine Mauer aus Kohlenstoff-Formsteinen gebildet, die mit einem metallischen Liner versehen ist. Dieser Kohlenstoff-Aufbau ist ca. 400 mm dick und dient gleichzeitig der thermischen Isolierung zwischen heißem und kaltem Heliumstrom. Die Außenseite des zylindrischen Kohlestein-Aufbaus trägt ebenfalls einen Metalliner. Dieser ist gasdicht ausgebildet, während der innere Liner mit Druckausgleichsöffnungen versehen ist.

Sowohl innerer wie äußerer Liner sind am oberen Ende fest aufgehängt. Die Wärmedehnungen werden dadurch ermöglicht, daß beim äußeren Liner nach Verjüngung des Durchmessers am unteren Ende ein Metall-Faltenbalg eingebaut ist und der innere Liner am unteren Ende frei schieben kann.

Für die Auslegung des RSO für die NFE-spezifischen Untersuchungen wurden folgende Grundsätze vorgegeben:

- Helium und Prozeßgas werden im Gegenstrom geführt: Helium im Außenraum des Spaltrohrbündels von unten nach oben, Prozeßgas innerhalb der Spaltrohre von oben nach unten.
- Die Tragplatte für die Spaltrohre soll nichtgleichzeitig druckdichter Abschluß des Heliumkreislaufes sein.
- Die Spaltrohre sollen einzeln ausgewechselt werden können.

- Es soll kein Prozeßgas-Rekuperator in die Spaltrohre integriert werden, jedoch sollen die räumlichen Verhältnisse in der Versuchsanlage dies für eine andere Variante zulassen.
- Nach den überaus positiven Erfahrungen bei den Untersuchungen in EVA I /7;6/ sollen die Spaltrohre mit inneren Rückführungsrohren eingesetzt werden.

Im Hinblick auf die unter NFE-Bedingungen zu übertragende Leistung besteht das Spaltrohrbündel aus 30 Spaltrohren.
Zur Verbesserung des Wärmeübergangs von Helium an die Spaltrohre sind zwei Maßnahmen ergriffen worden:

- Umlenkbleche nach der Art "Disk-and-Doughnut" leiten den Heliumstrom.
- In den Zwickeln zwischen je 3 Spaltrohren sind Verdrängerrohre eingefügt, um den Strömungsquerschnitt zu verengen.

Abbildung 12 zeigt eine Ansicht des Spaltrohrbündels.

Abb. 12: Sicht auf das NFE-Spaltrohrbündel von unten

Die Umlenkbleche sind an 7 Halterohren befestigt. Diese Halterohre haben den gleichen Durchmesser wie die Spaltrohre. Damit ergibt sich ein regelmäßiges 6-Eck-Rohrbündel mit insgesamt 37 Rohren in gleichmäßiger 3-Eck-Teilung.

Daten des Spaltrohrbündels:

Kavernendurchmesser	1 200	mm
Länge der Spaltrohre (beheizt)	10 970	mm
Durchmesser der Spaltrohre (außen)	120	mm
Wandstärke der Spaltrohre	10	mm
Teilung des Bündels	155	mm
Anzahl der Spaltrohre	30	
Anzahl der Halterohre	7	
Anzahl der Umlenkplatten	47	
Spaltrohr-Werkstoffe	Incoloy 800H	
	Incoloy 802	
	IN 519	
	Manaurite 36x	

Die Führung des He-Stromes im RSO soll anhand von Abb. 11 erklärt werden. Nach einer 90^{o}-Umlenkung tritt das Helium durch eine trichterförmige Erweiterung von unten in die Bündelkaverne ein. Es strömt von unten nach oben durch das Spaltrohrbündel. Durch 47 eingebaute Umlenkbleche "Disk-and-Doughnut" wird ein Kreuz-Gegen-Strom erreicht. Am oberen Ende des Spaltrohrbündels ist eine kreisförmige Öffnung im Strömungsmantel, durch die das Helium radial abströmt und zum Dampferzeuger E101 geleitet wird.

Die Spaltrohre sind mit ihrem oberen Ende in eine Tragplatte eingehängt. Die Löcher für die Spaltrohre sind konisch ausgeführt. Die Spaltrohre weisen ebenfalls eine konische Auflagefläche gleichen Winkels auf. Sie wurden ohne besondere Dichtung im konischen Sitz montiert. Durch spezielle Halteschrauben werden die Spaltrohre gesichert. Diese Konstruktion ermöglicht ein einfaches Auswechseln eines einzelnen Spaltrohres.

Die Tragplatte hat einen Gesamtdurchmesser von 2.182 mm und ist 250 mm dick. Sie ist innerhalb des Druckbehälters gelagert und durch Schrauben befestigt. Gefertigt ist sie aus dem Werkstoff 13 CrMo 44. Die Druckentlastung der Tragplatte wird durch Ausgleichsbohrungen erzielt. Dadurch wird der Raum oberhalb der Platte ebenfalls von Helium ausgefüllt und die Tragplatte von beiden Seiten mit dem gleichen Druck beaufschlagt. Durch eine Wärmeisolierung unterhalb der Tragplatte wird sie gegen hohe Temperaturen geschützt.

Oberhalb der Tragplatte ist jedes einzelne Spaltrohr durch eine Abschlußkappe verschlossen, siehe Abb. 13.

Abb. 13: Obere Abschlußkappen der Spaltrohre mit Anschlußleitungen für Feedgas, Produktgas und Meßsonden

Diese Kappen enthalten jeweils 2 getrennte Rohranschlüsse, einen zentrisch in Achsrichtung für das feed-Gas und einen seitlichen für die Abströmung des Produktgases. Eine Reihe von Spaltrohren des Bündels der Versuchsanlage EVA II ist mit weiteren Anschlüssen versehen. Die Anschlußleitungen von jeweils 3 nebeneinander liegenden Spaltrohren werden sowohl feedgasseitig wie auch produktgasseitig zu einer Rohrleitung zusammengefaßt. So entstehen 10 feed-Gas- und 10 Produktgasleitungen, von denen jede separat durch die Wand der Haube des Druckbehälters durchgeführt wird. Damit besteht die Möglichkeit, den Prozeßgasstrom durch jede 3er-Gruppe der Spaltrohre zu detektieren oder abzusperren ohne das He-System zu öffnen, unter Umständen sogar während des laufenden Betriebes.

Die Spaltrohre sind mit internen Rückführungen ausgerüstet. Dadurch ist es möglich, beide Prozeßgas-Anschlußleitungen am oberen, kälteren Ende des Spaltrohres anzuschließen. Die interne Rückführung des Produktgases erfolgt über 2 schraubenförmig gewendelte Rohrleitungen, siehe Abb. 5.

Abmessungen der internen Rückführungsrohre:

Rohrdurchmesser außen	20	mm
Rohrwandstärke	2,1	mm
Wendeldurchmesser	70	mm
Wendelsteigung	192	mm

Zur Distanzierung gegen die Spaltrohrwand sind die Rückführungsrohre mit Nocken versehen.

Die Spaltrohre sind mit einer unregelmäßigen Schüttung von Katalysator in Form von Raschigringen gefüllt.

Katalysator	BASF G 1-25	
Ring-Durchmesser außen	12,7	mm
Ring-Durchmesser innen	4,8	mm
Länge des Ringes	9,5	mm

Das Einfüllen des Katalysators in die Spaltrohre erfolgte über die zentrisch in der oberen Abschlußkappe angeordneten Anschlußrohre für das feed-Gas. Die Füllung der Spaltrohre wurde so vorgenommen, daß für jedes Spaltrohr mit Druckluft die gleiche Druckdifferenz zwischen den beiden Prozeßgasanschlußstutzen gemessen wurde. Die Katalysator-Einfüllmengen der einzelnen Spaltrohre schwanken danach um $\pm$ 6%.

Ein Auswechseln des Katalysators kann ebenfalls durch das feed-Gas-Anschlußrohr vorgenommen werden. Gebrauchter Katalysator kann mit einem Staubsauger abgesaugt werden. Durch die Wendelung der Rohre für die interne Produkt-Rückführung bleibt über die gesamte Länge des Spaltrohres ein zentraler Kanal mit einem Durchmesser von 50 mm frei, durch den mit einem Saugrohr der Katalysator auch vom unteren Spaltrohrende herausgebracht werden kann. Dies wurde vor dem Einbau des Spaltrohrbündels in den Druckbehälter erfolgreich erprobt.

Der in der EVA II-Anlage verwendete Katalysator wurde bezüglich seines Betriebsverhaltens keinem eigenständigen Katalysatorprogramm unterworfen, sondern im Sinne einer großtechnischen Anlage als Betriebsmittel eingesetzt.

Der Spaltreaktor ist mit handelsüblichem BASF-Katalysator G 1-25 in Ringform mit den Abmessungen 12,75 mm x 4,75 mm x 9,5 mm Höhe befüllt. Die Katalysatorfüllung ist auf 30 Spaltrohre mit 100 mm Innendurchmesser sowie einer inneren gewendelten Gasrückführung (Pigtail) verteilt. Die Schütthöhe in den Spaltrohren beträgt 11 m. Pro Spaltrohr wurden bei der Erstbefüllung im Mittel 85,7 kg, bei einer zweiten Befüllung im Mittel 77,6 kg Katalysator eingebracht. Die größere Füllmenge bei der Erstbefüllung wurde durch den Einsatz eines Rüttlers während des Füllvorganges erreicht.

Das Füllen der Spaltrohre mit Katalysator sowie dessen Reduktion und Passivierung erfolgte in enger Anlehnung an die Empfehlungen des Herstellers, die sich auf die Robustheit des Katalysators beruft.

4.2.4 Der Dampferzeuger E101

Der He-beheizte Dampferzeuger ist als Zwangsdurchlaufkessel mit direkt angeschlossener Überhitzung ausgebildet.Die Verdampfung erfolgt aufwärts.
Verdampfung und Überhitzung finden in 11 Helissenrohren statt (Abb. 14). Diese sind in 2 Lagen um einen Verdrängerkörper gewickelt. Jedes Verdampferrohr hat folgende Abmessungen:

Länge	21,4	m
Außendurchmesser	25	m
Wandstärke	2,6	m
Helissendurchmesser	540/450	mm
Werkstoff	x 10 Cr.NiAlTi 3220 (Incoloy 800H)	
Betriebstemperatur	706	^{o}C
Betriebsdruck	55	bar

Die Helissenrohre werden durch 3 Lochblechstreifen gehalten und an den Berührungsstellen durch Hülsen geschützt, die gegen Fretting mit Chromcarbid beschichtet sind.

Die Kaltwasserrohre weisen die gleichen Grundabmessungen wie die Verdampferrohre auf und sind auch aus dem gleichen Werkstoff hergestellt. Sie sind als gerade Fallrohre innerhalb des Verdrängerkörpers verlegt.

Fallrohre, Verdampferrohre und Verdrängerkörper sind an einer Tragplatte aufgehängt. Oberhalb der Tragplatte sind der torusförmige Speisewasser-Verteiler und er zylindrische Heißdampf-Sammler angeordnet, siehe Abb. 15. Mit dieser Tragplatte kann der gesamte Wasser-Dampf-Druckkörper in den Druckbehälter ein- und ausgebaut werden.

Das heiße Helium tritt seitlich radial in den Dampferzeuger unterhalb der Tragplatte und oberhalb des Helissenbereiches ein. Die Heißdampfrohre verlaufen hier als gerade, senkrechte Rohre und sind dem heißen He-Strom ausgesetzt. Die Kaltwasserrohre sind in diesem Bereich als Dehnwendeln ausgebildet und durch einen Stahlblechzylinder gegen eine direkte He-Anströmung geschützt.

