

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

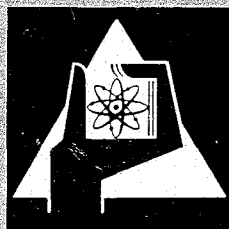
Februar 1968

KFK 702

Institut für Kernverfahrenstechnik

Planung und Bau einer 10stufigen Pilotanlage
für das Trenndüsenverfahren

E. W. Becker, G. Frey, R. Schütte



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Februar 1968

KFK 702

Institut für Kernverfahrenstechnik

Planung und Bau einer 10-stufigen Pilotanlage
für das Trenndüsenverfahren

von

E.W. Becker

G. Frey^{x)}

R. Schütte

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

x) Dissertation; Universität (Techn. Hochschule) Karlsruhe
Dezember 1967



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Überblick	1
2. Die Trenndüsenkaskade	10
3. Die UF ₆ -Abscheidungsanlage	19
4. Das Vakuumsystem	29
5. Die Sperrmittelversorgung der Verdichter	36
6. Abwicklung der Planung und des Baus der Anlage	40



1. Einleitung und Überblick

Das Trenndüsenverfahren nützt die teilweise räumliche Entmischung verschieden schwerer Komponenten eines Gasgemisches in einem expandierenden Überschallstrahl zur Isotopentrennung aus¹⁻¹⁰⁾. Das Verfahren ist vor allem für die Entmischung der Uran-Isotope von Interesse. Bei einer praktischen Anwendung des Verfahrens muß der elementare Trenneffekt durch Hintereinanderschalten einer großen Zahl von Trennelementen in einer Trennkaskade vervielfacht werden. Für eine exakte Beurteilung der wirtschaftlichen Aussichten ist eine genaue Kenntnis der gasdynamischen Stabilität bzw. des erforderlichen Regelaufwandes einer solchen Trenndüsenkaskade notwendig. Es wurde daher beschlossen, im Institut für Kernverfahrenstechnik eine 10-stufige, mit einheitlichem Stufendurchsatz arbeitende Trenndüsenkaskade für die Entmischung der Uranisotope samt den erforderlichen Zusatzeinrichtungen zu erstellen. Planung und Bau dieser "Pilot-Anlage" sind Gegenstand dieser Arbeit¹¹⁾.

-
- 1) E.W. Becker, K. Bier, H. Burghoff, Z. Naturforschg. 10 a, 565 (1955)
 - 2) E.W. Becker, W. Beyrich, K. Bier, H. Burghoff, F. Zigan, Z. Naturforschg. 12 a, 609 (1957)
 - 3) E.W. Becker, R. Schütte, Z. Naturforschg. 15 a, 336 (1960)
 - 4) E.W. Becker, H. Burghoff, J. Gspann, Z. Naturforschg. 16 a, 955 (1961)
 - 5) F. Zigan, Z. Naturforschg. 17 a, 772 (1962)
 - 6) E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, Z. Naturforschg. 17 a, 778 (1962)
 - 7) E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, Z. Naturforschg. 18 a, 246 (1963)
 - 8) E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, Z. Chemie-Ing.-Techn. 39, 1 (1967)
 - 9) R. Schütte, D. Seidel, Z. Chemie-Ing.-Techn. 39, 80 (1967)
 - 10) D. Seidel, Diss. Technische Hochschule Karlsruhe, 1966
 - 11) Bei der Planung der Trenndüsenkaskade wurden die in früheren Arbeiten^{9) 10)} mit einer Einzelstufe gewonnenen technischen Erfahrungen benutzt.

Abb. 1 a zeigt einen Querschnitt der verwendeten Trenndüse zusammen mit den vorgesehenen Betriebsbedingungen⁹⁾. Ein Gemisch von 5 Mol-% UF_6 und 95 Mol-% Helium wird mit der Stromstärke L unter dem Düsenvordruck $p_0 = 48$ Torr einer gekrümmten Laval-Düse zugeführt. Sie besteht aus einer Umlenk wand mit einem Krümmungsradius $r = 1,5$ mm und einem dazu exzentrisch angebrachten Vollzylinder von 1,8 mm Durchmesser. Die engste Düsenweite beträgt 0,40 mm. In der Düse expandiert das Gasgemisch auf den Druck $p_M = 16$ Torr. An der Stelle, wo die Strömung die Umlenk wand verläßt, ist in 0,2 mm Abstand von der Wand eine messerförmige Schneide angebracht, die als Abschäler bezeichnet wird. Durch den Abschäler wird der Strahl in eine leichte Fraktion mit der molaren Stromstärke ϑL und eine schwere Fraktion mit der molaren Stromstärke $(1 - \vartheta) L$ aufgespalten.

Der mit den Molenbrüchen n_M und n_K des U^{235} in der leichten bzw. schweren Fraktion gebildete elementare Trenneffekt

$$\epsilon_A = \frac{n_M (1 - n_K)}{(1 - n_M) n_K} - 1 \quad (1)$$

beträgt unter den in Abb. 1 a angegebenen Betriebsbedingungen

$$\epsilon_A \approx 7 \cdot 10^{-3}$$

Aus den in Abb. 1 a angegebenen UF_6 -Molenbrüchen N_0 , N_M und N_K im Ausgangsgas, in der leichten und schweren Fraktion, ergibt sich das Gesamtabschälverhältnis

$$\vartheta = \frac{N_0 - N_K}{N_M - N_K} \quad (2)$$

zu

$$\vartheta \approx 0,8$$

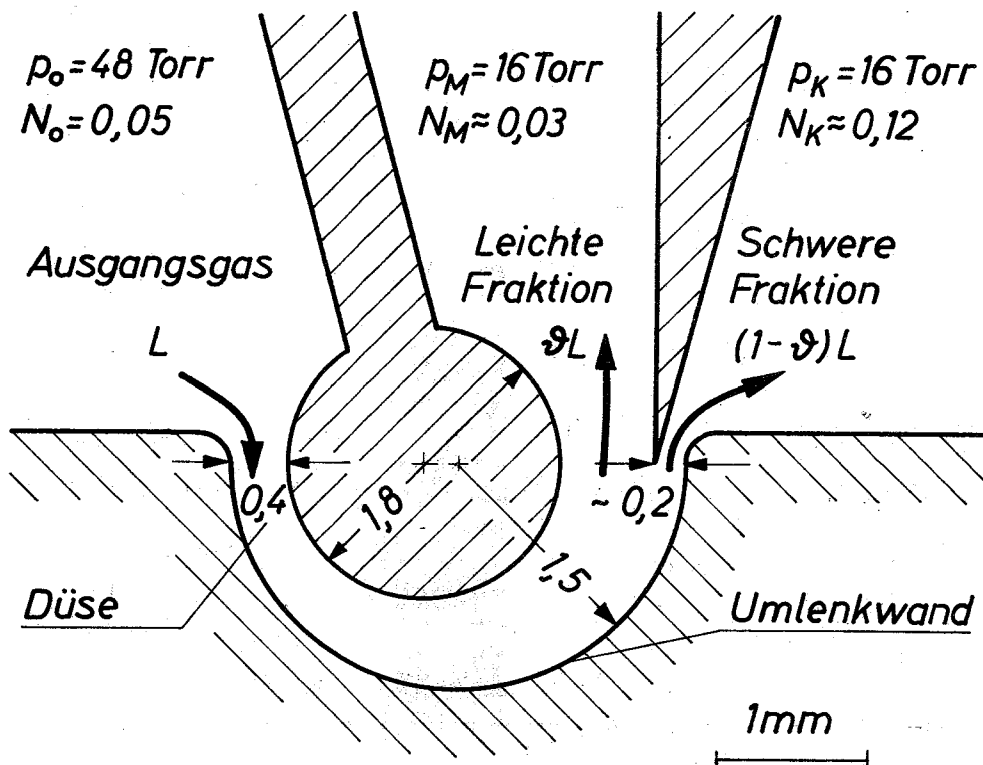


Abb. 1a: Querschnitt der Trenndüse mit vorgesehenen Betriebsbedingungen.

N_o , N_K und N_M = Molenbrüche des UF_6 in dem als Arbeitsgas benutzten He/ UF_6 -Gemisch.
Maßangaben in mm.

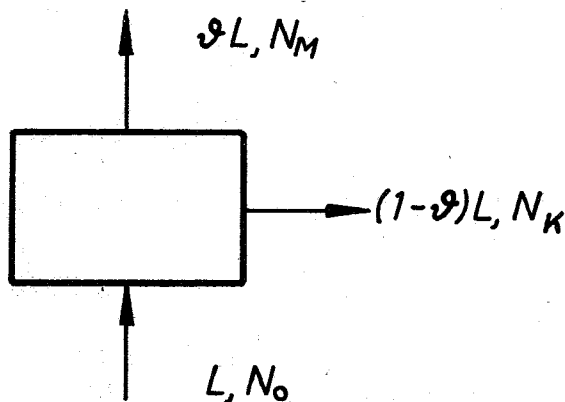


Abb. 1b: Ersatzschaltbild für das Trennelement

und das UF_6 -Abschälverhältnis

$$\alpha_{UF_6} = \frac{N_M}{N_O} \quad (3)$$

zu

$$\alpha_{UF_6} \approx 0,5 .$$

Abb. 1 b zeigt das im folgenden benutzte Ersatzschaltbild des Trennelementes.