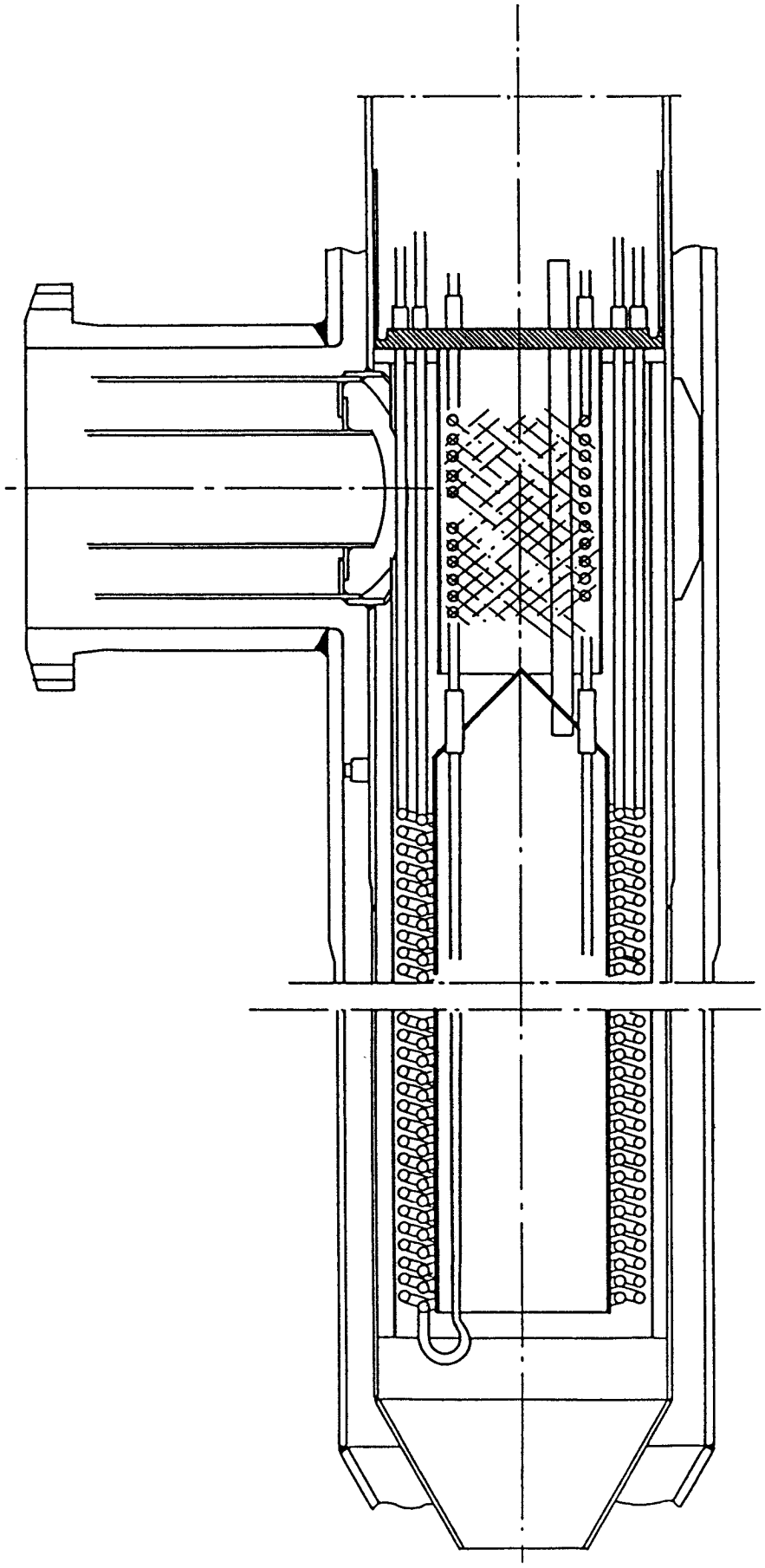


Abb. 14: Längsschnitt durch den heliumbeheizten Dampferzeuger

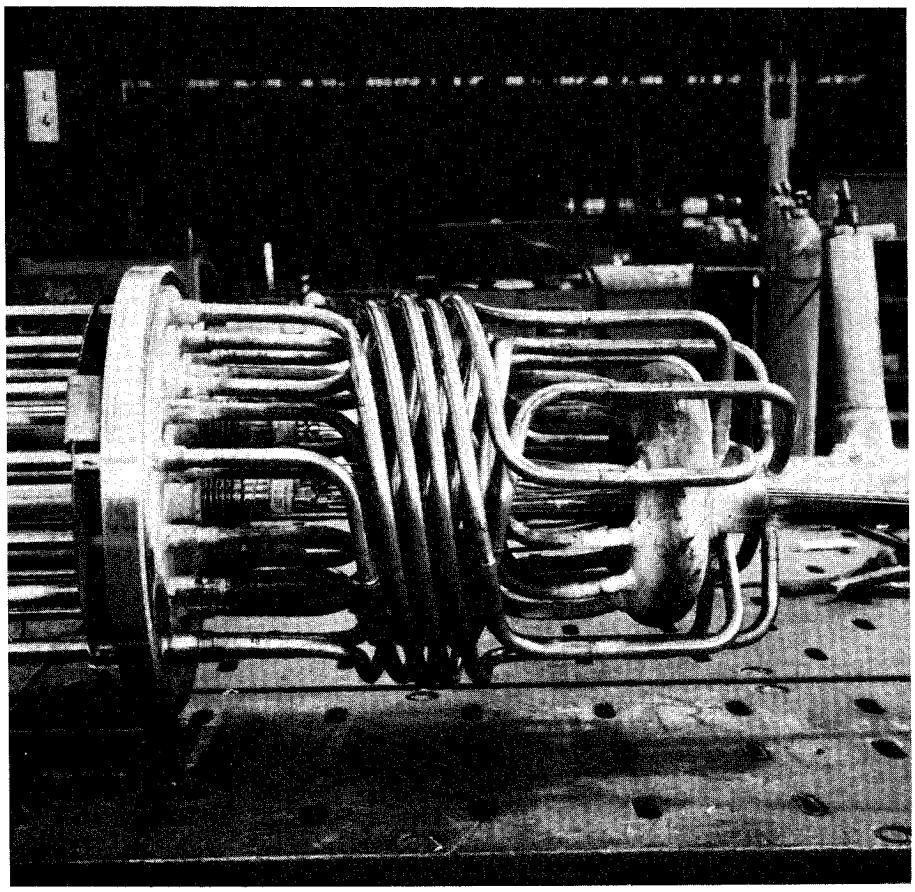


Abb. 15: Speisewasserverteilung und Heißdampfsammler des heliumbeheizten Dampferzeugers

Im Helissenbereich ist für das Helium durch den zentralen Verdrängerkörper und durch einen außenliegenden konzentrischen metallischen Liner ein ringspaltförmiger Strömungskanal gebildet. Hier strömt das heiße Helium abwärts im Kreuz-Gegenstrom zum verdampfenden Wasser. Auf diesen Liner ist außen eine Wärmeisolierung aus Al_2O_3-Matten aufgebracht, die durch einen weiteren äußeren Liner abgeschlossen wird. Zwischen diesem und der Druckbehälterwand strömt das kalte Helium wieder, vom Umwälz-Gebläse kommend, zum He-Erhitzer zurück. Damit ist auch in diesem Dampferzeuger das Koaxial-Prinzip verwirklicht.

Betriebsweise des Dampferzeugers

Während des Normalbetriebes wird dem Dampferzeuger eine vorgewählte Wassermenge angeboten, die so bemessen ist, daß die zur Verfügung stehende Dampfmenge um mindestens 5% höher ist, als es der Methanreformierungsprozeß erfoıdert. Der Überschußdampf wird bei konstant gehaltenem Dampfdruck abgeregelt und zu Heizzwecken genutzt. Die Regelung der aufgenommenen Heizleistung wird über die sich einstellende Heißdampftemperatur bewerkstelligt, die im Extremfall die Temperatur des Wärmeträgers Helium annehmen kann und so die Leistungsaufnahme begrenzt. Die Austrittstemperatur des Heliums stellt sich entsprechend der Leistungsaufnahme des Dampferzeugers frei ein, oder kann durch Produktion von Überschußdampf konstant gehalten werden.

Die Wasser- und Dampfrohre sind so ausgelegt, daß beim NFE-Betrieb unter Vollast die Speisewasserzuführungen sowie die ersten Wendeln der Verdampferrohre als interner Speisewasservorwärmer arbeiten. Die anschließende Siedezone liegt etwa im unteren Drittel der Wendeln, die restlichen zwei Drittel der Wendeln dienen zur Überhitzung des Dampfes.

Vom Hersteller des Dampferzeugers war empfohlen worden, den Wasserdampfdruckkörper überflutet anzufahren und dann mit einer Speiseleistung von 3 t/h ständig zu durchströmen, bis

bei dieser Speiseleistung der Verdampfungsprozeß einsetzt. Dieses Vorgehen erschien insofern erforderlich, da infolge fehlenden Fremddampfes beim Anfahrvorgang eine externe Speisewasservorwärmung nicht möglich ist und nur so die Beaufschlagung der heißen Siederohre mit kaltem Wasser vermieden werden kann. Diese Empfehlung erwies sich aufgrund des Betriebsverhaltens der Gesamtanlage als nicht durchführbar und kam daher nicht zur Anwendung.

Dagegen zeigte sich ein Anfahrvorgang als geeignet, bei dem der Dampferzeuger trocken bis auf etwa 230 ^{o}C gefahren und dann bei einer Speiseleistung von ca. 1,5 t/h mit kaltem Wasser beaufschlagt wird, bis sich Vorwärmung und Entgasung auf die üblichen Betriebstemperaturen eingestellt haben. Darauf wird die Speiseleistung auf 3 t/h gesteigert, um die gleichmäßige Durchströmung aller elf parallel geschalteten Siederohre zu gewährleisten.

Betriebserfahrungen, Störungen

Während des Erprobungsbetriebes der Anlage, von Dezember 79 bis Dezember 81, traten zwei Störfälle ein, die durch Lekkagen an den Siederohren im oberen Bereich der Speisewasserzuführung des Dampferzeugerrohrbündels verursacht wurden.

Im ersten Fall (Juni 1980) zeigten sich nach insgesamt 1133 Betriebsstunden bei 10 der tragenden Speisewasserrohre mehr oder weniger starke Deformationen, die offensichtlich durch aufgetretene Wärmespannungen hervorgerufen worden waren. Bei dem 11. nicht durchgebogenen Rohr war durch einen Gewaltbruch im Bereich einer Schweißnahtzone - etwas oberhalb der Tragplatte - ein Riß entstanden. Durch diesen Riß konnten unter den herrschenden Betriebsbedingungen innerhalb kürzester Zeit annähernd 3 m^{3} Kondensat in das Schmierölsystem des He-Gebläses austreten, ehe die Anlage über Notabschaltung stillgelegt wurde. Dieser Störfall war nach Auswertung der Schadensanalyse weitestgehend auf die Nichterfüllbarkeit der vom Dampferzeuger-Hersteller empfohlenen Betriebsweise des Anfahrvorganges zurückzuführen.

Durch eine konstruktive Änderung der Speisewasserführung wurde daraufhin das Rohrbündel des Dampferzeugers ertüchtigt. Zur Vermeidung unzulässiger Rohrspannungen wurden die geraden Verbindungsrohre der Speisewasserzuführung zwischen Rohrplatte und Verdrängungskörper durch eine mehrgängige einlagige Dehnhelisse aus 11 Rohren ersetzt. Dieser Umbau sollte vor allem günstigere Voraussetzungen für den anlagenbedingten trockenen Anfahrbetrieb mit nachfolgendem geringeren Seisewasserdruchfluß schaffen. Unberücksichtigt blieb dabei, daß auch bei dieser Ausführung nach wie vor die Speisewasserzuführung mit der niedrigsten Rohrtemperatur im Bereich der höchsten Temperatur des in den Dampferzeuger eintretenden Heliums lag.

Nach erfolgtem Umbau wurden im 1. Halbjahr 1981 zwei weitere Erprobungsläufe der Anlage gefahren, wobei der Dampferzeuger bei folgenden Temperaturen betrieben wurde:

He-Eintritt	von 560 - 650 °C
He-Austritt	bis 350 bzw. 390 °C
Speisewassereintritt	von 175 - 240 °C
Dampfaustritt	bis 340 bzw. 400 °C

Die anhaltend hohe Feuchtigkeit im Heliumsystem, die zunächst noch auf den 1. Störfall zurückgeführt wurde, veranlaßte zu dem Versuch, durch wiederholten Druckwechsel zwischen 6 und 12 bar die Wasserfreisetzung in der Ausmauerung und damit die Abscheidungsraten in der He-Reinigung zu erhöhen. Dieses Vorhaben brachte jedoch nicht den gewünschten Erfolg, dagegen ergab die Anhebung des Speisewasserdruckes um wenige bar über den Heliumdruck eindeutige Hinweise auf eine erneute Leckage im Dampferzeugerrohrbündel.

Nach Ziehen des Rohrbündels zeigten sich bei einer Wasserdruckprobe mehrere Leckagen im Bereich der neu eingezogenen Dehnhelisse der Speisewasserzuführung. Oberflächenrißprüfungen der gesamten Helisse identifizierten mehrere Haarrisse auf der gekrümmten Innenseite zweier übereinanderliegender Rohre,

die sich im unmittelbaren Eintrittsbereich des heißen Heliumstromes befanden. Die beiden defekten Rohrstücke wurden herausgeschnitten und durch gleiches Rohrmaterial aus INCOLOY 800H ersetzt.

Weiterhin wurde zur Vermeidung der hohen Belastung durch Wärmespannungen die gesamte Dehnhelisse noch mit einer einseitig umschließenden Blechschürze aus dem gleichen hochlegierten Material umgeben.

Die durchgeführten metallographischen Untersuchungen an den defekten Rohrstücken wiesen auf das Vorliegen einer von der Rohrinnenseite ausgehenden transkristallinen Spannungsrißkorrosion hin. Da eine zunächst angenommene mediumspezifische Auslösung dieser Spannungsrißkorrosion sich bei entsprechenden Laborversuchen an Rohrteilen der gleichen Material- und Fertigungscharge nicht nachvollziehen ließ, wurde als wahrscheinlichere Ursache doch die Überbeanspruchung der Streckgrenze des Werkstoffes bei An- und Abfahrvorgängen ohne gleichzeitige Speisewasserzuführung angesehen.

Nach zweiwöchigem strömungsfreien Betrieb des ausgebesserten Rohrbündels wurde es erneut gezogen und die Dehnhelisse einer sehr eingehenden zerstörungsfreien Überprüfung auf weitere Schadstellen in den Rohrwandungen unterzogen. Diese Nachuntersuchungen umfaßten sehr umfangreiche Ultraschall-, Rißtiefen-, MET-L-CHeck- und Röntgenprüfungen. Dabei konnten im definierten Eintrittsbereich des heißen He-Stromes weitere, wasserseitige Anrißstellen an einigen Rohren mit Rißtiefen zwischen 300 und 700 µm festgestellt werden. Auf eine Nachbesserung dieser Rohrabschnitte wurde zunächst verzichtet, da kurzfristig nicht genügen neues Rohrmaterial zur Verfügung stand und zum anderen die max. georteten Rißtiefen nur bei 1/3 der vorhandenen Wandstärken lagen. Außerdem hatte sich der um die Dehnhelisse gezogene Liner als äußerst günstig für die Temperaturverteilung erwiesen.

Im Verlaufe des weiteren Erprobungsbetriebes unter Auslegungsbedingungen kam es im Dezember 1981 zweimal durch Fehlbedienung zu plötzlichen Druckanstiegen, die um 12 bzw. 10 bar über dem Arbeitsdruck lagen und im ersten Fall sogar zum Ansprechen der Sicherheitsventile führten. Beide Vorgänge führten nicht zum Auftreten erneuter Durchrisse an den vorgeschädigten Rohrteilen.

Da sich in den nachfolgenden Fahrperioden unter Versuchsbedingungen der Dampferzeuger in einwandfreier Funktion zeigte, wurde auf die vorgesehene weitere Ertüchtigung des Rohrbündels durch Einbau einer neuen Dehnhelisse der Speisewasserzuführung verzichtet.

4.2.5 Die Koax-Leitung

Wie bereits weiter oben beschrieben, sind die 3 Hauptkomponenten des He-Kreislaufs in jeweils einem separaten Druckbehälter untergebracht. Sie sind miteinander durch koaxiale He-Führungen verbunden, siehe Abb. 1 und Abb. 4. Prinzipiell sind beide Leitungen gleich aufgebaut. Damit Erfahrungen über das Betriebsverhalten gesammelt werden können, wurde die hochbeanspruchte Verbindungsleitung zwischen dem He-Erhitzer E102 und dem Röhrenspaltofen D101 etwa 5 m lang ausgebildet. Für Inspektions- und Instrumentierungszwecke ist davon eine Länge von 4 m demontierbar. Im folgenden soll hier nur diese längere Leitung beschrieben werden.

Die Koax-Leitung ist waagerecht angeordnet. Die Rohrachse verläuft genau in der Ebene der Auflagen von He-Erhitzer und RSO. Das Druckrohr der Koax-Leitung muß die durch Temperaturveränderungen entstehenden Kräfte zum Verschieben des He-Erhitzers übertragen.

Das vom elektrischen Erhitzer aufgeheizte Helium - im Auslegungsfall mit 960 ^{o}C - strömt im zentralen Kanal zum RSO. Dieser wird durch einen metallischen Liner gebildet,

Innendurchmesser	233 mm
Wandstärke	6 mm
Werkstoff	1.4878

Dieser innere Liner ist aus Teillängen zu je 955 mm zusammengesetzt. Ein Ende eines jeden Teilstückes kann man bei Längenänderungen schieben.

Das abgekühlte Helium strömt in einem Ringspalt vom RSO zurück zum He-Erhitzer. Dieser wird gebildet durch das Druckrohr (äußere Begrenzung), das als dichtes Rohr die beiden Heliumströme trennt.

Herstellungsdaten:

Druckrohr -

Außendurchmesser	690	mm
Wandstärke	20	mm
Werkstoff	13 CrMo 44	
Betriebstemperatur	500	°C
Betriebsdruck	45	bar

kaltes Linerrohr -

Außendurchmesser	516	mm
Wandstärke	8	mm
Werkstoff	13 CrMo 44	

Längenänderungen des kalten Linerrohres werden durch einen eingeschweißten Metall-Faltenbalg-Kompensator aufgenommen.

Zur Unterdrückung eines intensiven Wärmeaustausches zwischen heißem und kaltem He-Strom ist zwischen den beiden Linern eine Wärmeisolierung eingebaut. Diese besteht aus einer Kohlenstoffsteinschicht. Dies sind halbzylindrische Schalen, die zu Rohrkörpern zusammengesetzt sind.

Abmessungen:

Außendurchmesser	485	mm
Innendurchmesser	271	mm
Teil-Länge	960	mm
Werkstoff	Kohlenstoffstein MDN 4020 der Fa. Sigri	

Die Halbschalenbauweise wurde gewählt, um einer Rißbildung aufgrund von Temperaturspannungen vorzubeugen.

In Abb. 16 ist der Querschnitt der koaxialen Heliumleitung abgebildet.

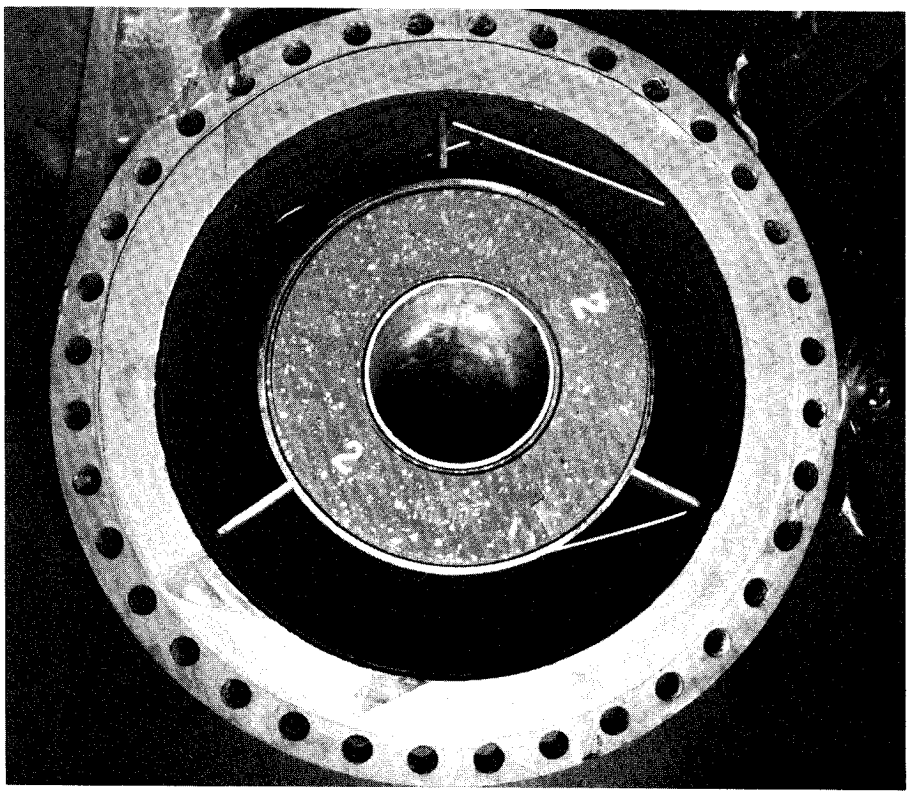


Abb. 16: Querschnitt durch die koaxiale Heliumleitung

4.2.6 Das Helium-Gebläse

Die Umwälzung des Heliums in dem geschlossenen Hauptkreislauf erfolgt durch das einstufige Radial-Gebläse G101. Es ist in vertikaler Betriebsanordnung durch eine Flanschverbindung von unten mit dem Druckbehälter des Dampferzeugers verbunden. Saug- und Druckleitung sind in koaxialer Anordnung mit innenliegender Saugleitung ausgeführt. Der Druckbehälter des Dampferzeugers, das Druckrohr und das Gebläsegehäuse bilden damit eine druckfeste Einheit.

Der Gebläseantrieb erfolgt durch die direkt gekuppelte, drehzahlregelbare Ölturbine radialer Bauart. Drei unabhängige Hochdruck-Kraftölpumpengruppen erzeugen den erforderlichen Kraftöldruck zur Energieumsetzung in der Turbine.

Die Verwendung des Gebläses in einem geschlossenen Hochtemperatur-Heliumkreislauf mit direktem vertikalen Anschluß der Maschine an den Dampferzeuger E101 bestimmen den Gehäuseaufbau als Topfbauart in einstufiger Ausführung. Hierdurch lassen sich die Forderungen bezüglich spezifischer Helium-Leckraten und verzugsfreiem Verhalten der mit hohem Druck und Temperatur beaufschlagten Bauteile zuverlässig erfüllen.

Der Gebläseläufer wird von einem zweiteiligen Lagergehäuse aufgenommen. Das Radial-laufrad ist fliegend angeordnet und wird mit der Welle durch den zentralen Zuganker zusammengebaut sowie durch die Stirnverzahnung form- und kraftschlüssig zentriert. Das Laufrad ist im Feingußverfahren auf Nickelbasis hergestellt, für die Welle wird warmfester Vergütungsstahl verwendet. Aus dem Laufrad tritt das Helium mit erheblicher Geschwindigkeit in den geschaufelten Scheibendiffusor ein.

Die Übertragung der Turbinenleistung übernimmt die mit der Gebläsewelle verschraubte Kupplungswelle, die außerdem für den Axialschubausgleich des Gebläselaufrades durch einen mit Öldruck beaufschlagten Ausgleichskolben sorgt. Druckölverluste werden mit einer Schwimmringdichtung begrenzt, weitere Labyrinthdichtungen vermeiden den Austritt von Lecköl in die Atmosphäre. Die Welle trägt im Bereich zwischen dem Radiallaufrad und dem Traglager die routierenden Teile der Stillstandsdichtung, Gleitringdichtung und den Dichtungsbereich der Hochdruck-Schwimmringdichtung sowie die Sperr-Helium-Labyrinthe. Die zugehörigen statischen Bauteile sind im Gebläsegehäuse untergebracht. Die erforderlichen Versorgungs- und Meßbohrungen der Dichtungs- und Sperrsysteme befinden sich ebenfalls in diesem Gehäuse.

Ein Schmierölsystem dient zur Versorgung des Traglagers und des Trag-Drucklagers des Läufers mit Öl. Ein gesondertes Sperrölsystem hat die Aufgabe, Gleitringdichtung, Schwimmringdichtung und Ausgleichskolben mit Öl zu versorgen. Diese Versorgung ist im Gegensatz zum Schmierölsystem von dem jeweiligen Verfahrensdruck im Gebläse abhängig.

Sämtliche Sicherheitsschaltungen, das heißt Verriegelungen, Zuschaltung von Hilfsaggregaten, Schnellabschaltungen des Gebläses sowie Alarmierungen sind für das gesamte System nach dem Ruhestromprinzip ausgeführt.

Zur Helium-Mengenmessung ist die Saugleitung zusätzlich mit einer Meßdüse bestückt, deren Impulsleitungen zum Abgriff der Meßwerte durch den Druckbehälter des Dampferzeugers nach außen verlegt sind. Die Düse besteht aus rost- und säurebeständigem Stahl. Die Eichung der Düse wurde während des thermodynamischen Probelaufes mit Luft und einer normgerechten Meßblende in mehreren Betriebspunkten vorgenommen.

4.3 Die Anlage zur Methanisierung

4.3.1 Erster Methanisierungsreaktor D201

Ähnlich den Konstruktionsprinzipien im Heliumteil wird bei diesem Reaktor das heiße, unter Druck stehende Gas (650 °C, 40 bar) nach Möglichkeit von den Druckgefäßwandungen ferngehalten, um preiswerte, herkömmliche Werkstoffe des chemischen Apparatebaus einsetzen zu können.

Der Reaktor besitzt einen inneren "Korb", in dem der Katalysator gelagert ist. Das mit etwa 280 °C eintretende Mischgas wird zunächst zwischen dem isolierten Korb und Behälterwand nach oben geführt, so daß die Wand gekühlt wird. Das Gas heizt sich durch unvermeidlichen Wärmeaustausch auf etwa 300 °C auf und tritt mit dieser Temperatur in den Katalysator ein. Es reagiert bis auf 650 °C und tritt mit dieser Temperatur aus dem "Korb" aus. Hier lassen sich Spezialwerkstoffe nicht vermeiden, und das Gas wird durch hochwarmfeste Leitungen

(Incoloy 800) zum Austrittsflansch geführt und in ebensolchen Leitungen bis zum nächsten Apparat, dem Abhitzekessel E201, geleitet.

Reaktorgeometrien:

Gesamthöhe:	7.921	mm
Druckbehälterhöhe:	5.689	mm
Ø Druckbehälter:	900	mm
Ø Katalysatorkorb innen	750	mm

Die Katalysatorfüllhöhe beträgt vor dem Reduzieren ca. 4.400 mm, d.h. die Katalysatoroberfläche ist ca. 120 mm unterhalb der Oberkante des Innenliners.

Katalysatorbezeichnung	Topsøe-HT-Methanisierungs-katalysator MCR-2x	
Menge	ca. 1,9	m^3
Form	4,2 x 4,2	mm
Schüttgewicht	ca. 1.400	kg/m^3

4.3.2 Zweiter Methanisierungsreaktor D202

Dieser Reaktor ist als einfacher Schachtreaktor ausgebildet. Das Gas durchströmt den Katalysator von oben nach unten, es kann also nicht zum Verwirbeln des Katalysators kommen. Die Austrittstemperatur von max. 510 °C erlaubte, diesen Reaktor noch in normalem warfesten STahl (13 CrMo 44) auszuführen.

Reaktorgeometrien:

Gesamthöhe:	5.240	mm
Druckbehälterhöhe:	3.595	mm
Rohrdurchmesser:	508 x 22	mm

Die Katalysatorhöhe beträgt vor dem Reduzieren ca. 3.000 mm, d.h. die Katalysatoroberfläche ist ca. 50 mm unterhalb der Oberkante des Mantelflansches M1.

Katalysatorbezeichnung	BASF	G1-85	
Menge		0,95	m^3
Form		5 x 5	mm
Schüttgewicht	ca.	1.000	kg/m^3

4.3.3 Gegenstromkühlreaktor D203

Die Funktionsweise dieses Reaktors ist ausführlich in Kapitel 3.3.1 erläutert. Der Reaktor kann auch über einen Bypass als adiabater Reaktor gefahren werden.

Reaktorgeometrien:

Gesamthöhe:	8.308	mm
Druckbehälterhöhe:	5.145	mm
Durchmesser:	50 x 16	mm
Anzahl der Vorwärmrohre:	16	
Durchmesser der Vorwärmrohre:	60,3x2,9	mm
Durchmesser der Verdrängerkörper in den Vorwärmrohren (zentriert durch Abstandhalter):	48,3	mm
durchströmte Länge der Vorwärmrohre:	4.600	mm

Die Katalysatorhöhe beträgt vor dem Reduzieren ca. 3.700 mm, d. h. die Katalysatoroberfläche ist ca. 1.100 mm unterhalb der Oberkante der Mantelflanschen M1.

Katalysatorbezeichnung	BASF	G1-85	
Menge		0,95	m^3
Form		5 x 5	mm
Schüttgewicht	ca.	1.100	kg/m^3

4.3.4 Der Recyclekompressor

Um den Temperaturanstieg bei der Methanisierung zu begrenzen, wird das Frischgas mit Hilfe einer Gasrückführung (Recycling) verdünnt. Der Recyclekompressor saugt einen Teil des Zwischenproduktgases (T = 280 ^{o}C) hinter der ersten Methanisierungsstufe an und drückt es in den Frischgaskreislauf vor dem ersten Methanisierungsreaktor. Die Drehzahl und die Fördermenge ist regelbar. Die Druckerhöhung wird den geforderten Betriebsverhältnissen angepaßt.

Der Kompressor des Typs Sundyne Compressor LMC-311F ist ein heißlaufender Turboverdichter, bei dem das Sperrsystem als Gleitringdichtung ausgeführt ist. Die max. Leistung ist 160 kW bei einer Drehzahl von max. 21.800 U/min. und max. ΔP = 3,5 bar.

Eine schematische Darstellung ist in Abb. 17 gegeben. Insgesamt erwies sich der Kompressor beim Betrieb leider als sehr störanfällig.