Für den vorgesehenen Wert des UF_6 -Abschälverhältnisses¹²⁾ $\alpha_{UF_6} = 0,5$ hat die Zusammenschaltung der Stufen so zu erfolgen, daß die leichte Fraktion eines Trennelementes über den zu dieser Stufe gehörenden Verdichter der folgenden Stufe zugeleitet wird, während dieser Verdichter gleichzeitig die schwere Fraktion der übernächsten Stufe ansaugt ("Nichtvermischungsbedingung für die Isotope"¹³⁾). Für den Betrieb der Kaskade ohne Produktentnahme ist das entsprechende Prinzipschaltbild in Abb. 2 angegeben. Die dort eingetragenen Stromstärken der verschiedenen Verfahrensgasströme (in gMol/h) stellen die Auslegungswerte für die verwendeten Trenndüsen mit 100 mm Düsenlänge (in Abb. 1 a senkrecht zur Zeichenebene) dar. Man ersieht aus der Stromstärkenbilanz, daß infolge der starken Entmischung zwischen Helium und UF_6 in den Trennelementen ein erheblicher Nettostrom an Helium zum Kaskadenkopf transportiert wird, während die UF_6 -Ströme bei exakter Einhaltung von $\alpha_{UF_6} = 0,5$ ohne resultierenden Materialtrans-

12) Für die in der vorliegenden Arbeit beschriebene Pilotanlage wurde wegen der einfachen Schaltung $\alpha_{UF_6} = 0,5$ gewählt. Aufgrund der Voruntersuchungen erscheint es nicht ausgeschlossen, daß bei einer großtechnischen Anlage $\alpha_{UF_6} = 0,33$ günstiger ist⁸⁾.

13) Vgl. z.B.: K. Cohen: The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of U^{235} , McGraw Hill, New York 1951

UF_6 -Abscheidungsanlage

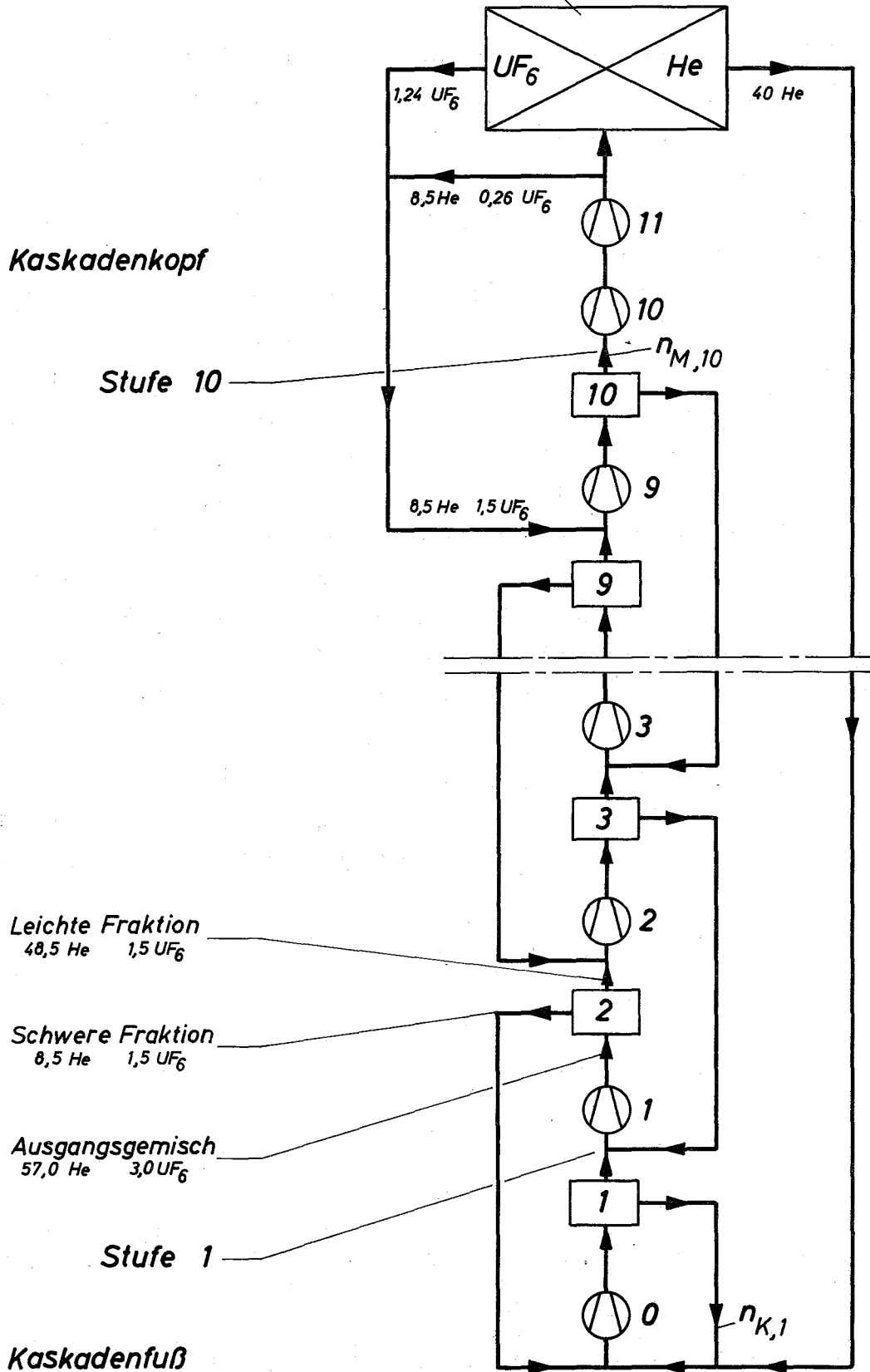


Abb. 2: Prinzipschaltbild der Trenndüsenkaskade für den Betrieb ohne Produktentnahme. Die Zahlen vor He bzw. UF_6 bezeichnen die Stromstärken in gMol/h.

port zwischen den Stufen der Kaskade zirkulieren¹⁴⁾. Der Nettotransport an Helium erfordert die Abtrennung eines entsprechenden Heliumstromanteils aus der leichten Fraktion der Kopfstufe 10. Diese Aufgabe übernimmt die in Abb. 2 eingezeichnete UF₆-Abscheidungsanlage, die das zu verarbeitende Gemisch über den Kompressor 11 erhält. Das von UF₆ befreite Helium wird zur Aufrechterhaltung der Materialbilanz an den Kaskadenfuß zurückgespeist, wo es mit den von den Stufen 1 und 2 kommenden schweren Fraktionen vermischt¹⁵⁾ und durch den Kompressor 0 auf den Düsenvordruck verdichtet wird. Der aus dem Verfahrensgas ausgeschiedene UF₆-Anteil wird in den Kaskadenkopf zurückgeleitet oder durch neues UF₆ ersetzt. Im zweiten Fall, bei dem durch den UF₆-Ersatz die Isotopenzusammensetzung am Kaskadenkopf konstant gehalten wird, ergibt sich eine maximale Anreicherung des schweren Isotopes am Kaskadenfuß. Im ersten Fall hängt die Isotopenverschiebung gegenüber dem Ausgangsmaterial vom Verhältnis der in der Kaskade und in der UF₆-Abscheidungsanlage vorhandenen UF₆-Mengen ab. Der mit den Molenbrüchen $n_{M,10}$ und $n_{K,1}$ des leichten Isotopes am Kaskadenkopf bzw. am Kaskadenfuß gebildete Kaskaden-Anreicherungsfaktor

$$A = \frac{n_{M,10} (1-n_{K,1})}{n_{K,1} (1-n_{M,10})}$$

ist bei beiden Arbeitsweisen jedoch derselbe. Er beträgt

$$A = (\epsilon_A + 1)^{10} \approx 1,07.$$

14) In einer produzierenden Trenndüsenkaskade würde eine Einspeisung von Ausgangsmaterial in Form von UF₆ an einer geeigneten Stelle im Mittelteil der Kaskade erfolgen. Die Entnahme von angereichertem Produkt-UF₆ bzw. an U²³⁵ verarmtem Abfall-UF₆ geschähe am Kopf bzw. Fuß der Kaskade, und die entsprechenden Materialströme würden sich den in Abb. 2 angegebenen Zirkulationsströmen überlagern.

15) Die mit einheitlichem Stufendurchsatz arbeitende Kaskade ("quadrierte Kaskade", vergleiche dazu Zitat 13) läßt sich am Kopf und Fuß nur unter Verletzung der "Nichtvermischungsbedingung" für die Isotope abschließen. Wie man anhand von Abb. 2 erkennt, wird dadurch die He/UF₆-Bilanz jedoch nicht gestört.

Zur Wiederverdichtung des in den Trenndüsen expandierten Verfahrensgases werden UF₆-feste Rootsverdichter eingesetzt¹⁶⁾, deren Wellendurchführungen zur Abdichtung gegen die Atmosphäre mit Sperrkammern versehen sind. Die Sperrkammern werden von einem flüssigen Sperrmittel durchströmt und sind mit Gleitringdichtungen beiderseitig gedichtet⁹⁾¹⁰⁾. Das UF₆-beständige Sperrmittel wird von einer zentralen Sperrmittelversorgung umgepumpt und rückgekühlt.