4.4 Heliumreinigung, Einheit 300

Der zu reinigende Heliumstrom von 1300 m^3_N/h wird mit 40 bar und 360 °C über ein ferngesteuertes Mengen-Handstell-Ventil der Reinigungsanlage zugeführt. Das Helium wird in einem Wärmetauscher durch das gereinigte zurückströmende, kalte Helium auf ca. 220 °C abgekühlt. Diese Temperatur wird überwacht, damit die Kupferoxydfüllung des nachgeschalteten Reaktors durch die exotherme Oxydationsreaktion von CO und H_2 zu CO_2 und H_2O nicht unzulässig überhitzt wird. Das Helium durchströmt nach einem Staubfilter den Kufperoxyd-Reaktor; dort werden H_2 und CO-Verunreinigungen mit Sauerstoff zu Wasser und Kohlendioxyd bei einer Arbeitstemperatur von ca. 220 °C katalytisch umgesetzt. Der zur Umsetzung erforderliche Sauerstoff wird über ein ferngesteuertes Stellventil dem Heliumstrom kontinuierlich zugemischt. Anschließend wird der Heliumstrom auf ca. 25 °C abgekühlt und das evtl. anfallende Kondensat abgeschieden.
Zur groben Vortrocknung durchströmt das Helium einen Silicagel-Filter und anschließend die hintereinander geschalteten Molekularsieb-Absorber, worin die restliche Feutigkeit und Kohlendioxyd über dem Molekularsiebtyp T-144 adsorptiv entfernt wird.
Der kalte und gereinigte Heliumstrom wird im Gegenstrom zu verunreinigten Helium wieder auf ca. 330 °C aufgeheizt und auf der Saugseite des Heliumgebläses G101 mit einem Absolutdruck von etwa 39 bar dem Helium-Hauptkreis zugeführt.

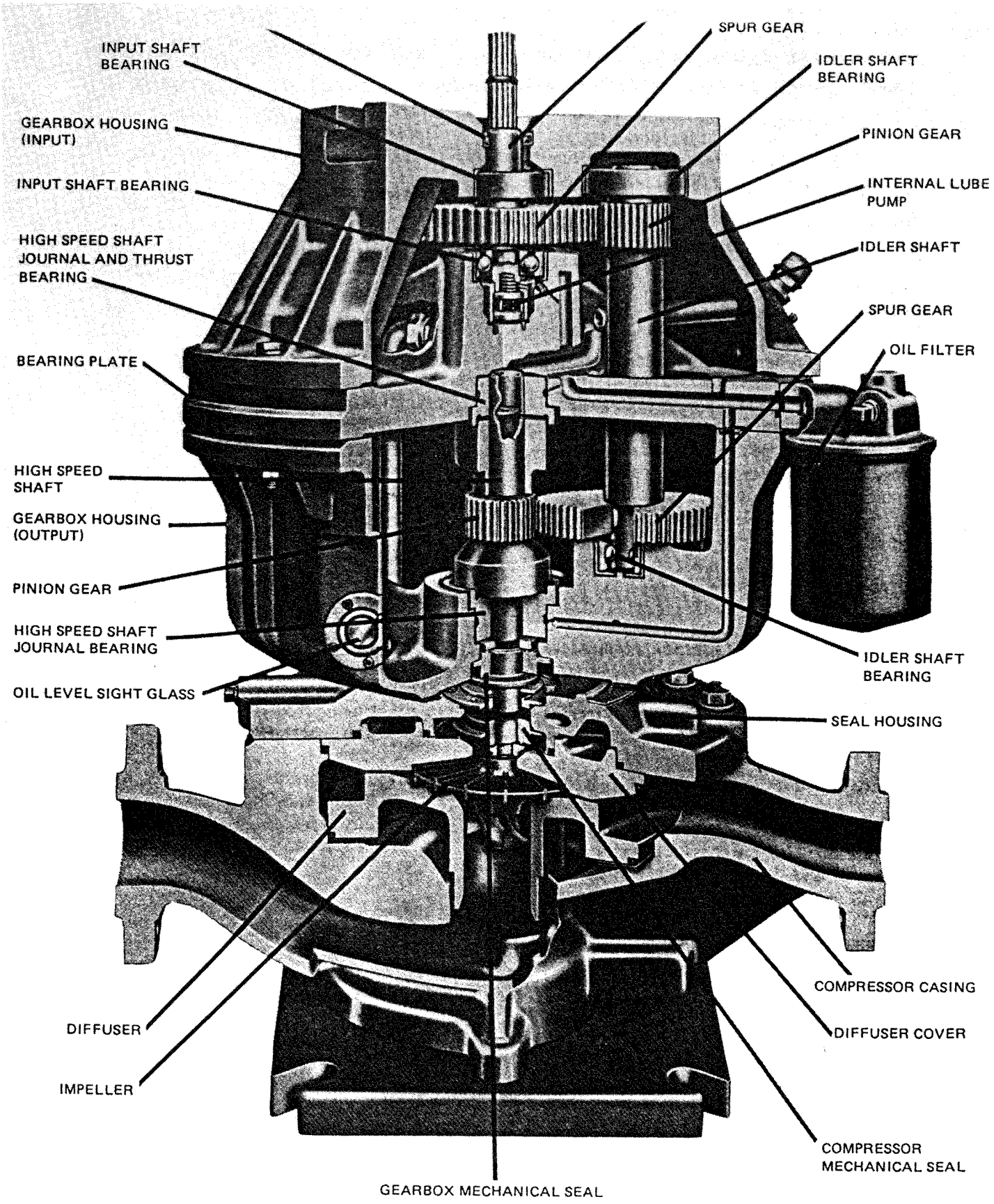


Abb. 17: Schnittdarstellung des Recycle-Gebläses der Methanisierungsanlage

Die He-Reinigung ist für einen Durchsatz von 1300 m^3_N/h ausgelegt. Durch Einbau einer verstellbaren Drossel im Unterteil des Spaltreaktors wurde die Auslegungsbedingung der He-Reinigung dahingehend erweitert, daß nunmehr allgemein etwa 2% der im He-Hauptkreislauf umgewälzten Menge gleichzeitig durch die Heliumreinigung geschickt werden kann.

Feste Verunreinigungen wie Staub und Rost werden dem umgewälzten Helium in Eingangs- und Ausgangsfiltern entnommen.

4.5 Heliumversorgung Einheit 400

Die Anlage ist vorgesehen, um den ständigen Bedarf an Helium, hauptsächlich verursacht durch Leckverluste, zwischenzuspeichern, außerdem dient sie als Heliumlager für den Fall, daß eine erforderliche Reparatur oder eine Änderung eines Helium-führenden Anlagenteiles durchgeführt werden soll.

Die Anlage ist für folgende Betriebsdaten ausgelegt:

Gesamtfassungsvermögen:	ca. 2.850 m^3_N He
max. He-Temperatur:	40 °C
max. Betriebsdruck:	170 bar
max. Fülldruck, um Temperatureinwirkungen auf das im Freien abgestellte Lager zu kompensieren:	160 bar

Das Helium wird üblicherweise flüssig angeliefert. Durch Druckaufbau in den Anlieferungskannen wird es flüssig einem kleinen Edelstahlwärmetauscher zugeführt, in welchem das Helium durch Energieaufnahme aus der Umgebungsluft verdampft wird. Das gasförmige Helium wird vor der Gasblase eingespeist und von den Heliumkompressoren verdichtet und in die Hochdruckspeicherflaschen gedrückt.

Das Helium wird in dem Hochdruckspeicher, bestehend aus drei Druckbehältern mit je 5 m^3 Rauminhalt und einem Druckbehälter mit 1,9 m^3 Rauminhalt gelagert.

Der Speicher ist im Freien liegend aufgestellt. Im Betrieb strömt das Helium aus dem Hochdruckspeicher über eine Reduzierstation dem Heliumkreislauf zu.

Das Helium-Vorratslager kann etwa das 1,5-fache des Inventars des Helium-Kreislaufes der Anlage, einschließlich der Heliumreinigung aufnehmen.

Die beiden Heliumkompressoren, welche Helium von Atmosphärendruck auf max. zulässigen Druck in den Heliumflaschen von 160 bar verdichten können, haben eine Förderkapazität von je etwa 60 m^3_N/h.

4.6 Instumentenluftanlage Einheit 500

Atmosphärische Luft wird über ein Ansaugfilter durch einen zweistufigen Trockenlauf-Kolbenverdichter angesaugt und auf ca. 12 bar Überdruck ölfrei verdichtet.

Die Kompressionswärme wird durch Zwischenkühler und Nachkühler abgeführt. Ein Großteil der in derAnsaugluft enthaltenen Feuchtigkeit wird nach der ersten und zweiten Kompressionsstufe in den Abscheidern ausgeschieden und als Kondensat abgeleitet. Die Luft gelangt dann in den Vorratsbehälter.

Über einen Vorfilter gelangt die Luft in die Lufttrocknungsanlage, die nach dem "Heatles-Verfahren", d.h. ohne Zufuhr von Wärme, arbeitet.

Die Anlage besteht im wesentlichen aus den zwei Adsorbern, den Umschalt- und Steuerventilen und dem Programmschaltwerk.

Die Adsorber sind mit dem Adsorptionsmittel, vorzugsweise Aluminium-Gel, gefüllt. Die Luft durchströmt einen Adsorber und wird getrocknet, indem das Adsorptionsmittel der Luft die Feuchtigkeit entzieht. Ein kleiner Teilstrom der getrockneten Luft wird entspannt und durch den zweiten Adsorber geleitet. Hierbei wird dem Adsorptionsmittel die Feuchtigkeit entzogen (d.h. regeneriert), und diese Luft entweicht feuchtigkeitsbeladen in die Atmosphäre.

Der gespeicherte Instrumentenluftvorrat reicht für einen 15- bis 20-minütigen Betrieb der Anlage, bevor eine zwangsweise Abschaltung der Gesamtanlage erfolgt. Die von den Instrumentenluftverdichtern geförderte Luft wird bei 12 bis 15 bar Überdruck gespeichert und mit max. 5 bar Überdruck nach Trocknung in der früher beschriebenen "Heatles"-Anlage im Netz verfügbar gemacht. Der Wasserdampftaupunkt der Instrumentenlust liegt unter -20 ^{o}C.

4.7 Speisewasserversorgung Einheit 600

Für den kontinuierlichen Betrieb der Spaltanlage wird aus einem 50 m^3 fassenden Deionatvorratsbehälter eine Speisewassermenge von ca. 1 m^3/h entnommen (Deckung von Verlusten). Die Beschickung des Vorratsbehälters mit voll entsalztem Wasser entsprechender Reinheit erfolgt aus dem KFA-eigenen Versorgungssystem.

Die Qualität des Speisewassers entspricht in seinen Analysenwerten den Richtlinien der Kessel- und Speisewasservorschriften für Zwangsdurchlaufkessel bis 65 bar des VdTÜV und der VGB.

Die anfallenden Prozeßkondensate aus Spalt- und Methanisierungsanlage werden gemeinsam entgast und anschließend über einen Kerzenfilter (3µm Feinheit) von eventuell aus den Kreisläufen mitgeführten Feststoffverunreinigungen mechanisch gereinigt. Für eine Nachentsalzung der in den Kreislauf zurückführenden Kondensatmengen, in denen sich besonders in der Anfahrphase gelöste Verunreinigungen langsam anreichern können, ist ein Mischbettfilter zwischengeschaltet. Nach Passieren des Mischbettfilters wird im Kondensat eine Restleitfähigkeit erreicht, die den oben angeführten Richtlinien entspricht.

Ferner ist die Speisewasser-Versorgungseinheit mit einem Ansetzbehälter ausgerüstet, worin das Alkalisierungsmittel "Hydrazin" oder "Levoxin" mit Deionat im Verhältnis 1:10 oder 1:15 angesetzt wird und dem Speisewasser auf der (Saug- oder) Druckseite der Speisewasserpumpe G104 zugemischt wird, um den Sauerstoffrestgehalt im Speisewasser chemisch zu binden und damit dem

Dampferzeuger E101 ein Speisewasser zuzuführen, wie es den Vorschriften des VGB für Zwangsdurchlaufkessel entspricht.

4.8 Methanversorgung Einheit 700

Zur Deckung des Methanbedarfs während der Anfahrphase sowie der Methanverluste im Normalbetrieb, wie sie durch Leckagen und durch Löslichkeit im Gaskondensat unvermeidbar sind, ist die NFE-Versuchsanlage mit einer Methanversorgungseinheit ausgestattet. Flüssiges Methan wird von außerhalb angeliefert und in einem Behälter (ca. 12.000 l Flüssigmethan) gelagert. Für den Betrieb wird dieses flüssige Methan entnommen und über einen Luftverdampfer in die Einheit 100 eingespeist.

Der Luftverdampfer ist für eine maximale Abnahme von ca. 500 m^3_N/h CH_4 bei einem Abgabedruck von 18 bar ausgelegt.

Zur Erzielung höherer Drücke als 18 bar in der Spaltanlage/ Methanisierung wird das verdampfte Methan mit ca. 18 bar von einem Verdichter in einen Methanpufferbehälter gefördert und dort bei einem Druck von ca. 60 bar gespeichert.

4.9 Notstromaggregat, Stickstoffversorgung, CO_2-Versorgung Einheit 800

In "Einheit 800" wurden alle sonstigen Betriebsmittelversorgungen (also Kühlwassernetze, Abwassernetze, Gasnetze, Unterfeuerungserdgas) zusammengefaßt.
Zur Einheit 800 wird auch das Notstrom-Dieselaggregat gezählt. Dieses wird durch eine eigene elektrische Heizung des Kühlwassers ständig in Betriebsbereitschaft gehalten, so daß es bei Ausfall der 380 V-Elektronetzversorgung sofort anspringen kann. Die elektrische Leistung des Notstromaggregates beläuft sich auf 240 kVA, sein direkt gekoppelter Dieselmotor erzeugt 144 kW.

Das Notstromaggregat ist nach einer Hochlauf- und Sicherheitszeit von etwa 10 Sekunden voll belastbar, zu welchem Zeitpunkt nach einem Spannungsausfall der 380 V-Versorgung automatisch die Umschaltung der Netzschiene, welche die bevorrechtigten Verbraucher versorgt, vorgenommen wird. Das Notstromaggregat übernimmt im wesentlichen die elektrische Versorgung wichtiger Kleinverbraucher wie Batterieladegarät für die Regelungstechnik und Schmierölpumpen, Sperröl- und Sperrwasserpumpen etc., welche im Sinne der Schadensabwendung von empfindlichen Ausrüstungen kontinuierlich betrieben werden sollten.