Als weitere Hilfseinrichtung der Pilot-Anlage ist ein Hochvakuumpumpstand eingebaut, der zum Evakuieren der Anlage vor der Inbetriebnahme und zum Entgasen der inneren Oberflächen dient.

Alle Anlagenteile, die mit dem Verfahrensgas in Berührung kommen, wurden einheitlich aus vakuum-erschmolzenem austenitischem Edelstahl, Werkstoff-Nr. 1.4571, hergestellt.

Die Anlage wurde entsprechend dem Aufstellungsplan Abb. 3 in einer Halle von 8,4 m x 22,5 m Grundfläche untergebracht. Die Trenndüsenkaskade, die UF₆-Abscheidungsanlage und der Hochvakuumpumpstand sind allseitig zugänglich in der Hallenlängsachse aufgestellt. Aus vakuumtechnischen Gründen steht der Hochvakuumpumpstand zwischen den beiden anderen Anlagenteilen. Die zehn Stufen der Trenndüsenkaskade sind, zusammen mit den Kompressoren 0 und 11, in U-Form so angeordnet, daß Kopf- und Fuß-Stufe unmittelbar nebeneinander und nahe der UF₆-Abscheidungsanlage liegen. Dadurch ergibt sich zwischen diesen drei Punkten ein besonders kurzes und relativ einfaches Rohrleitungssystem. Die Versorgungsleitungen für Kühlwasser, Sperrmittel und Starkstrom sind in Kanälen im Fußboden verlegt. Alle Leitungen der elektrischen Meßwertübermittlung verlaufen in einer über der Trennkaskade aufgehängten Kabelbrücke.

16) Bei einer technischen Realisierung des Trenndüsenverfahrens würden voraussichtlich Turboverdichter verwendet werden. Bei der Pilot-Anlage wurden Rootsverdichter trotz ihres wesentlich schlechteren Wirkungsgrades benutzt, da sie sich ohne große Schwierigkeiten für einen wesentlich kleineren Durchsatz bauen lassen.

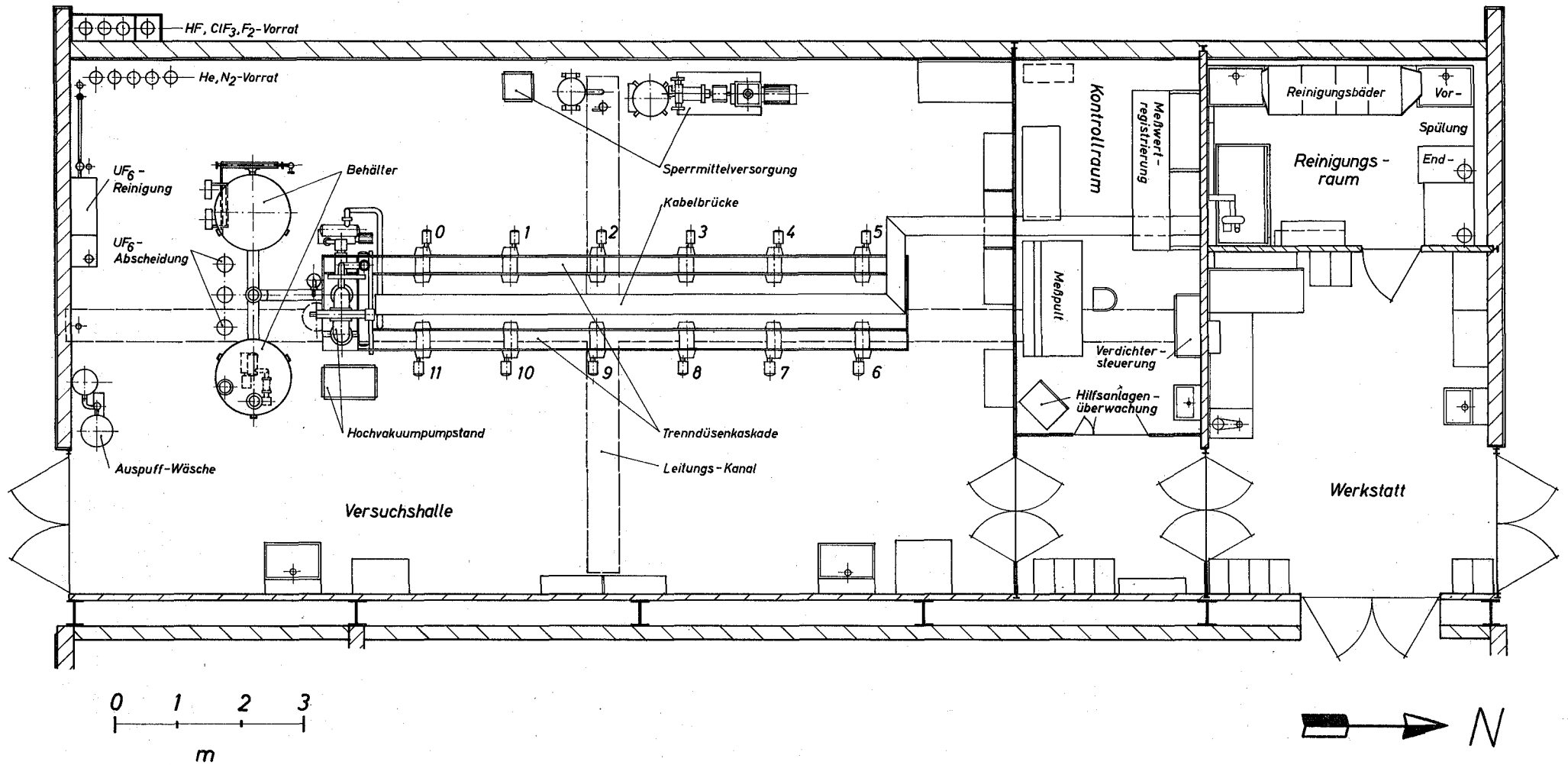


Abb. 3: Aufstellungsplan der Anlage

Die Halle wurde so ausgestattet, daß sich für Arbeiten an geöffneten Anlagenteilen erhöhte Sauberkeitsbedingungen einhalten lassen. Sie wird durch einen als Schleuse dienenden Windfang betreten, in dem Arbeitskleidung und Schuhe gewechselt werden können. Neben der Schleuse liegt der Kontrollraum, in dem die elektrischen Schalteinrichtungen und die Meßwertfassung untergebracht sind¹⁷⁾. Zum Anlagenbereich gehören ferner eine Werkstatt und ein Raum für die Reinigung und Oberflächenbehandlung ausgebauter Anlagenteile.

17) Die elektrischen Schalteinrichtungen und die Meßwertfassung werden im Rahmen einer anderen Arbeit beschrieben.

2. Die Trenndüsenkaskade

In dem Leitungsplan der Trenndüsenkaskade (Abb. 4) ist das Fließbild entsprechend der Abb. 2 durch eine größere Strichstärke hervorgehoben. Die übrigen Leitungsteile und die eingezeichneten Behälter dienen größtenteils der Versuchsvorbereitung und der Anlagenwartung. Darüber hinaus erlauben sie, das in Abb. 2 gezeigte Fließbild für spezielle Untersuchungen zu variieren.

Die einzelnen Stufen der Kaskade sind entsprechend der Abb. 5 in ein gemeinsames Profilstahl-Gestell eingebaut. Als tragendes Element für Verdichter (2) und Trennkammer (5) dient der untere Flansch der Ansaugleitung (19), der mit den Längsträgern des Gestells verschraubt ist. Dadurch können die am häufigsten zu wartenden bzw. zu verändernden Bauelemente relativ leicht und voneinander unabhängig aus- und eingebaut werden. Die Trennkammer (5) läßt sich gegenüber dem Verdichter mit dem Ventil (MV) absperren. Die Trenndüse (6) ist mit einem Blindflansch (8) und langen Zugschrauben auf den Deckel (7) der Trennkammer so aufgesetzt, daß sich die Verbindungen zu den in den Deckel führenden Leitungen (17) des Ausgangsgases und die Ableitung (18) der schweren Fraktion unmittelbar ergeben⁹⁾. Nach Lösen der Leitungsverbindung an den Absperrventilen (DV) und (KV) kann die Trenndüse zusammen mit dem Trennkammerdeckel leicht ausgetauscht werden. In die Ansaugleitung mündet über das Ventil (RV) die Rückführungsleitung (18'), durch die der Verdichter die schwere Fraktion der übernächsten Trenndüse ansaugt. Der Verdichter fördert das Verfahrensgas über das T-Stück (20) und die Trenndüsenzuleitung (17') zur nächsten Trenndüse. Zur Leistungsregelung des Verdichters dient das Nebenschluß-Ventil (NV). Das an den Druckstutzen des Verdichters angeflanschte T-Stück (20) stellt zugleich die Verbindung dieser Stufe mit der Hauptvakuumleitung (1) her. Sie wird durch das Ventil (VV) abgesperrt. Beim Evakuieren der Einzelstufe über diesen Pumpanschluß läßt sich der

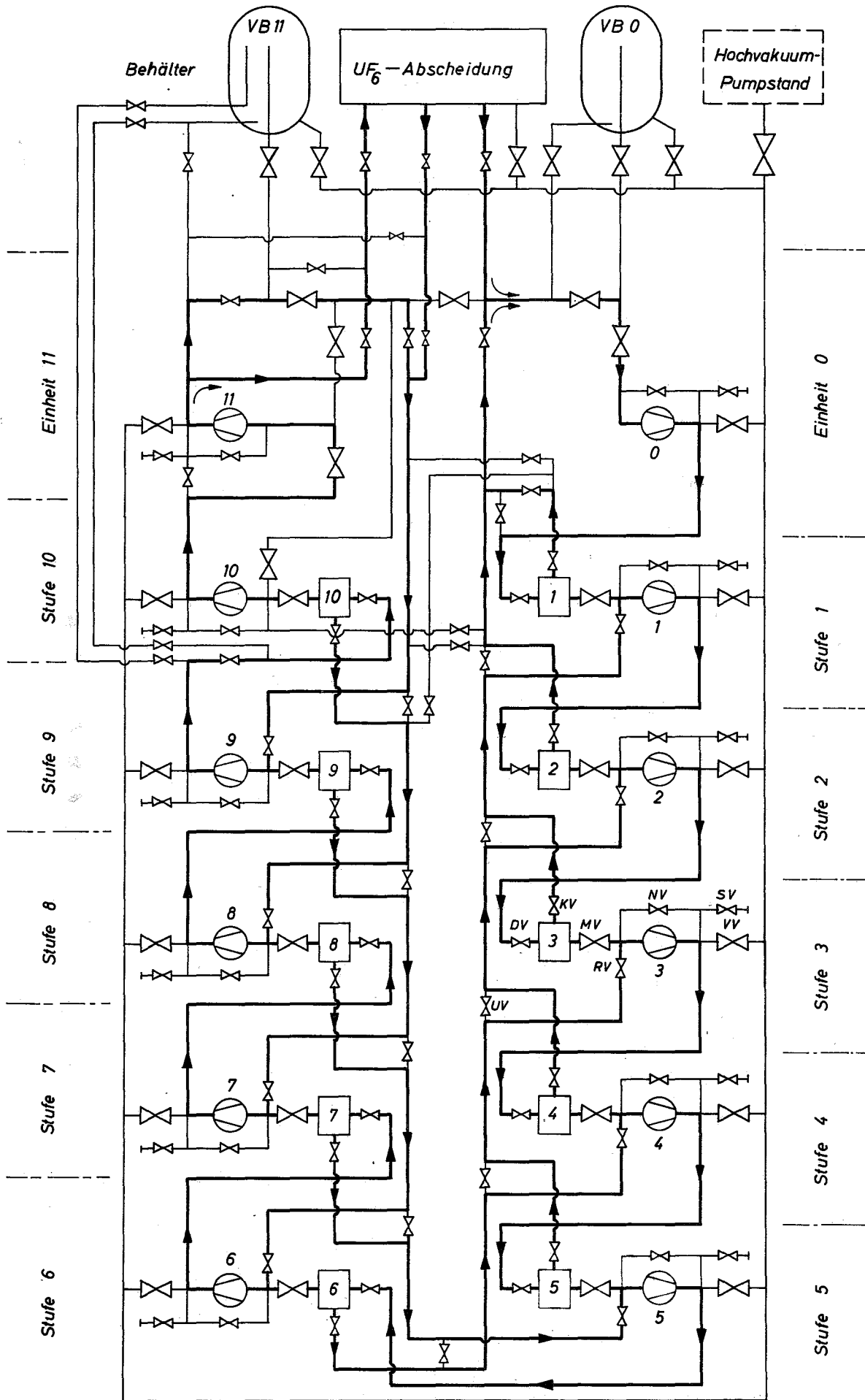


Abb.4 Leitungsplan der Trenndüsenkaskade

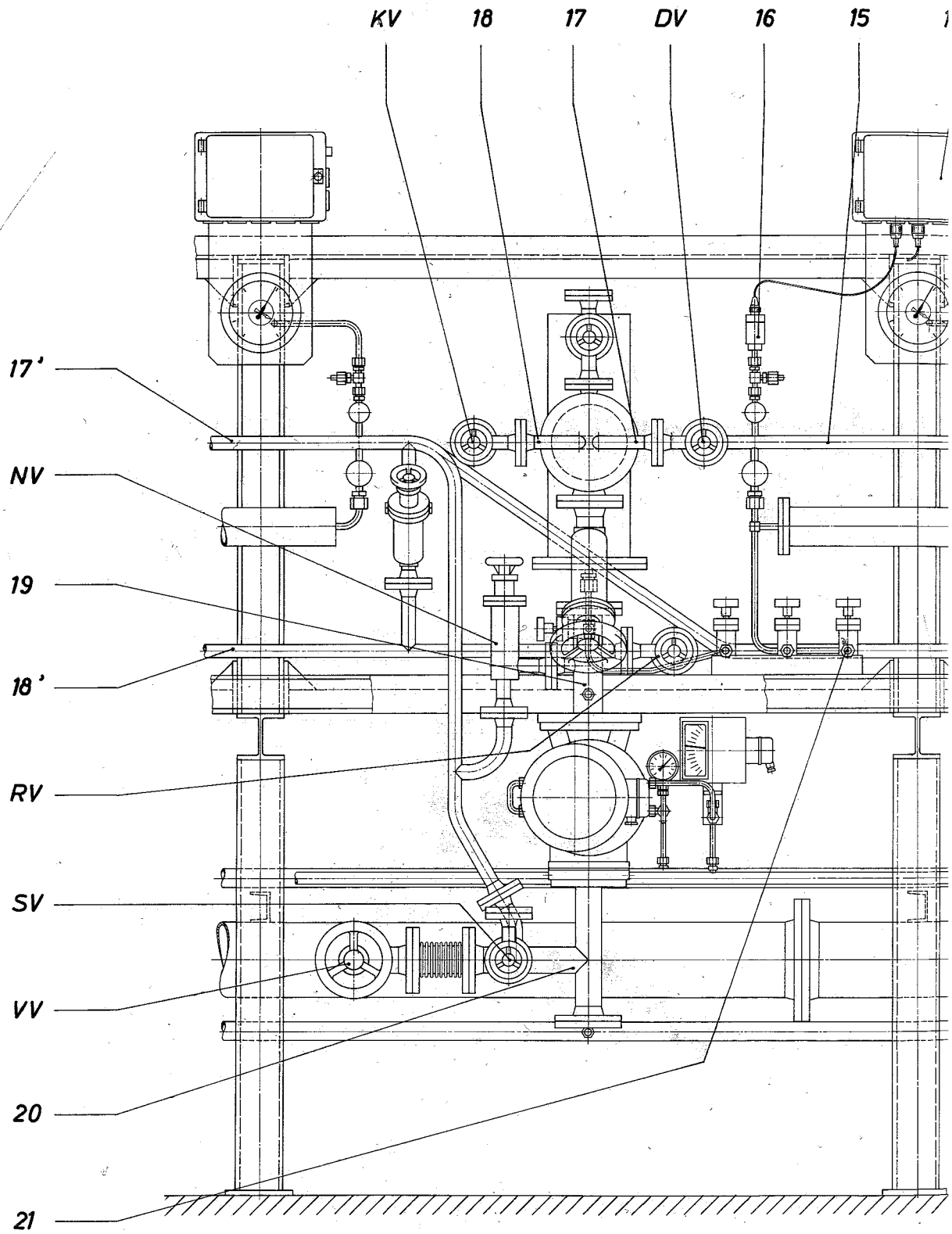
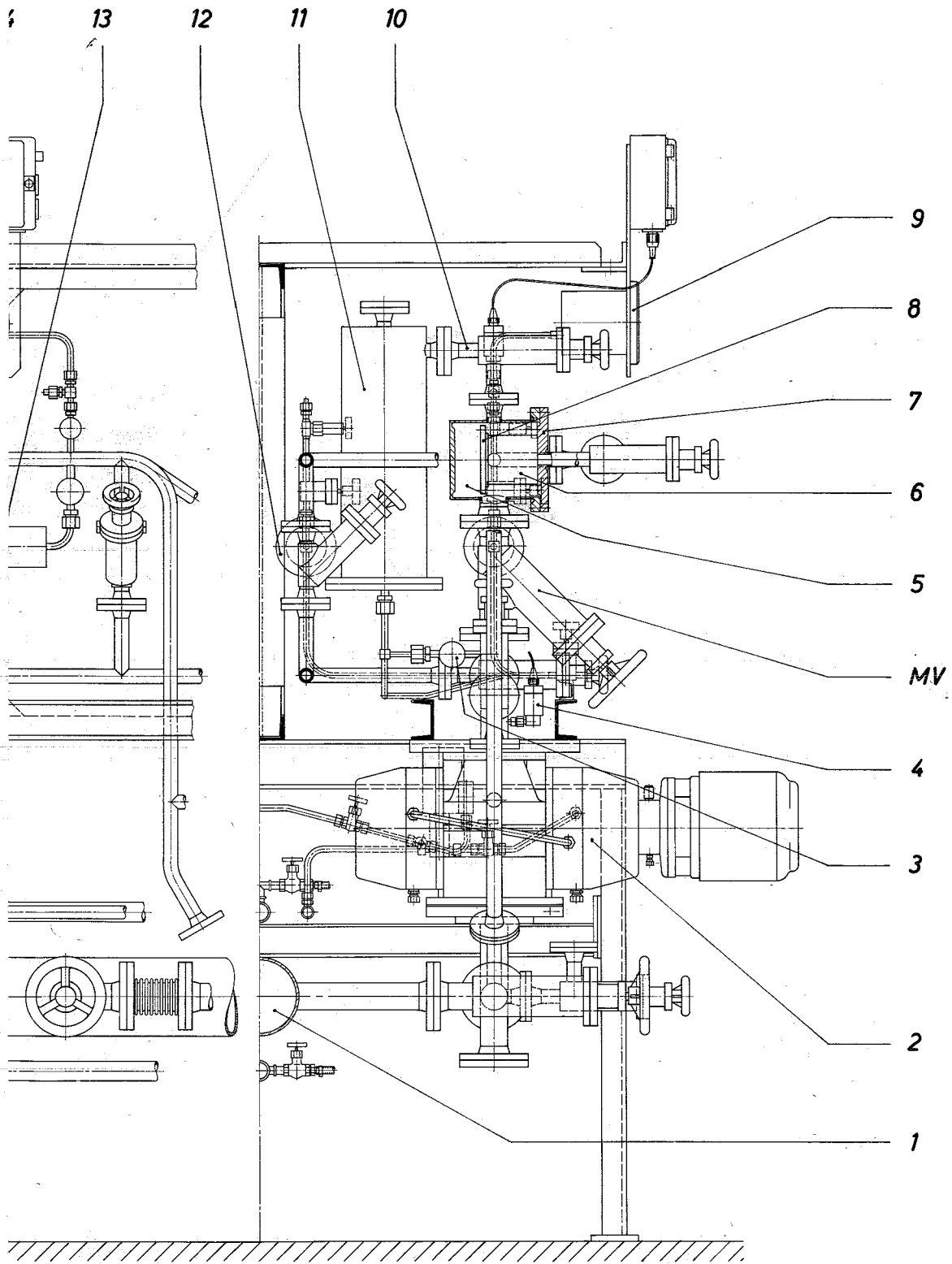