Zur Inertisierung von Leitungen, Behältern und ganzen Anlagenteilen wird üblicherweise Stickstoff verwendet. Dieser wird ganz analog dem Kaltvergaser der Methanversorgung in einem Kaltvergaser für Stickstoff gespeichert. Hinsichtlich der Ventilbezeichnungen, der Anordnung der Ventile am Behälter und deren Funktion ist der Aufbau identisch mit dem des Flüssig-Methan-Speichers und seiner Nebenaggregate. Das zuvor für Einheit 700 dargelegte gilt also auch hier. Unterschiedlich ist nur, daß es kein Stickstoff-Hochdruck-Netz gibt. Stickstoff kann daher nur in das Hauptsystem oder andere Anlagenteile eingespeist werden, sofern dort ein Druck von weniger als 16 bar, evtl. nach vorhergehender Entspannung, herrscht. Auch der Flüssig-CO_2-Lagertank wird Einheit 800 zugerechnet, welche rein örtlich betrachtet keine Einheit bildet. Der Druck in diesem Lagerbehälter variiert je nach Temperatur der Umgebungsluft zwischen ca. 25 bar und ca. 60 bar Überdruck. Entnommen wird das CO_2 in dieser Anlage stets aus dem Gasraum, wobei, da die Einspeisung quasi drucklos erfolgt, nur Drosselung erforderlich ist. Das größte Problem stellt dabei dar, die Drosselstellen bzw. die diesen nachgeschalteten Strecken von festen CO_2-Ansätzen infolge der starken, bei der Entspannung auftretenden Unterkühlung freizuhalten.

4.10 Gasfackel

Das im Prozeß anfallende Fackelgas wird über eine Wassertauchung dem Fackelbrenner zugeführt. Die Tauchung wird durch einen geregelten Rohwasserzulauf sichergestellt. Die Wassertauchung garantiert, daß nur Gas mit einem Druck, der mindestens dem Gegendruck der Tauchung entspricht, zum Fackelbrenner gelangt.

Die Zündung des Fackelgases erfolgt über drei Pilotbrenner, welche wiederum - erdgasgespeist - von einer Zündtafel gezündet werden. An der Zündtafel wird aus Erdgas und Meßluft ein zündfähiges Gemisch gebildet, gezündet und als Kletterflamme durch Umstellen der Armaturen nacheinander zu jeweils einem Pilotbrenner gleitet. Nach der Zündung brennen diese ohne weitere Zündung weiter und entzünden ihrerseits anfallendes Fackelgas, welches mit atmosphärischer Luft verbrennt.

4.11 Rohrbrücke

Die Rohrbrücke dient als Tragekonstruktion für die Verbindungsleitungen der einzelnen Anlagenkomponenten. Die Anordnung der Rohrleitungen ist in zwei Etagen vorgesehen.
Die freie Höhe der Rohrbrücke beträgt durchschnittlich 5 m.

Die Rohrbrücke wird als Stahlkonstruktion in der gesamten Versuchsanlage ausgeführt und dient zur Aufnahme der Verbindungsrohrleitungen zwischen den Anlagenteilen sowie der Rohrleitungen für ein- und ausgehende Medien.

5. Instrumentierung und Meß- und Regelungstechnik

Über die Rohrbrücke gelangen alle wichtigen Meßsignale der Temperaturen, Drücke, Differenzdrücke, Massenströme usw. in die Meßwarte (Abb. 18) und werden dort angezeigt, registriert, erfaßt oder zur Regelung benutzt. Insgesamt wurden so ca. 400 Meßwerte in der Warte verarbeitet, wovon ca. 300 Meßwerte mit einem Datalogger[1)] erfaßt wurden. Weiterhin dienten die

Abb. 18: Blick in die Meßwarte der Versuchsanlage EVA II/ADAM II

Meßwerte zum Steuern von 52 Reglern und 56 Sicherheitsschaltungen. Registriert wurden sie auf 45 Schreibern, die je zwischen 3 und 12 Meßwerte gleichzeitig dokumentieren konnten. Die zur Steuerung der Anlage notwendigen Meßsignale wurden direkt mittels Digitalanzeigen auf dem Fließbild (Warte) oder analog unterhalb und seitlich vom Fließbild registriert oder angezeigt. Zwichen Fließbild und Steuerpult waren auch sämtliche Regler und Grenzwertüberwachungen angeordnet.

6. Erfassung, Kontrolle und Übertragung der Meßdaten der EVA II/ADAM II - Versuchsanlage

Die Meßwerte Temperatur, Druck und Durchfluß der Blenden werden mit einem Datalogger[1)] aufgezeichnet. Direkt damit gekoppelt ist ein Bandaufzeichnungsgerät, mit dem die Daten auf Band gespeichert und dann vom Großrechner gelesen werden können. Zusätzlich existiert ein Datenerfassungs- und Übertragunssystem, welches ein regelmäßiges Ausdrucken und eine Online-Übermittlung der Meßwerte zum Großrechner ermöglicht (vgl. Abb. 19).

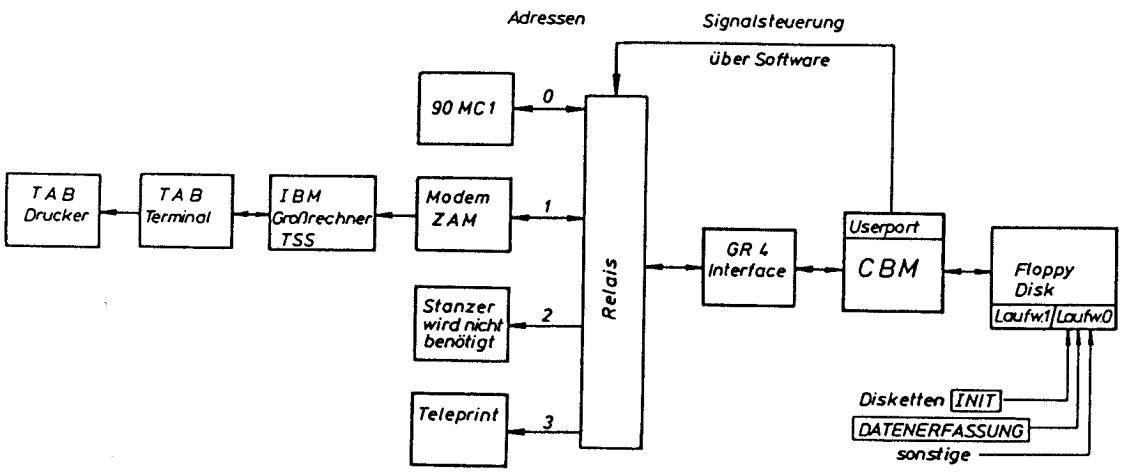


Abb. 19: Organisationsplan der Datenerfassung

Die Organisation übernimmt eine Datenstation in Form eines Kleincomputers[2]. Die Daten laufen dabei über eine "intelligente" Schnittstelle[3], die eine selbständige Datensicherung und Kontrolle ermöglicht. Die Datenstation ist mit einer bedienungsfreundlichen Anwendungs- und Organisationssoftware versehen, die bei Eingabe von Code-Worten automatisch die gewünschten Arbeiten ansteuert und kontrolliert (vgl. Abb. 20).

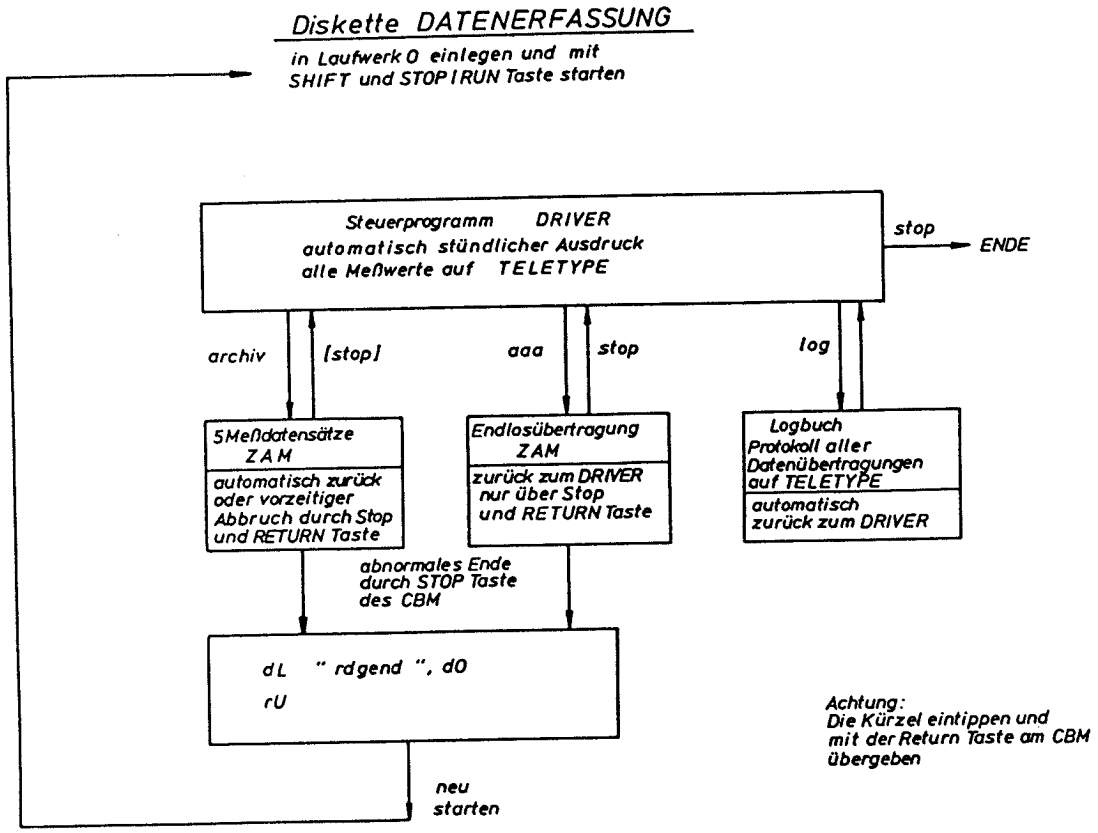


Abb. 20: Software zur Steuerung der Datenübertragung

Vom Steuerprogramm wird stündlich ein Meßwertprotokoll auf einem Teletyp-Drucker ausgegeben.
Des weiteren werden folgende Verarbeitungsmöglichkeiten angeboten:

1. Übertragung von 5 kompletten Datensätzen zum Großrechner
2. Endlosübertragung von Datensätzen zum Großrechner im 2-Minuten-Intervall.
3. Speicherung aller übertragenen Datensätze mit Datum, Uhrzeit und interner Rechneradresse; diese Liste kann als Protokoll auf dem Teletyp-Drucker abgerufen werden.

Für die Eingabe von Gasanalysenwerten (GC-Analysen) stehen auf der Großrechnerseite ebenfalls Serviceprogramme zur Verfügung, von denen die benötigten Werte einzeln abgefragt, automatisch abgespeichert und protokolliert und zur Weiterverarbeitung vorbereitet werden (vgl. dazu Programme LESEN, ONLINE). Zusätzlich werden bei einem LOGON am Rechner Informationen über vorhandene Datensätze und Programme gegeben.

[1] Typ 90MC1, Firma MCC

[2] Typ CBM 8032

[3] Typ GR4, Fa. Grabau

7. Der Versuchsbetrieb für NFE

Anfang Dezember '79 erfolgte ein 1. Eichversuch zur Heliummengenmessung mit eingebauter Teststrecke im Spaltreaktor und gleichzeitigem Probelauf des Heliumerhitzers.

Nach Behebung eines beim 1. Versuch festgestellten Heliumbypasses in der oberen, zum Dampferzeuger führenden Koaxleitung sowie nach Einbau einer geänderten Meßblende wurde Mitte Januar '80 der Eichversuch mit Erfolg und zufriedenstellenden Ergebnissen wiederholt.

Im März '80 erfolgte dann die Inbetriebnahme der Spaltanlage mit ca. 50%iger Leistung des Heliumerhitzers (4,5 MW) bei einem Heliumdurchsatz von 3 kg/s, einer max. Temperatur von 650 ^{o}C und einem Druck von 15 bar. Diese erste Erprobungsphase lief mit mehreren Unterbrechungen zur Behebung auftretender Undichtigkeiten, sowie erforderlicher Änderungs- und Wartungsarbeiten bis Mitte Juni. Eine Dampferzeugerleckage und festgestellte Bypässe im Heliumerhitzer machten dann einen mehrmonatigen Umbau zur Ertüchtigung dieser Komponenten notwendig.

Ende April '81 wurde die Spaltanlage zum Trocknungsbetrieb des Heliumsystems unter Stickstoffatmosphäre wieder angefahren. Nach dem Umsetzen auf Heliumbetrieb standen die nächsten Wochen unter dem Ziel, die vom Dampferzeugerschaden des letzten Jahres im System noch absorbierte Feuchtigkeit, sowohl durch langsame aber stetige Temperaturanhebung, wie auch durch öftere Variation des Heliumdruckes auszutreiben und über die Heliumreinigungsanlage zu entfernen. Da der Abbau des Feuchtegehaltes nur sehr langsam vonstatten ging, wurde dieses zeitaufwendige Verfahren abgebrochen und Druck und Temperatur des Heliumsystems in den Bereich der Auslegungswerte für den weiteren Erprobungsbetrieb angehoben. Mitte Juni traten größere Heliumleckagen an den Flanschdichtungen der Koaxleitung zwischen Spaltreaktor und Erhitzer auf, außerdem zeigten sich eindeutige Hinweise auf einen erneuten Dampferzeugerschaden. Nach Ausbesserung dieser Schäden erfolgte in der zweiten Julihälfte nochmals ein kurzzeitiger Erprobungsbetrieb. Nicht akzeptable Heliumverluste nach Druckanhebung auf >28 bar zwangen erneut zum Abbruch und zu einem konstruktiven Umbau der Dichtungen am Außenmantel der Koaxleitung.

Am 6. Dezember '81 wurden dann bei einem Heliumdruck von 36 bar und einem Heliummassendurchsatz von 3,6 kg/s die NFE-Referenzbedingungen erreicht, und vier Tage später der NFE-Testlauf begonnen. Die Verfahrensgarantie wurde dabei mit einem Methangehalt von 12,8% nach Austritt RSO eingestellt.

An den erfolgreich verlaufenen NFE-Testlauf schloß sich der ebenso erfolgreich verlaufene PNP-Testlauf an. Am 20. Dezember wurde die Anlage abgefahren und offiziell von der Firma LURGI an die KFA übergeben.