Abb.5 Aufbau einer Einzelstufe



der Trenndüsenkaskade

Rootsverdichter zur Erhöhung der Saugleistung benutzen. An das normalerweise mit einem Blindflansch abgeschlossene Ventil (SV) können Hilfseinrichtungen, wie Lecksuchgerät oder Restgasanalysator, angeschlossen werden. Außerdem läßt sich über dieses Ventil die Einzelstufe mit Hilfe eines fahrbaren Pumpstandes entleeren.

In Tabelle 1 sind die gasdynamischen Kenngrößen der beiden langen, mit dem größten Druckabfall behafteten Verbindungsleitungen der Trenndüsenkaskade aufgeführt. Die Berechnung der Druckverluste wurde für Laminarströmung unter Benutzung einer effektiven Leitungslänge ausgeführt, in der Ventile und Krümmungen in üblicher Weise mit einem Vielfachen ihrer Einbaulänge erfaßt sind¹⁸⁾. Als Verbindungselemente von Rohrleitungen und Bauteilen dienen Flansche mit zurückgesetzter Dichtfläche und Viton-O-Ring-Dichtung¹⁹⁾. Die Kompression der O-Ringe beträgt 30% des Nenndurchmessers, ihre Härte liegt zwischen 65 und 70^o Shore. Die Dichtringe werden vor dem Einbau mit Leichtbenzin entfettet und anschließend durch Erwärmen auf 150^oC im Vakuum entgast.

Die entsprechend den verwendeten Rohrabmessungen mit den Nennweiten von 10, 25 und 50 mm ausgeführten Ventile sind mit Faltenbalgabdichtung der Ventilspindel und Viton-O-Ring-Dichtung am Sitz versehen. Bei der Konstruktion wurde besonders auf spaltfreie Schweißnähte, Vermeidung von schlecht evakuierbaren Teilvolumina und auf gut zu reinigende, glatte Oberflächen Wert gelegt²⁰⁾. Alle Durchgangsventile und die Eckventile NW 10 besitzen geschmiedete Gehäuse-Grundkörper, die nach Anschweißen der Flansche und der Balgkammer innen spanabhebend bearbeitet wurden. Die Gehäuse der übrigen Ventile sind geschweißt.

18) Vgl. z.B.: B. Eck: Technische Strömungslehre, Braunschweig 1949.

19) Die Flanschabmessungen entsprechen DIN 2632, Vgl.¹⁰⁾

20) Die Ventile wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Heraeus Hochvakuum GmbH., Hanau, entworfen. Sie stellen eine Weiterentwicklung der in⁹⁾ bzw.¹⁰⁾ benutzten Ventile dar.

Leitungsteil		Trenndüsenzuleitung (17') Ventil (DV), Leitung (17)	Rückführungsleitung für schwere Fraktion (18), Ventil (KV), Leitung (18')	
Stromstärke:	UF ₆	gMol/h	3,0	1,5
	He	gMol/h	57,0	8,5
	Gemisch	gMol/h	60,0	10,0
UF ₆ -Konzentration		Mol %	5	15,0
Mittl. Molekulargewicht		g/Mol	21,4	56,2
Druck		Torr	48	16
Volumenstrom		m ³ /h	23	11,5
Nennweite NW		mm	25	25
Strömungsgeschwindigkeit		m/s	13,0	6,5
Reynolds-Zahl Re		-	960	420
Tatsächliche Leitungslänge		m	2,2	4,2
Effektive Leitungslänge		m	2,7	5,2
Berechneter Druckabfall		Torr	0,27	0,26

Tab. 1: Die gasdynamischen Kenngrößen der beiden langen, mit dem größten Druckabfall behafteten Verbindungsleitungen der Trenndüsenkaskade. Die angegebenen Werte gelten für 20°C.

Die Spindeleinsätze für die Eck- und Durchgangsventile jeder Nennweite sind identisch. Bei den Ventilen der Nennweiten NW 25 und NW 50 ist am austretenden Spindelschaft zusätzlich eine O-Ring-Dichtung vorgesehen. Ein Anschluß an die auf diese Weise gebildete Sperrkammer ermöglicht eine Leckkontrolle des Balges in beiden Richtungen. Während des Versuches kann dabei das im Verfahrensgas enthaltene Helium als Testgas benutzt werden. Normalerweise ist der Sperrkammeranschluß jedoch verschlossen. Die O-Ring-Dichtung stellt dann eine zusätzliche Sicherheit gegen Lufteinbruch in die Anlage dar. Die Ventile können durch Anschrauben eines Regelkonus unter den Ventilteller verschiedene Durchflußkennlinien erhalten und somit auch als Regelventile eingesetzt werden. Bei den Nennweiten NW 25 und NW 50 ist für diese Anwendung eine Stellungsanzeige vorgesehen. Der Hub des Ventiltellers beträgt durchweg 80 % der Nennweite. Diese Ventile lassen sich bei Bedarf mit elektrischen Stellantrieben versehen.

Für die Meßanschlüsse der Trenndüsenkaskade sind serienmäßige Kleinventile aus Edelstahl mit Faltenbalgdichtung²¹⁾ in die Leitungen eingeschweißt. Die Meßgeräte werden über Kleinverschraubungen NW 8 angeschlossen, die mit einem zwischen Nut und Feder eingelegten Teflon-Ring abgedichtet sind. In jeder Stufe (vgl. Abb. 5) messen zwei elektrische Druckaufnehmer (4) und (16)²²⁾ den Ansaugdruck p_A und den Gegendruck p des Verdichters. Ein direkt anzeigendes Kapselfeder-Manometer (9)²³⁾ für den Druck p , der mit dem Düsen-vordruck der nächsten Stufe identisch ist, erleichtert die Einstellung der Drucke an jeder Stufe. In den Düsenzuleitun-

21) Hersteller: Hoke Inc., Cresskill, N.J. (USA), Type 4251 N6Y, Nennweite 5/32"

22) Meßbereich 0 - 50 Torr und 0 - 125 Torr, Hersteller: C.E.C., Pasadena, USA, Type 4-353-0001

23) UF₆-feste Kapselfederanometer mit einem Meßbereich von 0 - 1000 Torr bei 10 Zeigerumdrehungen, Hersteller: Appleby und Ireland, Basingstoke, England

gen und den Rückführungsleitungen für die schwere Fraktion sind die Meßanschlüsse in einheitlichen Meßstrecken (15) mit parallel zur Leitung liegenden Probeentnahmebehältern, (13) und (12), kombiniert. Diese Behälter können vom Verfahrensgas durchspült werden und lassen sich mit den eingeschweißten Ventilen NW 10 isolieren. Die Behälterinhalte können zur gravimetrischen Messung der UF_6 -Konzentration und für die massenspektrometrische Isotopenhäufigkeitsmessung über die Ventile (21) entnommen werden. Ein entsprechender Probebehälter (11) für die leichte Fraktion jeder Trenndüse ist über die Ventile (3) und (10) parallel zum Ventil (MV) angeschlossen. Die drei Probeentnahmeventile (21) sind in jeder Stufe zu einer Batterie zusammengefaßt, über die mit einem fahrbaren Entnahmestand alle drei Behälter gleichzeitig entleert werden können. Die Volumina dieser Behälter wurden so gewählt, daß sie unter normalen Betriebsbedingungen eine für die massenspektrometrische Analyse ausreichende UF_6 -Menge (ca. 0,1 g) enthalten. Für die Behälter (12) und (13) mit je 2 Liter Inhalt ergibt sich bei voll geöffneten Verbindungsventilen ein zwei- bzw. vierfacher Gaswechsel je Minute. In dem 10 Liter-Behälter (11) der leichten Fraktion wird bei einem am Ventil (MV) eingestellten Druckabfall von 0,1 Torr ein einfacher Gaswechsel pro Minute erreicht. Unter Benutzung der zusätzlichen Meßanschlüsse (Ventile NW 5/32") der Meßstrecken (15) können bei Bedarf Durchflußmesser und / oder Konzentrationsmeßgeräte angeschlossen werden. Die zur zentralen Meßwert Erfassung im Kontrollraum führenden elektrischen Anschlußleitungen der Meßgeräte enden an jeder Stufe in einem gekapselten Verteiler (14), an den sich die einzelnen Meßwertnehmer mit Steckverbindungen anschließen lassen.

In Abb. 6 ist die gesamte Trenndüsenkaskade dargestellt. Unter der Kaskade ist die Hauptvakuumleitung (2) mit ihren Anschlüssen (1) zu den zwölf Einheiten, mit dem Saugstutzen (5)

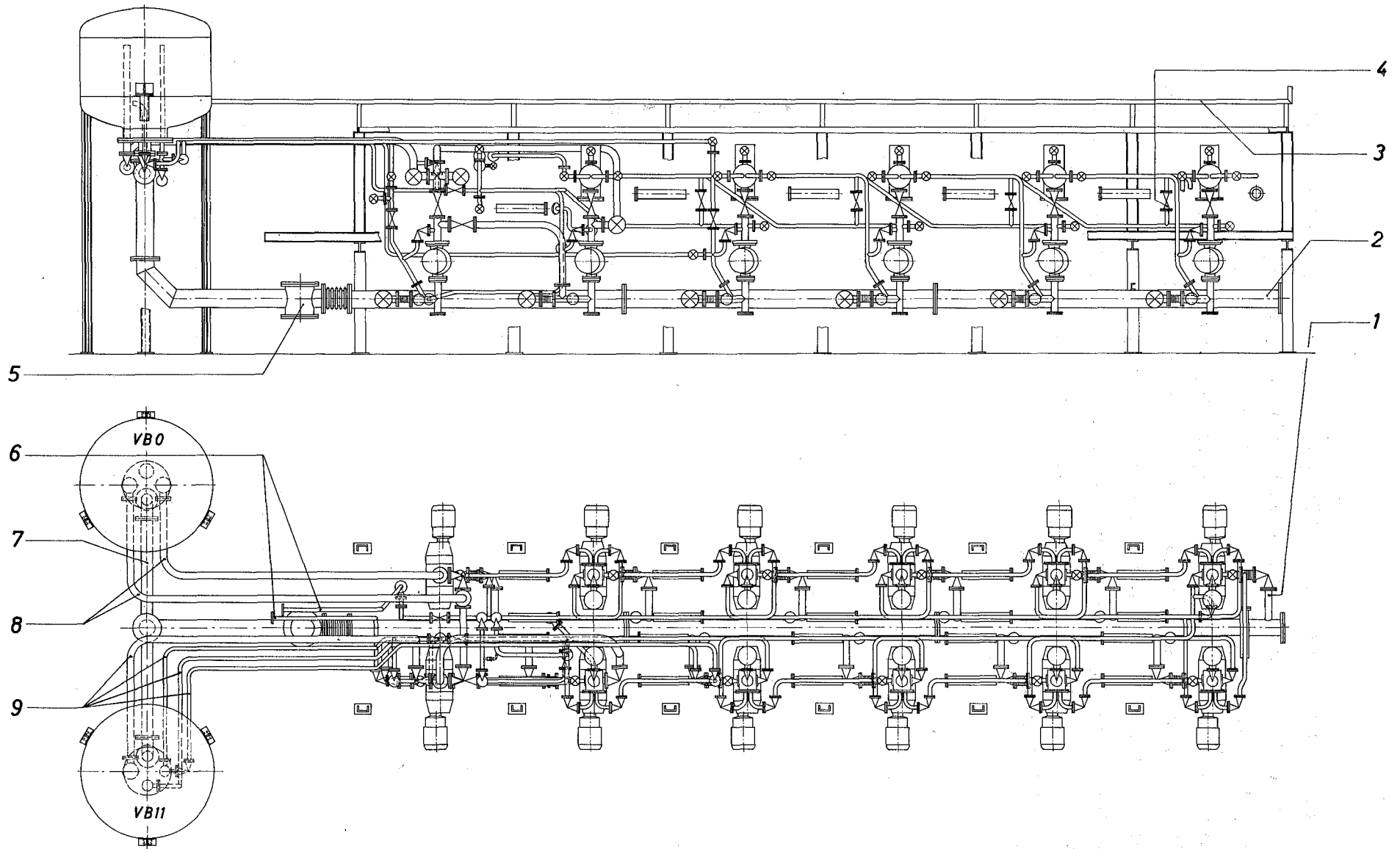


Abb. 6: Aufbau der gesamten Trenndüsenkaskade mit Vorratsbehältern VBO und VB11 ohne Hochvakuum pumpstand und ohne UF_6 -Abscheidung.

des Vakuumpumpstandes (vgl. Abschnitt 4) und den Anschlußleitungen (7) zu den Vorratsbehältern VB 0 und VB 11 aufgehängt. Ferner sind die von den Endstufen zu den beiden Behältern und der UF_6 -Abscheidungsanlage (vgl. Abschnitt 3) führenden Verfahrensleitungen (6), (8) und (9) eingezeichnet. Zwischen den Stufen erkennt man die in die Rückführungsleitungen der schweren Fraktion eingesetzten Überbrückungen mit den Ventilen UV (4). Alle gleichartigen Anlagenteile sind untereinander austauschbar.

3. Die UF₆-Abscheidungsanlage

Von der UF₆-Abscheidungsanlage sind stündlich ungefähr 1,25 gMol = 440 gUF₆ aus 40 gMol Helium abzuscheiden. Das UF₆ soll in die Anlage zurückgespeist oder durch neues UF₆ ersetzt werden.

Als Abscheidungsverfahren für die relativ kleinen UF₆-Mengen wurde der Einfachheit halber die Kondensation in Tiefsttemperaturfallen mit flüssigem Stickstoff als Kühlflüssigkeit gewählt. Bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs hat UF₆ einen vernachlässigbar kleinen Dampfdruck ($1 \cdot 10^{-18}$ Torr). Nach Untersuchungen von D. Gupta und S.N. Ray²⁴⁾ kann die Abscheidung des UF₆ jedoch durch Nebelbildung stark beeinträchtigt werden. Der Kondensationsvorgang muß daher so gesteuert werden, daß die gewünschte Partialdruckerniedrigung des UF₆ ohne größere Übersättigung der Gasphase verläuft. Zu diesem Zweck wird das Gemisch in einer Kühlfalle mit relativ schlechten Wärmeübertragungseigenschaften verhältnismäßig langsam von Zimmertemperatur auf die Badtemperatur des flüssigen Stickstoffs heruntergekühlt. Durch eine Füllkörperschüttung wird dem UF₆ dabei eine große Kondensationsfläche geboten. Der für diese Arbeitsweise günstigste Temperaturgradient in Strömungsrichtung und senkrecht dazu wurde von D. Gupta und S.N. Ray mit einer Gegenstrom-Ringspalt-Kühlfalle kleiner Kapazität ermittelt. Die dort erhaltenen Ergebnisse wurden unter Benutzung der thermodynamischen Ähnlichkeitsgesetze auf die Bedingungen der Versuchsanlage umgerechnet.

Die Konstruktion des UF₆-Abscheiders geht aus dem Schnitt Abb. 7 hervor: Die Kühlfalle besteht aus zwei konzentrischen Rohren, dem Mantelrohr (1) mit der Nennweite 75 mm und dem

24) Arbeitsberichte KVT 20/27 und KVT 31/2 des Instituts für Kernverfahrenstechnik