Mitte Mai '82 erfolgte die Aufnahme des Versuchsbetriebes in Eigenverantwortung der Projektpartner. Ziel dieser 1. Betriebsperiode war es, durch möglichst breite Variation der Prozeßparameter, insbesondere der helium- und prozeßgasseitigen Massenströme, sowohl die Grenzen wie auch die Abhängigkeiten kennenzulernen. Ausgegangen wurde hierbei von einem Referenzpunkt mit einer Heliumeintrittstemperatur von 900 °C, einem Druck von 30 bar, einem Heliumdurchsatz von 2,5 kg/s und einem Methandurchsatz von 1800 m^3_N/h bei einem Zulaufverhältnis von 3:1 mol H_2O/mol C. Helium- und Methandurchsätze wurden dann schrittweise gesteigert, wobei im Bereich höherer Durchsätze auch allmähliche Drucksteigerungen im Gesamsystem notwendig wurden. Nach Erreichen der Durchsätze des NFE-Abnahmeversuches wurde die Betriebstemperatur auf der Heliumseite auf 950 °C gesteigert. Nach insgesamt 980 Fahrstunden mußte der bis dahin weitgehend störungsfreie und nur durch zunehmende Helium- und Prozeßgasleckagen gekennzeichnete Versuchsbetrieb infolge Ausfall des Recyclegebläses der Methanisierungsanlage Ende Juni vorzeitig abgebrochen werden.

Die Mitte Oktober '82 beginnende 2. Betriebsperiode hatte das Ziel, bei einem Druck von 40 bar den Heliumdurchsatz zunächst bis zum Maximalwert 3,5 kg/s zu steigern und dann bei gleichbleibendem Betriebsdruck die Betriebstemperaturen und die Massendurchsätze schrittweise abzusenken. In weiteren Versuchspunkten sollte bei sonst konstant gefahrener Anlage die Abhängigkeit von der Heliumeintrittstemperatur in den RSO abgeklärt werden. Außerdem sollte das Verhalten der Anlage bei spaltgasseitiger Abschottung von einer bis maximal drei Dreier-Spaltrohrgruppen getestet werden. Der dem Versuchsprogramm angepaßte Fahrbetrieb verlief trotz einiger kurzzeitiger Unterbrechungen zur notwendigen Behebung von Leckagen in der Methanisierungsanlage weitgehend zufriedenstellend, so daß das geplante

Versuchsprogramm in vollem Umfang durchgeführt werden konnte.

Die 3. Betriebsphase begann Mitte Februar '83. Hier ergaben sich anfangs Schwierigkeiten durch ein verstärktes Schäumen des Schmieröls des Heliumgebläses, das auf Alterungseffekte zurückgeführt werden konnte. Nach Austausch des gesamten Öl-inventars gegen Frischöl lief die Anlage ohne nennenswerte Störungen bis Ende April programmgemäß durch. Diese Fahrperiode hatte zum Ziel, das Verhalten der Spaltanlage unter verschiedenen Betriebsbedingungen durch Simulierung von Störfallsituationen bei Ausfall von 3, 6 oder 9 Spaltrohren zu testen. Dabei wurde auch überprüft, ob sich unter derartigen Betriebszuständen heiße Strähnen im Strömungsprofil des RSO ausbilden und nachgewiesen werden können.

Ende Oktober '83 begann der 4. und abschließende Versuchslauf unter NFE-Bedingungen. Vorausgeangen war in der Abschaltpause die Katalysatorentleerung von 27 Spaltrohren nach dem Absaugverfahren sowie die Wiederbefüllung von 3 Rohren mit altem und die von 24 Rohren mit frischem Katalysator. Außerdem war das Rohrbündel zur Inspektion der Baffles gezogen worden. Aufgrund deren vorgefundenen Verformungen im unteren Bündelbereich sowie der eingetretenen Irreversiblen Längung der gesamten Stützkonstruktion waren daraufhin die 72 Verdrängerrohre gezogen und das temperaturmäßig am stärksten beanspruchte untere Baffle durch ein neues aus Incoloy 800 H ersetzt worden.

Ziel dieser letzten Fahrperiode war es, noch einige Daten über das Betriebsverhalten der Anlage im Niederdruckbereich zu gewinnen, sowie die Vervollständigung von Meßpunkten in bisher nicht aufgenommenen Bereichen, wie z.B. in Nähe der Auslegungsdaten der maschinentechnischen Ausrüstung. Nach erfolgreicher Entschwefelung des frischen Katalysators durch mehrtägige Wasserstoffbeschickung lief die Spaltanlage bis auf 2 kurzfristige Abschaltungen - u.a. zur Leckagebeseitung am oberen Mannlochdeckel des Spaltreaktors - bis zum vorgesehenen Abschalttermin, Ende Dezember, ohne Störungen durch.

Am Schluß der Fahrperiode wurden noch Versuche zum Verhalten des Heliumsystems bei kurzzeitigem Ausfall des Erhitzers (über 45 und 120 sec.) durchgeführt. In beiden Fällen blieb das System weitgehend stabil, insbesondere was die Eintrittstemperatur in den Dampferzeuger betraf. Des weiteren wurde auch noch das "Notaus" durch einen Netzstromausfall erprobt. Hierbei konnte die Anlage über den Notdiesel ohne Schwierigkeit in einen sicheren Grundzustand überführt werden, aus dem dann nach insgesamt 2 Stunden ein normales Wiederanfahren erfolgte.

8. Diskussion der Betriebserfahrungen

8.1 Allgemeines

Die ADAM II/EVA II-Anlage ist im wesentlichen als Freianlage konzipiert. Lediglich die Pumpen und Verdichter sowie die Bauelemente des Heliumhauptkreislaufes sind jeweils in einem separaten überdachten Gebäude untergebracht. Bis auf die Überdachung des Heliumkreisalufes entspricht diese Ausführung der üblichen industriellen Praxis. Die Anlage darf sowohl von der Aufstellungsart als auch von der räumlichen Aufteilung als repräsentativ für spätere Großanlagen angesehen werden.

Untypisch für spätere Industrieanlagen ist der zeitliche Wechsel von kurzen Betriebszeiten und langen Stillstandszeiten. Die Anlage wurde nach der Übergabe jeweils für ca. 10 Wochen im zeitigen Frühjahr und im Spätherbst betrieben. Dadurch treten u.a. Korrosionsprobleme auf, die sich weitgehend auf die Außenseiten von Rohrleitungen, Behälter und Armaturen beschränken.

Die Innenseiten von Rohrleitungen und Behältern sind nach längeren Stillstandszeiten im ungünstigsten Fall jeweils so zu behandeln, wie bei einer Inbetriebnahme. Dies gilt in besonderem Maße, wenn Kreisläufe geöffnet worden sind. Auf die Details wird bei der Beschreibung der Inbetriebnahme hingewiesen.

Der Beschreibung der Details des Betriebsverhaltens der Anlage sei folgende allgemeine Charakteristik vorausgestellt:

- Gutmütiges Verhalten bei Konstantbetrieb. Die Anlage wird dann von etwa 40 Regelkreisen, meist geringer Sensibilität (überwiegend PI-Regler), geführt. Eingriffe zur Langzeitkonstanthaltung sind selten erforderlich. Die Anlage reagiert feinfühlig, jedoch nicht nervös auf Eingriffe des Personals. Die wesentlichen Betriebsparameter haben systembedingt einen natürlichen Ausgleich, sofern die auftretenden Störungen klein genug bleiben.
- Schwierige Beherrschbarkeit bei groberen Störungen. Grobere Störungen erfordern eine Anpassung von Energie- oder Mengenströmen. Diese müssen wegen mangelnder Pufferkapazität im geschlossenen System "Methanreformierung-Methanisierung" so rasch an so vielen Stellen gleichzeitig vorgenommen werden, daß eine Zwangsabschaltung oft nicht vermieden werden kann. Die dabei auftretenden Temperatur- und Drucktransienten verursachen dabei Sekundärschäden, deren Beseitigung meist zeitaufwendig ist. Diese Schäden treten insbesondere dann auf, wenn der Energiestrom von der Methanreformierung zur Methanisierung unterbrochen werden muß. Die dann erforderlichen Maßnahmen erzwingen die größten Temperaturtransienten und damit die höchsten Schäden.

8.2 Anfahren

In den Kapiteln Anfahren und Abfahren werden der Übersichtlichkeit halber auch die auf den Konstantbetrieb bezogenen Bemerkungen zum jeweiligen Stichpunkt mit abgehandelt.

8.2.1 Maschinenkontrollen

Soweit als möglich werden alle Maschinen vor dem Anfahren einem Probelauf unterzogen. Durch langen Stillstand verursachte Schäden wurden bisher nicht festgestellt. Als einzige Maßnahme zur Stillstandskonservierung werden Pumpen und Verdichter unter leichtem Stickstoffüberdruck gehalten. Um Lagerschäden vorzubeugen, werden die Maschinen in ca. 14-tägigem Rhythmus von

Hand durchdreht. Sowohl die Erfordernis als auch der Nutzen dieser Maßnahme ist zweifelhaft.

Zur Vorbeugung von Frostschäden werden alle Maschinen der Freianlage mediumseitig wie kühlwasserseitig entwässert. Die Entwässerungen sind häufig mit konstruktiven Mängeln behaftet, denen nur durch Teildemontagen abgeholfen werden kann. Wegen der Vielzahl der zu entwässernden Stellen (Armaturen eingeschlossen), hat sich die Erstellung einer Checkliste bewährt.

8.2.2 Dichtigkeitsprobleme und Kontrolle der Leckverluste

Vor dem Anfahren werden alle Flansche und Schweißverbindungen, die geöffnete waren, einer Dichtigkeitsprobe mit Seifenlösung unterzogen. Nach Erreichen der Betriebstemperatur wurden alle in Frage kommenden Stellen mit einem Lecksucher, der als Wärmeleitfähigkeitsdetektor arbeitet, untersucht. Lecksuchgeräte nach dem Wärmeleitfähigkeitsprinzip sind für die Anforderungen einer ADAM II/EVA II - Anlage das derzeitige Optimum zwischen Sensibilität und Mobilität. Alle von außen schnüffelnden Geräte besitzen jedoch den Nachteil, daß eine quantitative Abschätzung von Leckraten, selbst bei größerer Erfahrung mit diesem Gerät, unsicher ist. Abhilfe schafft hier in vielen Fällen eine Volumenstromabschätzung durch Einhüllen der Leckstelle in Schlauchfolie oder Foliensäcke.

Der Heliumkreislauf und der Prozeßgaskreislauf zeigen ein unterschiedliches Dichtigkeitsverhalten, das getrennter Beschreibungen bedarf.

8.2.3 Heliumdichtigkeit

Der Heliumkreislauf sei hier als die Gruppe der heliumführenden Bauelemente verstanden. Sie sind zu drei Baugruppen zusammenfaßbar: Dem Hauptkreislauf, dem Vorratslager und dem Reinigungskreislauf. Die meisten heliumführenden Bauteile sind aus ferritischem Werkstoff. Der dort nicht entfernte oder neu entstehende Rost liegt als Magnetitpulver vor, das zu einer erheblichen Staubbelastung der Kreisläufe führt.

Der Heliumhauptkreislauf besteht aus dem Spaltreaktor, dem Dampferzeuger mit Helium-Gebläse sowie dem Heliumerhitzer. Die Flansche der Behälter sind ausnahmslos von gasgefüllten oder gasgestützten O-Ringen mit Silberauflage sowie von kammprofilierten Dichtungen mit Silberauflage abgedichtet. Die zugehörigen Dichtflächen dieser Behälter wurden sehr sorgfältig konstruiert, gefertigt und montiert, weil hier zum Teil in der Heliumtechnologie Neuland betreten wurde. Die Folge dieser Mühe war eine hervorragende Dichtigkeit des Systems, so daß darauf verzichtet werden konnte, die an allen Flanschen vorhandenen Schweißlippen zu schließen. Die Summe aller Heliumverluste durch die Flansche des Hauptsystems kann nicht von denen der anderen Systeme getrennt gemessen werden. Nach überschlägiger Schätzung mag der Wert ca. 1 m^3_N/h betragen. An diesem Verlust war ein großer Teil von Flanschen beteiligt, die Leckagen an der Grenze der Nachweisbarkeit aufwiesen. Zusammenfassend ist diesem Teil des Systems uneingeschränkte Betriebstüchtigkeit zu bescheinigen.

Das Heliumvorratslager besteht aus vier Speicherbehältern, vier He-Verdichtern und einigen Kühlern. Die meisten Rohrleitungen dieses Systems sind wegen der geringen Dichte des Heliums sehr dünn (12-15 mm) und haben eine verhältnismäßig große zahl von Absperrarmaturen. In diesem System verursachen vorwiegend defekte Armaturen Leckverluste. Zur Minimierung der Leckagen wurden die zum Teil hochwertigen Armaturen nicht mehr repariert, sondern durch einen "Einheits-Kugelhahn" ersetzt, der wegen seines günstigen Preises (unter 40 DM/St) als "Wegwerf-Armatur" benutzt wird. Die daraus resultierende Servicefreundlichkeit drückt die Leckverluste dieses Anlagenteils zur Bedeutungslosigkeit herab.

Die Heliumreinigung oxidiert alle in Helium enthaltenen Kohlenwasserstoffe an einem Kupferkatalysator zu Wasser und Kohlendioxid. Diese werden dann in getrennt ausgeführten Adsorberbetten gebunden. Die Anlage ist zweisträngig ausgeführt, so daß ständig ein Strang regeneriert werden kann, ohne den Reinigungsbetrieb zu unterbrechen. Das Adsorbersystem der Reinigung

ist als Hochdrucksystem für 40 bar ausgelegt, das Regeneriersystem ist als Niederdrucksystem für 3,5 bar ausgelegt. Das Hochdrucksystem ist zum Niederdrucksystem und zu den erforderlichen atmosphärischen Ausblaseleitungen durch Ventile und Hähne abgesperrt, die häufig undicht werden und Heliumverluste verursachen. Der Grund für das Undichtwerden von Ventilen und Hähnen ist der hohe, zum großen Teil aus Magnetit bestehende Staubanfall, insbesondere während des Anfahrens und bei Lastwechseln. Die Anforderungen der Heliumdichtigkeit bei 40 bar und Staubanfall wurde bisher kurzzeitig von jeder, langfristig von keiner bisher erprobten Armatur zuverlässig gefüllt. Als Notmaßnahme für den Reinigungsbetrieb werden Steckscheiben gesetzt.

Für zukünftige Anlagen mit ähnlich zu erwartenden Betriebszuständen erscheint die derzeit günstigste Lösung in einer Doppelarmatur mit Zwischenentlastung und Heliumrückgewinnung zu bestehen.

Es sei an dieser Stelle noch einmal auf den auch bei der Konstruktion dieser Anlage gemachten Fehler hingewiesen, Armaturen nach der vom Hersteller angegebenen Leckrate auszuwählen. Auch einfachste Armaturen erreichen neu und unter Laborbedingungen Dichtigkeiten, die um Größenordnungen besser sind, als die gestellten Anforderungen. Nach unserer Erfahrung ist es wichtiger für diese Anwendung, Armaturen nach der Servicefreundlichkeit und der Robustheit auszuwählen.

Für die Gesamtanlage sind nach der zweiten Fahrperiode Leckverluste von ca. 2,5 m^3_N/h erzielt worden. Die Einhaltung so niedriger Leckraten ist zum Teil das Ergebnis einer Fleißarbeit der Betriebsmannschaft, weil sie nur erreichbar ist bei ständiger Kontrolle der Verluste und sofortiger Beseitigung auftretender Lecks.

8.2.4 Dichtigkeit des Prozeßgassystems

Das Prozeßgassystem der gekoppelten ADAM II/EVA II - Anlage wälzt unter Vollast ca. 3000 m^3_N/h um (bezogen auf CH_4). Die

Leckrate beträgt etwa 10-15 m^3_n/h entsprechend 0,3 - 0,5 % und ist damit im Rahmen üblicher Leckverluste für Chemie-Anlagen. Die auftretenden Verluste entstehen gleichermaßen an den Stopfbuchsen heißgehender Ventile sowie an den Flanschen heißgehender Behälter. Die Verluste an den Ventilen werden begünstigt durch erhebliche Korrosion in den Stillstandsphasen. Sie sind spezifisch für die Betriebsweise der Versuchsanlage und dürften bei einer ständig betriebenen Anlage kein Problem darstellen. Anders verhält es sich mit den Behälterabdichtungen, deren Flanschverbindungen bei raschen Temperaturwechseln, wie sie bei Schnellabschaltungen entstehen, undicht werden. Diese temperaturbedingten Undichtigkeiten verschwinden zwar meist wieder nach der Temperaturangleichung aller Bauteile, sie schaffen jedoch oft eine Vorschädigung der Dichtung bzw. eine geringe bleibende Leckage, die bereits nach wenigen Tagen zum Auswechseln der Dichtung zwingt. Insbesondere bei isolierten Flanschen führen schon geringe Leckagen von Wasserstoff-Methan-Gemischen ab ca. 350 - 400 °C zur Zündung dieser Gemische.[1)] Die dabei entstehende Wärme längt die Flanschschrauben und vergrößert die Leckverluste erheblich. Flanschbrände dieser Art lassen sich nach den Erfahrungen an der EVA II/ADAM II - Anlage am leichtesten löschen, wenn es gelingt, die Isolierung des brennenden Flansches abzuwerfen. Wegen der Häufigkeit von Betriebsstörungen durch undichte Flansche erscheint es ratsam, bei zukünftigen Anlagen soweit als möglich an temperaturschockgefährdeten Flanschen Schweißlippen einzusetzen.

8.2.5 Zeitbedarf des Anfahrens

Nach erfolgter Überprüfung der Anlage auf Dichtigkeit und der Funktionsprobe der Maschinen sowie der Meß- und Regelungstechnik ist folgender Zeitbedarf für die Inbetriebnahme der kalten, leeren Anlage mit sauberem Heliumsystem erforderlich:

- Minus 24h: Vorheizen des Schmieröls, des Kraftöls sowie des Deionats. (Die Maßnahmen werden ohne Anwesenheit des Betriebspersonals durchgeführt.)
- 0 h: Einlassen des Heliums und Kühlwassers
- 5 h: Beginn der Aufheizung des He-Systems; Befüllung der Speisewassersysteme

[1)] Die Zündung des Gases bei so niedrigen Temperaturen erfolgt wahrscheinlich katalytisch an den Metalloberflächen.

- 14. h: Beginn der Dampfproduktion in der EVA

  Damit ist die Leistungseinkopplung in die EVA so hoch, daß diese auch bei Frostwetter keiner besonderen Aufmerksamkeit mehr bedarf. Ferner steht jetzt Stützdampf für den noch kalten ADAM zur Verfügung. Die Gesamtanlage ist auf diesem Niveau in einer Warteposition stabilisierbar.

- 15 h: Beginn des Aufheizens der ADAM-Anlage

- 30 h: Die EVA-Anlage steht bei 600 °C unter N_2.
  Die ADAM-Anlage steht bei 220 °C unter N_2.

  Dies sind für beide Anlagen die temperaturhöchsten Haltepunkte unter Stickstoff.

- 36 h: Die EVA-Anlage steht bei 700 °C unter Spaltgas.
  Die ADAM-Anlage steht bei 300 °C unter Wasserstoff. Beide Anlagen sind bereit zum Koppeln.

- 40 h: Die Anlage ist gekoppelt.

- 50 h: Die Anlage läuft unter Vollast auf Auslegungsdruck und Auslegungstemperatur.

Die angegebenen Zeiten gelten für den Fall, daß

- die Betriebsmannschaft auf allen Schichten aus eingearbeitetem Personal besteht,
- keine Schäden oder Störungen auftreten,
- die Reinheit des Heliums eine Temperatursteigerung von 30 K/h zuläßt. (Das ist nur der Fall, wenn das Heliumsystem nicht geöffnet war).

8.2.6 Heliumreinheit

Während des Betriebes mit voller Heliumtemperatur und etwa 1000 m^3_N/h Heliumdurchsatz durch die Reinigung, was 1 - 2 % des Gesamtumlaufes entspricht, sind folgende He-Verunreinigungen im Hauptkreislauf gemessen worden:

N_2:	1000	bis	3000	ppm
H_2:	20	bis	200	ppm
H_2O:	1	bis	10	ppm
O_2:	5	bis	25	ppm
CH_4:	5	bis	25	ppm
CO:	25	bis	500	ppm
CO_2:	25	bis	500	ppm

Zur Erläuterung der Werte:
Stickstoff wird in der Heliumreinigung nicht zurückgehalten. Es wird als Wärmeträger beim Regenerieren der Reinigung benutzt und führt so zu geringfügigen Verunreinigungen des Heliums.

Die Wasserstoffkonzentration schwankt stets mit der gleichen Tendenz wie Kohlenmonoxid.

Der Wasserdampfgehalt konnte über weite Strecken der Versuchsläufe unter der Nachweisgrenze von ca. 1 ppm gehalten werden.

Sauerstoff und Methan sind im unteren Bereich der Nachweismöglichkeit.

Kohlenmonoxid und Kohlendioxid haben wegen der bewußten Zulassung von CO_2-Durchbrüchen in der Heliumreinigung die angegebenen hohen Werte erreicht. Dies geschah in Unkenntnis der starken Korrosion, die an den Graphit- und Kohlesteineinbauten durch CO_2-Korrosion entstehen kann. Nachdem diese Schädigung tatsächlich an der Tragplatte des Heliumerhitzers beobachtet worden ist, wird die Heliumreinigung so gefahren, daß ein Mittelwert von 25 ppm CO_2 im Helium nicht überschritten wird. Der nachfolgend skizzierte Mechanismus der Schädigung ist noch nicht in allen Einzelheiten abgesichert, er deckt sich jedoch in allen Punkten mit den beobachteten Schwankungen der Gasverunreinigungen:

CO und H_2 entstehen durch Kohlevergasung.

$$2\,H_2O + C \longrightarrow CO_2 + 2H_2$$

In der Heliumreinigung wird das hier interessierende CO aufoxidiert.

$$2\,CO + O_2 \longrightarrow 2\,CO_2$$

Beim zugelassenen CO_2-Durchbruch in der Reinigung arbeitet diese als Sauerstoffquelle für das Heliumsystem. Per Boudouard-Reaktion entsteht wieder Kohlenmonoxid.

$$CO_2 + C \longrightarrow 2\,CO$$

Daraus entsteht per Wassergasreaktion wieder fester Kohlenstoff, der tatsächlich an Stellen gefunden wurde, wo er durch die Strömung in Helium nicht abgelagert werden konnte.

$$CO + H_2 \longrightarrow C + H_2O$$

Das Wasser wird sofort wieder in der am Anfang beschriebenen Wassergasreaktion verbraucht. Zum Ablauf der Reaktion steht im Helium ständig der Temperaturbereich zwischen 980 °C und 350 °C zur Verfügung, den das Helium beim Umlauf abwechselnd annimmt.

Folgende Beobachtungen wurden bezüglich der Schwankungen der Heliumverunreinigungen gemacht:

- CO-Durchbrüche wegen O_2-Mangel in der Heliumreinigung setzen den Wasserdampfpartialdruck herab.
- Direkte O_2-Einspeisung ins Helium-System setzt den Wasserdampfpartialdruck herab, der H_2-Partialdruck ändert sich nicht wesentlich.
- CO und H_2-Verunreinigungen ändern sich immer mit gleicher Tendenz.

Wenn das Heliumsystem wegen Reparaturen oder Umbauten längere Zeit der Luft ausgesetzt war, ist eine Trocknungszeit von ca. 5 - 8 Tagen erforderlich. In dieser Zeit wird die Heliumtemperatur in dem Maße langsam bis etwa 600 °C angehoben, wie der Wasserdampfgehalt fällt. Dabei fallen etwa 15 l Wasser an. Davon können etwa 10 - 12 l bei einem Taupunkt von +5 °C auskondensiert werden, ohne die Molekularsieb-Adsorber zu belasten.

8.2.7 Bemerkungen zur Schnellabschaltung

Wie bereits eingangs zum Thema "Betriebsverhalten" erwähnt, ist die Trennung der Systeme EVA und ADAM ohne mehrstündige Vorbereitungszeit nur schwierig zu beherrschen. Ziel jeder Maßnahme muß sein, die EVA auf einem Niveau abzufangen, das ein unmittelbares Koppeln der Anlage wieder gestattet. Der ADAM muß für die Zeit der Vorbereitung dazu auf Zündtemperatur gehalten werden.

Dieses Bestreben ist in der EVA-Anlage nur bei günstigen Randbedingungen realisierbar, weil durch die Reihenschaltung von Spaltreaktor und Dampferzeuger ein festes Verhältnis der Energieaufteilung zwischen beiden Komponenten besteht. Bei einem schlagartigen Lastabwurf sind folgende Parameter aufeinander abzustimmen, bzw. in bestimmten Grenzen zu halten:

- Anpassung der Energieeinkopplung auf ein Niveau, das die Dampferzeugung gewährleistet.
- Notkühlung des Spaltreaktors zum Austrag der Speicherwärme so weit, daß die zulässige Eintrittstemperatur von 700 °C in den Dampferzeugern nicht überschritten wird.
- Anpassung der Heliumumlaufmenge und der Dampfproduktion zueinander, so daß einerseits Heißdampf von mindestens 300 °C produziert wird und andererseits die Heliumeintrittstemperatur in das Gebläse unter 450 °C bleibt.
- Stabilisieren des Helium-, des Prozeßdampf- und des Prozeßgasdruckes.

An der EVA II-Anlage ist nichts vorgesehen, das die Abfuhr der Speicherwärme aus dem Spaltreaktor so lange gewährleistet, bis die Heliumaustrittstemperatur aus diesem unter 700 °C gesunken ist und damit als Eintrittstemperatur in den Dampferzeuger zulässig wird. Bei zukünftigen Konstruktionen sollte der Schnellabschaltung dadurch Rechnung getragen werden, daß entweder die Eintrittstemperatur in den Dampferzeuger kurzzeitig sehr hoch sein darf, oder daß zum Beispiel über eine besondere Methaneinspeisung ein Notkühlmechanismus zur Verfügung steht.

Die ADAM-Anlage ist demgegenüber unproblematisch. Das System kann ca. 30 Minuten sich selbst überlassen bleiben. Die Speicherwärme reicht für diesen Zeitraum bei abgeschaltetem Gasumlauf aus, um die Katalysatorbetten auf Zündtemperatur zu halten. Danach ist zur Vermeidung von Carbonylbildung lediglich die Einspeisung von Wasserstoff sowie die Inbetriebnahme des Anfahrerhitzers erforderlich, um das ADAM-System auch für längere Zeit im Zustand der Koppelbereitschaft zu halten.

Wenn es nicht gelingt, die getrennten Anlagenteile auf einem hohen Temperaturniveau zu stabilisieren, geht in jedem Fall Betriebszeit für das erneute Anfahren verloren. Diese Zeit ist jedoch bei der Summe aller Abschaltzeiten der Gesamtanlage der kleinere Teil. Der Hauptzeitverlust ging bisher zu Lasten der Beseitigung von Sekundärschäden, die überwiegend durch rasches Absinken von Betriebstemperaturen an Behältern entstehen. Es entstehen dann Undichtigkeiten an den Behälterflanschen, wenn die Flanschblätter und die dazwischen eingespannten Rohrböden ihre Temperatur rascher verlieren, als die sie verbindenden Schrauben. Der daraus entstehende Vorspannungsverlust führt zum Durchblasen mit daraus entstehender Dichtungsschädigung.

Ein weiterer empfindlicher Bereich nach einer Schnellabschaltung sind bei Frost die wassergefüllten Behälter und von diesen im besonderen Maße die Luftkühler. Konstruktive Maßnahmen, die einerseits den Frostschutz gewährleisten, andererseits die Betriebsbereitschaft erhalten, sind nicht vorgesehen. Sie wären jedoch bei einer größeren Anlage wahrscheinlich erforderlich. Der Frostschutz kühlwasserbeaufschlagter Wärmetauscher ist durch eine ständig bereitstehende Dampfeinspeisemöglichkeit, die das Kühlwasser auf ca. 15 ^{o}C aufheizt, zur Zufriedenheit gewährleistet. Sekundärschäden an Maschinen sind bisher nicht aufgetreten.

8.2.8 Personalbedarf

Wegen einiger zu beseitigender Mängel zog sich die Inbetriebnahme der Anlage über 2 Jahre hin. Während dieser Zeit war, unbeschadet der Firmenzugehörigkeit, im ersten Jahr jede Schicht durchschnittlich mit 2 Ingenieuren, 1 Meß- und Regeltechniker sowie 4 Anlagenfahrern besetzt. Im Tagesdienst befanden sich im Durchschnitt weitere 10 Personen unterschiedlicher Qualifikationen. Diese Besetzung war ausreichend, um auch plötzlich anfallende Mehrarbeit sicher abzudecken. Im zweiten Jahr wurde der Tagesdienst auf durchschnittlich 6 Personen verkleinert. Nach der dann folgenden Übergabe der Anlage an die KFA im Dezember '81 wurden pro Schicht 1 Ingenieur, 1 Meß- und Regeltechniker sowie 3 Anlagenfahrer eingesetzt.