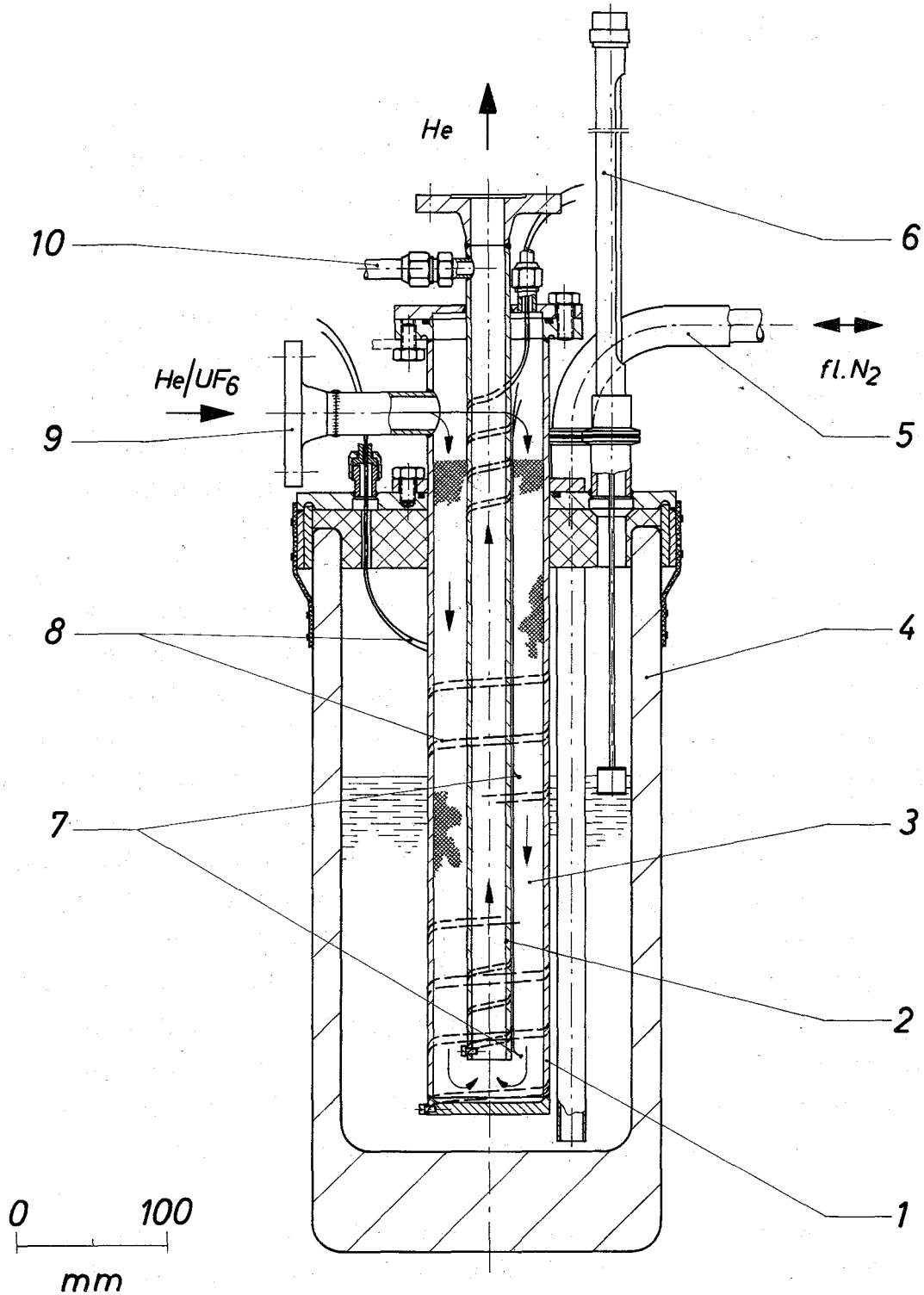


Abb. 7: Längsschnitt durch den UF₆-Abscheider

Tauchrohr (2) mit der Nennweite 25 mm. Sie bilden zusammen den Ringspaltquerschnitt (3), der mit Maschendraht-Dixonringen von 3 x 3 mm Durchmesser gefüllt ist. Die Einspeisung des UF_6/He -Gemisches erfolgt durch den seitlichen Anschlußstutzen (9). Das Helium verläßt die Falle durch das Tauchrohr (2).

Der flüssige Stickstoff wird durch gasförmigen Stickstoff mit konstanter Stromstärke aus der Vorratskanne über den Heber (5) in das Dewargefäß (4) gedrückt. Die Strömungsgeschwindigkeit des gasförmigen Stickstoffs wird dabei mit einem Durchflußmesser bestimmt und mit einem Nadelventil geregelt. Das langsame Ansteigen des Kühlmittelniveaus bewirkt, daß längs der Falle ein UF_6 -Niederschlag mit annähernd konstanter Belegungsichte entsteht.

Nach Beendigung einer Abscheidungsperiode kann das Kühlmittel aus dem Dewargefäß wieder in das Vorratsgefäß zurückgedrückt werden. Das abgeschiedene UF_6 wird durch den seitlichen Abgang (10) am Tauchrohr entnommen, wobei der Entleervorgang durch Aufheizen der Falle mit der am Mantel- und Tauchrohr angebrachten Heizwicklung (8) beschleunigt werden kann. Zur Überwachung der Temperaturen in der Füllkörperschüttung während des Abscheide- und Entleervorganges sind zwei Thermoelemente (7) eingebaut. Die aus den Vorversuchen extrapolierte maximale Beladung eines UF_6 -Abscheiders beträgt 1,5 kp UF_6 . Die Auslegung für optimalen Abscheidegrad sieht eine Beladung mit 1 kp UF_6 vor. Damit ist eine Abscheidedauer von ca. 2,2 h mit einem Abscheider möglich.

Um einen kontinuierlichen Betrieb zu ermöglichen, ist die Anlage mit zwei gleichartigen UF_6 -Abscheidern der vorbeschriebenen Art ausgestattet, die abwechselnd betrieben werden können. In Abb. 8 ist der komplette Rohrleitungsplan der UF_6 -Abscheidungsanlage wiedergegeben, in den

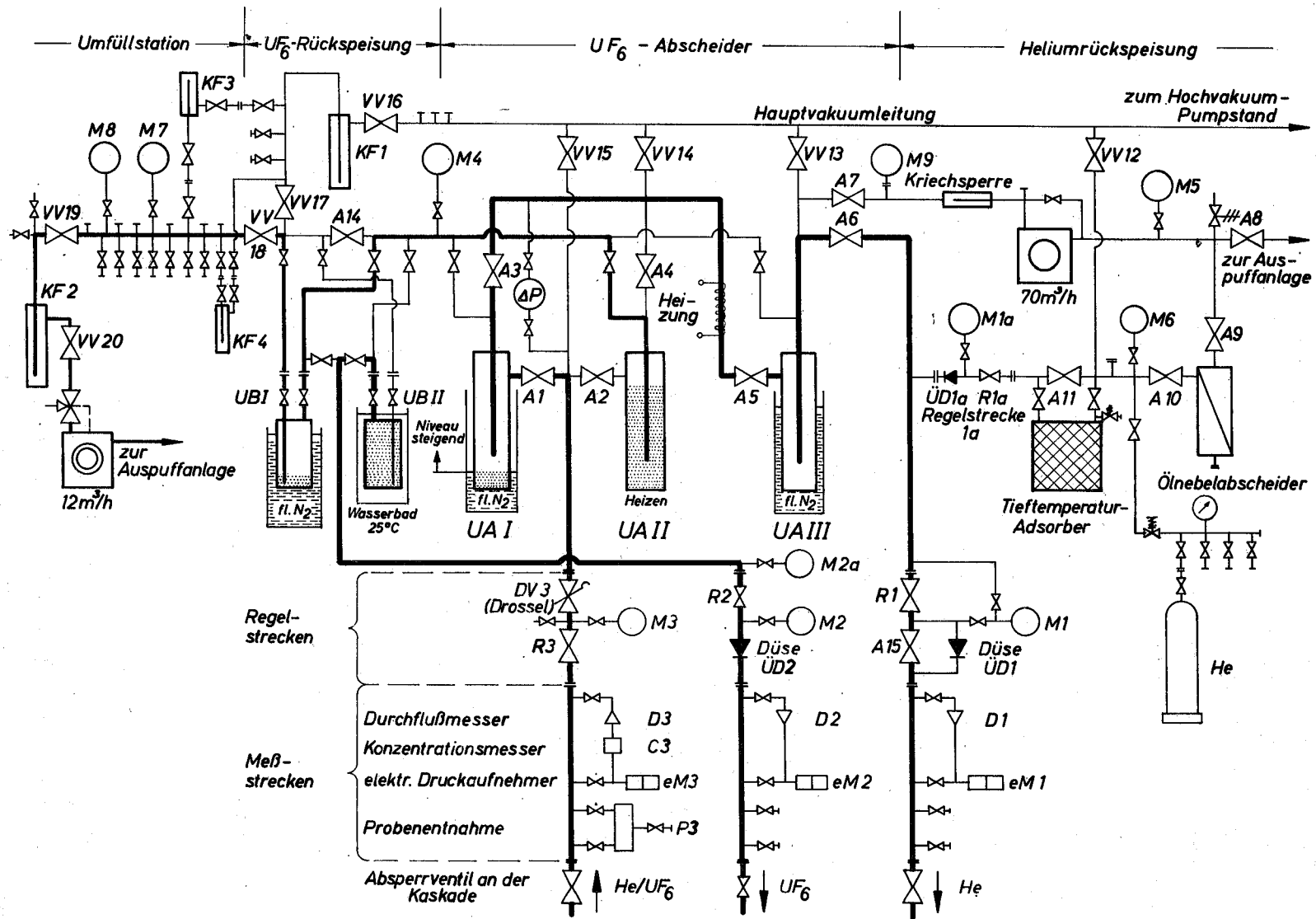


Abb. 8: Rohrleitungsplan der UF_6 -Abscheidungsanlage.

Mit größerer Strichstärke ist das Fließbild für Dauerbetrieb mit geschlossenem Heliumkreislauf und Wechselbetrieb der Abscheider eingezeichnet.

das Fließbild für Dauerbetrieb mit geschlossenem Heliumkreislauf und Wechselbetrieb der beiden Abscheider mit größerer Strichstärke eingezeichnet ist. Das UF_6 -Helium-Gemisch wird vom Kopf der Kaskade (Einheit 11, Abb. 4) über eine Meß- und Regelstrecke dem UF_6 -Abscheider UAI zugeführt. Das aus dem UF_6 -Abscheider austretende Helium wird in einer beheizten Rohrleitung auf Raumtemperatur erwärmt, damit gegebenenfalls als Aerosol mitgeführte UF_6 -Teilchen wieder verdampfen. Ein derartiger Restgehalt an UF_6 soll dann im nachgeschalteten Sicherheitsabscheider UAIII ausgeschieden werden. Bei diesem Abscheider wird das Niveau des flüssigen Stickstoffes mit einer automatischen Nachfüllvorrichtung ständig konstant gehalten. Das UF_6 -freie Helium wird schließlich über eine weitere Meß- und Regelstrecke an den Kaskadenfuß zurückgeführt. Je nach Betriebsdruck in der UF_6 -Abscheidung wird es ausschließlich in dem Regelventil R1 oder zusätzlich in der Überschalldüse ÜD1 auf den Ansaugdruck von 16 Torr des Verfahrensverdichters Nr. 0 der Kaskade expandiert.