In den folgenden zwei Jahren konnte durch zunehmende Betriebserfahrung sowie durch einige Optimierungen in den Reglereinstellungen die Anlage in ihrem Betriebsverhalten verbessert werden. Es soll deshalb nach dem Einbau des PNP-Bündels versucht werden, mit 4 Personen pro Schicht auszukommen. Dabei können, nachdem die Anlage in ihrem Betriebsverhalten weitgehend kalkulierbar geworden ist, die Schichtleiterstellen auch von erfahrenen Technikern ausgefüllt werden. Diese Zusammensetzung hat den Vorteil, daß die Betriebsmannschaft bei Anlagenstillstand besser an die Erfordernisse der Anlagenwartung angepaßt ist.

8.3 Abfahren

Im Vergleich zur Inbetriebnahme ist das Abfahren der Anlage sehr einfach. Dazu wird die Heliumtemperatur mit 30 bis 40 K/h abgesenkt. Der steigende Methangehalt im Spaltgas, verursacht durch die sinkende Spaltendtemperatur, wird durch Verändern des Methan/Wasserdampfverhältnisses kompensiert, bis bei Temperaturen von ungefähr 650 ^{o}C die Systeme getrennt werden. Die EVA-Anlage wird dann bis zu einer Heliumtemperatur von ca. 100 ^{o}C abgekühlt. Dies entspricht auch den Behältertemperaturen des Hauptkreislaufes, von denen lediglich der Heliumerhitzer so weit abgekühlt werden muß, wenn die Kühlung für die Elektrobolzen ebenfalls außer Betrieb genommen werden soll.

Parallel zu dieser Maßnahme wird die Temperatur in den ADAM-Reaktoren unter 220 ^{o}C gebracht. Dann wird der ADAM-Kreislauf unter Stickstoff gesetzt und kann ohne weitere Maßnahmen auskühlen.

Zeitbedarf für das Abfahren:

- 0 h: Anlage läuft unter Vollast
- 10 h: Nach der Lastabsenkung wird das ADAM-System von der EVA getrennt.
- 24 h: Die EVA-Anlage hat ca. 300 ^{o}C Behältertemperatur erreicht und kann bis auf die Kühlsysteme stillgelegt werden. Diese Art der Stillsetzung ist nur sinnvoll für kurzzeitige Stillegungen.

- 34 h: Die EVA-Anlage ist bis auf 100 °C abgekühlt. Die ADAM-Anlage ist stillgesetzt.
- 48 h: Die Gesamtanlage ist druckentlastet soweit erforderlich und entwässert. Der Schichtbetrieb kann beendet werden.

Im Anschluß an die Stillsetzung wird die gesamte Anlage, außer dem Methantank, sorgfältig mit Stickstoff gespült. Die Maßnahme dient dem Personenschutz, weil es erfahrungsgemäß schwer ist, bei längerem Anlagenstillstand mit Reparaturarbeiten den Überblick über die jeweils erforderlichen Teilinertisierungen zu behalten.

Konservierungsmaßnahmen

Nach dem Entwässern aller Anlagenteile, wobei diese so gut ausgeblasen werden wie möglich, wird die Gesamtanlage über ein besonderes Rohrleitungssystem mit Stickstoff von 0,2 bar aufgedrückt. Das System ist erst 1982 installiert worden und arbeitet, soweit bisher beurteilbar, zufriedenstellend.

Ausgenommen von diesem Stickstoffkorrosionsschutz sind das Kühlwassersystem und das Heliumsystem. In letzterem wird entsprechend dem vorher gesagten mit Helium konserviert. Beim Kühlwassersystem handelt es sich um ein offenes System, das nicht mit Stickstoff geflutet werden kann. Aus Kostengründen wurde von einer Umrüstung abgesehen.

8.4 Passivieren und Reduzieren der Katalysatoren

8.4.1 Passivieren des EVA-Katalysators

Die EVA II - Anlage ist mit BASF-Katalysator der Type G1-25 mit den Abmessungen 12,7 mm x 4,8 mm x 9,5 mm befüllt. Wegen eines vorzunehmenden Katalysatorwechsels nach der Frühjahrsfahrperiode '83 sowie wegen des Bündelausbaus nach der Herbstfahrperiode '83 mußte jeweils am Ende dieser Betriebszeiten eine Katalysatorpassivierung vorgenommen werden.

Die Passivierungen wurden beide Male gleichzeitig und in Anlehnung an die Vorschriften des Herstellers vorgenommen:

Die Katalysatorschüttung wird auf ca. 680 °C vorgewärmt und mit 2.500 kg Wasserdampf und 1.100 m^3_N/h Stickstoff im geschlossenen Kreislauf durchströmt. Der erforderliche Sauerstoff wird als Luft zudosiert, beginnend mit 3 m^3_N/h. Während der Lufteinspeisung, die im Ablauf von 4 Stunden stetig gesteigert wird bis auf 30 m^3_N/h ist kein Anstieg der Temperatur in der Schüttung meßbar. Nach Ablauf dieser Zeit beträgt der Luftanteil im umgewälzten Stickstoff ca. 2%, und es hat sich ein CO_2-Anteil von ca. 1% gebildet. Die weiter über mehrere Stunden vorgenommene Lufteinspeisung erhöht den Sauerstoffgehalt im umgewälzten Stickstoff nicht mehr wesentlich, jedoch steigt der CO_2-Anteil ständig weiter an. Nach weiteren 6 h Lufteinspeisung wird die Passivierung beendet. Der dabei ständig steigende CO_2-Gehalt, vermutlich gebildet mit im Katalysator befindlichem Ruß, betrug zu diesem Zeitpunkt 14%.

8.4.2 Passivieren der ADAM-Katalysatoren

Der erste Methanisierungsreaktor D201 ist mit Topsøe-Katalysator MCR-2x, der zweite Methanisierungsreaktor D202 und der dritte Methanisierungsreaktor D203 sind mit dem BASF-katalysator G1-85 befüllt. Beide Katalysatortypen zeigen ein ähnliches Verhalten bei der Passivierung nach folgender Methode:

Die Schüttungen werden auf eine möglichst homogene Temperatur von ca. 60 °C gebracht. Dann wird zur Abfuhr der Reaktionswärme die Katalysatorschüttung mit der maximal einstellbaren Stickstoffmenge durchströmt. Dieser wird dann, vorsichtig mit sehr kleinen Mengen beginnend, Luft beigemischt. Die Passivierung erzeugt Temperatursteigerungen, die von oben beginnend in Wellen durch die Schüttung laufen. Aus Sicherheitsgründen sollte die Maximaltemperatur unter 100 °C bleiben. Wird diese überschritten, nimmt der bereits passivierte Katalysator über eine in die Tiefe gehende Oxidation erneut Sauerstoff auf. Bei ausreichendem Sauerstoffangebot kann dabei eine so hohe Temperatur entstehen, daß sowohl der Katalysator als auch der Behälter zerstört wird. Die Temperatursteigerung nimmt beim Erreichen einer Grenztemperatur so rasch zu, daß in Zweifelsfällen immer die Gasumwälzung und damit die Sauerstoffzufuhr gestoppt werden sollte.

8.4.3 Reduzieren des EVA-Katalysators und der ADAM-Katalysatoren

Das Reduzieren des EVA-Katalysators erfolgt bei ca. 600 °C dadurch, daß einem Wasserdampf-Stickstoff-Gemisch kleine Methanmengen zugesetzt werden. Der Katalysator springt nach wenigen Minuten an und erzeugt Wasserstoff, der zur vollständigen Reduktion führt. Der Vorgang ist unproblematisch.

Die Reduktion der ADAM-Katalysatoren erfolgte nach der Betriebsanweisung der LURGI unter reinem Wasserstoff, bei Temperaturen von ca. 425 °C. Die Reduktion selbst ist unproblematisch. Lediglich die Minimierung der Leckverluste, die sehr hoch waren bei dem "dünnen" Gas Wasserstoff, sowie der Eintrag der hohen Energie zur Aufrechterhaltung der Bettemperaturen erfordert eine Optimierungsarbeit bezüglich der Lastverteilung zwischen dem Spaltgasverdichter und dem Recycle-Gebläse.

8.4.4 Katalysatorwechsel

Nach Abschluß der Betriebsperiode im Frühjahr 83 wurde in 24 von 30 Spaltrohren der Katalysator ausgetauscht. Der Spaltkatalysator hatte bis zu diesem Zeitpunkt ca. 4.700 Betriebsstunden unter Methanzufuhr gelaufen. Auffällige Veränderungen bzgl. des Temperaturprofiles oder des Druckverlustes sind während dieses Zeitraumes nicht beobachtet worden.

Zur Vorbereitung des Katalysatorwechsels wurde die Katalysatorfüllung oxidiert. Dies geschah, in Anlehnung an die Empfehlungen des Herstellers, mit einem Dampf-Luft-Gemisch bei einer Katalysatortemperatur von ca. 650 °C.

Der Katalysator wurde nach dem Abkühlen des Spaltreaktors in der dafür vorgesehenen Weise mit einem Staubsauger aus den Spaltrohren abgesaugt. Die Prozedur war zuvor in einem Originalrohr, jedoch unter Laborbedingungen, erprobt worden. Im Laborversuch waren als Absaugzeit 5 Stunden Zeitbedarf ermittelt worden. Unter realistischen Bedingungen war trotz erhöhtem Personaleinsatz (3 Mann) eine Absaugzeit von 8 Stunden im

Mittel nicht zu unterschreiten. Die Ursache hierfür ist im wesentlichen durch sporadisch auftretende Verfestigungen des Katalysators, die jedoch nie so stark waren, daß sie nicht durch die Kunststoff-Absauglanze aufgebrochen werden konnten.

Der abgesaugte Katalysator enthielt nur geringe Mengen Staub und Bruchstücke. Der Bruchanfall war so gering, daß er für die Funktion des Katalysators noch als bedenkenlos angesehen werden kann. Beim Absaugen wurden jedoch Verstopfungen der Abzugslanze registriert, deren Ursache Katalysatorbruchstücke waren. Die Beseitigung dieser relativ seltenen Verstopfungen ist jedoch so zeitaufwendig, daß bei mehr Bruchanfall eine erhebliche Verlängerung der Absaugzeit eintritt.

Die Einfüllung des Spaltreaktors mit neuem Katalysator sowie das anschließende Verschweißen der Einfüllstutzen verlief entsprechend der konstruktiven Vorplanung und ohne nennenswerte Störungen. Zusammenfassend ist festzustellen, daß der Katalysatorwechsel problemlos und den Erwartungen entsprechend verlief. Der Zeitaufwand betrug für 27 Spaltrohre bei maximal möglicher Personalstärke (3 Personen) etwa 3 Monate.

9. Anpassung der Versuchsanlage an neue Aufgabenstellungen

Die Versuchsanlage EVA II/ADAM II ist im Rahmen des Projektes NFE errichtet und sehr erfolgreich betrieben worden. Die gestellten Versuchsaufgaben konnten erfüllt werden.

Der Anlagenteil EVA II stellt als einzige Anlage in der Welt einen vollständigen Helium-Kreislauf eines HTR für Prozeßwärme dar. Durch seine Leistungsgröße von 10 MW ergeben die Erprobungen von Testkomponenten repräsentative Aussagen über das Betriebsverhalten bei nuklearen Prototyp-Bedingungen. Aufgrund ihres HTR-typischen Aufbaus (Modul-Mehrbehälter-Bauweise) kann die Versuchsanlage für die verschiedenen NPW-spezifischen Versuchsvorhaben genutzt werden.

Von 1980 bis 1983 ist ein für NFE-Bedingungen ausgelegtes Spaltrohrbündel erfolgreich erprobt worden. Die Erprobung erstreckte sich über insgesamt 7.800 Betriebsstunden.
Für den Zeitraum 1984 bis 1986 ist mit der Fa. GHT/INTERATOM die Erprobung des PNP-Testspaltrohrbündels vertraglich vereinbart worden. Dieses ist nach PNP-Gesichtspunkten für Bedingungen der HKV ausgelegt. Der HKV-Prozeß erfordert einen höheren Dampfanteil im Prozeßgas. Dadurch muß im Referenzzustand von den zur Verfügung stehenden 10 MW ein größerer Anteil dem Dampferzeuger zugeführt werden als im NFE-Referenzzustand. Dies bedingt eine sehr hohe Helium-Eintrittstemperatur in den Dampferzeuger von 700 ^{o}C. Zum anderen weist das PNP-Spaltrohrbündel nur 18 Spaltrohre auf gegenüber 30 im NFE-Bündel. Geringe Rohrzahl und erhöhter Dampfanteil im Prozeßgas erfordern jedoch deutlich erhöhte Gebläse- und Kompressorleistung. Die Versuchsanlage EVA II ist jedoch von vornherein so ausgelegt, daß dieser HKV-Referenzzustand als Grenzfall gefahren werden kann.

Literatur

/ 1/ Entwicklungsprogramm zur Umwandlung Fossiler Rohstoffe mit Hochtemperatur-Kernreaktorwärme
KFA-BF-RB, 12.05.1969

/ 2/ R. Schulten
Über die Probleme bei der Entwicklung eines HTR zur Kohlevergasung
Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes NRW, Heft 185, 12.06.1968

/ 3/ R. Schulten
Über die Anwendung von HTR zur Kohlevergasung
Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes NRW, Heft 185, 12.06.1968

/ 4/ K. Kugeler
Über die Erzeugung von H_2 aus Erdgas mit Hilfe von Kernreaktorwärme
Jül-557 RG, Sept. 1968

/ 5/ K. Kugeler et al.
Steam reformers heated by helium from high temperature reactors
Nucl. Engineering and Design 34, 129 ff (1975)

/ 6/ K. Kugeler et al
Development of heliim heatet steam reformers
1976 IEAE - SM - 200/29, Wien

/ 7/ H. Fedders, R. Harth, B. Höhlein
Experiments of combining nuclear heat with the methane steam-reforming process
Nuclear Engineering and Design 34, 119 ff (1975)