Gleichzeitig mit dem Abscheidevorgang wird reines UF_6 aus dem Vorratsbehälter UBII an den Kopf der Kaskade zurückgespeist. Die Temperatur dieses Behälters und damit der UF_6 -Dampfdruck wird mit einem thermostatisierten Wasserbad konstant gehalten. Mit dem Feinregulierventil R2 und der Überschalldüse ÜD2 wird die UF_6 -Stromstärke dosiert. Es sind zwei Vorratsbehälter in Form von Tauchrohrpipetten mit je zwei Absperrventilen vorgesehen. Das Volumen beträgt 1 Liter, das UF_6 -Fassungsvermögen max. 1,5 kp. Der Füllzustand der Behälter kann während des Versuchsbetriebes mit einer Wiegeeinrichtung überwacht werden. Dazu sind die Behälter jeweils an einer Präzisions-Hängewaage aufgehängt und über hochelastische Edstahlbälge mit dem starren Leitungssystem verbunden. Die Führung der Behälter erfolgt durch ein Parallelgestänge, an dem Tariergewichte angebracht werden können, wenn der Anzeigebereich der Waagen nicht ausreicht.

Während des laufenden Abscheide- und Rückspeisevorganges kann das aus dem vorangegangenen Arbeitszyklus im Abscheider UAI in niedergeschlagene UF_6 in den leeren UF_6 -Behälter UBI überdestilliert werden. Dazu wird der Abscheider elektrisch aufgeheizt, während gleichzeitig über dem tiefgekühlten Behälter UBI abgepumpt wird. Die abwechselnde Benutzung der Fallen UAI und UAI in bzw. der Behälter UBII und UBI ermöglicht einen kontinuierlichen Betrieb der Anlage. Zum Evakuieren der verschiedenen Teile ist die UF_6 -Abscheidungsanlage über die Absperrventile VV12 bis VV17 an die Hauptvakuumleitung angeschlossen.

Die Bilanzierung der Materialströme, die zwischen der Kaskade und der UF_6 -Abscheidungsanlage übertragen werden, erfolgt mit den in die Verbindungsleitungen zwischen beiden Anlagenteilen eingebauten Meßstrecken. Sie bestehen aus Meßrohren von 1000 mm Länge, an welche die Meßgeräte über absperrbare Meßanschlüsse angeschlossen sind. Die Meßrohre sitzen zwischen zwei Flanschen, so daß sie leicht ausgebaut und umgerüstet werden können. Alle Meßstrecken sind mit im Nebenstrom eingebauten thermischen Durchflußmessern²⁵⁾ (D1 bis D3) und elektrischen Druckaufnehmern²²⁾ (eM1 - eM3) ausgerüstet. Die Meßstrecke in der Helium/ UF_6 -Zuleitung ist zusätzlich mit einer UF_6 -Konzentrationsmeßzelle²⁶⁾ C3 und einem Probeentnahmebehälter P3 versehen. Der Druckabfall in den UF_6 -Abscheidern wird mit einem Differenzdruckmanometer²⁷⁾ ΔP gemessen. Mit dieser Messung kann der Beladungszustand der Tieftemperaturfallen kontrolliert werden. Das Anzeigerät hat einstellbare Schaltkontakte, die bei Überschreiten

25) Micro Débitmètre, Hersteller: DAM, Lyon, Frankr., Type: U60

26) Wärmeleitzone: Entwickelt und gebaut im Institut f. Kernverfahrenstechnik

27) Differenzdruck-Manometer, Hersteller: Appleby & Ireland, Basingstoke (England), Type DPT 210

eines vorgewählten Differenzdruckes Warnleuchten betätigen. Mehrere direktanzeigende Druckmeßgeräte²⁸⁾ dienen der Anlagenüberwachung. Die Manometer M1 bis M3 messen die Betriebsdrücke bzw. bei Benutzung der eingebauten Überschalldüsen ÜD1, ÜD1a und ÜD2 oder der fest einstellbaren Drosselstelle DV3 die Molstromstärken der Materialströme. Das Manometer M2a an den UF₆-Vorratsbehältern UBI und UBII zeigt den Behälterdruck und damit den verfügbaren Regelbereich vor der Überschalldüse ÜD2 an.

Das umlaufende Helium kann bei Bedarf in einem mit Silikagel gefüllten und mit flüssigem Stickstoff gekühlten Tieftemperatur-Adsorber von eingedrungenen Luftspuren befreit werden. In diesem Fall saugt eine Sperrschieberpumpe²⁹⁾ das Helium an, verdichtet und fördert es über einen Ölnebelabscheider in den Adsorber. Die Entspannung des gereinigten Heliums auf Anlagendruck erfolgt in der Regelstrecke 1 a. Beim Betrieb der UF₆-Abscheidungsanlage mit offenem Heliumkreislauf wird das Helium aus dem Sicherheitsabscheider UAIII von der Sperrschieberpumpe angesaugt und aus dem Kreislauf direkt in die Auspuffwaschanlage gefördert. Gleichzeitig wird die entsprechende Menge Helium aus Vorratsflaschen nach der Reinigung in dem Tieftemperatur-Adsorber an den Kaskadenfuß zurückgespeist. Die Regelung von Druck und Stromstärke erfolgt wieder durch die Regelstrecke 1 a.

28) M5 und M6 sind handelsübliche Edelstahlfeinmeßmanometer, Meßbereich: 0 bis 3,5 ata, Hersteller: Fa. A. Wiegand, Klingenberg/M.; M9 ist ein Membranvakuummeter der Fa. Heraeus, Hanau, Type Diavac; M8 ist ein Wärmeleitvakuummeter der Fa. Heraeus, Type LKB-Autovac. Die übrigen Druckmeßgeräte sind UF₆-feste Kapselfederanometer²³⁾.

29) Die Sperrschieberpumpe, Fabrikat Heraeus, Type E70, hat ein Saugvermögen von 70 m³/h. Sie wird mit einer Füllung von UF₆-beständigem KEL-F 10 Öl betrieben und ist saugseitig⁶⁾ zur Vermeidung von Ölrückströmung in den Sicherheitsabscheider mit einer Kriechsperre versehen.

Zum Entleeren der Kaskade können die kondensierbaren Anteile des Verfahrens- und Passivierungsgases³⁰⁾ in den UF₆-Abscheidern UAI oder UAI_{II} und UAI_{III} abgeschieden werden. Das Helium bzw. der im Passivierungsgas enthaltene Stickstoff werden mit der Sperrschieberpumpe auf Atmosphärendruck verdichtet. Der Stickstoff wird über die Auspuffwaschanlage ins Freie gepumpt, während das Helium, nach vorheriger Reinigung im Adsorber, in einem der beiden Behälter VB 0 oder VB 11 gespeichert werden kann. Zur Unterstützung des Entleervorganges können die laufenden Stufenverdichter der Kaskade in Reihe geschaltet werden, wodurch der Druck in der Anlage auf 10⁻² bis 10⁻³ Torr erniedrigt wird. Die Evakuierung auf weniger als 10⁻⁵ Torr übernimmt dann der Hochvakuumpumpstand.

Versuchsvorbereitungen, wie Einfüllen von UF₆ und Passivierungsgas, Entleeren und Reinigen von Meßpipetten für massenspektrometrische Untersuchungen u.a., werden an der Umfüllstation durchgeführt (vgl. Abb. 8). Sie besteht aus einem Vakuumverteiler, der über die Tauchrohrkühlfallen KF 1 und KF 2 an die Hauptvakuumleitung bzw. eine rotierende Vakuumpumpe angeschlossen ist.

Abb. 9 zeigt eine schematische Darstellung der UF₆-Abscheidungsanlage. Die einzelnen Anlagenkomponenten gruppieren sich unter und zwischen den beiden hochstehenden Vorratsbehältern VB 0 und VB 11. In einem an den Behälterstützen angebrachten Gerüst sind die UF₆-Abscheider UAI und UAI_{II} sowie der Sicherheitsabscheider UAI_{III} befestigt. Man erkennt die dazu gehörigen Vorratsgefäße für flüssigen Stickstoff, die über Nachfüllvorrichtungen mit den Dewargefäßen der Abscheider verbunden sind. Unterhalb des Behälters VB 0 sind die Vorratsbehälter für UF₆ (UBI und UBII) an den Wiegeeinrichtungen aufgehängt. Die Umfüllstation ist seitlich an den Stützen des Behälters installiert. Unter dem Behälter VB 11 befinden sich

30) Als Passivierungsgas wird ein Gemisch von 20 Vol% ClF₃ und 80 Vol% N₂ unter 150 Torr verwendet¹⁰⁾.

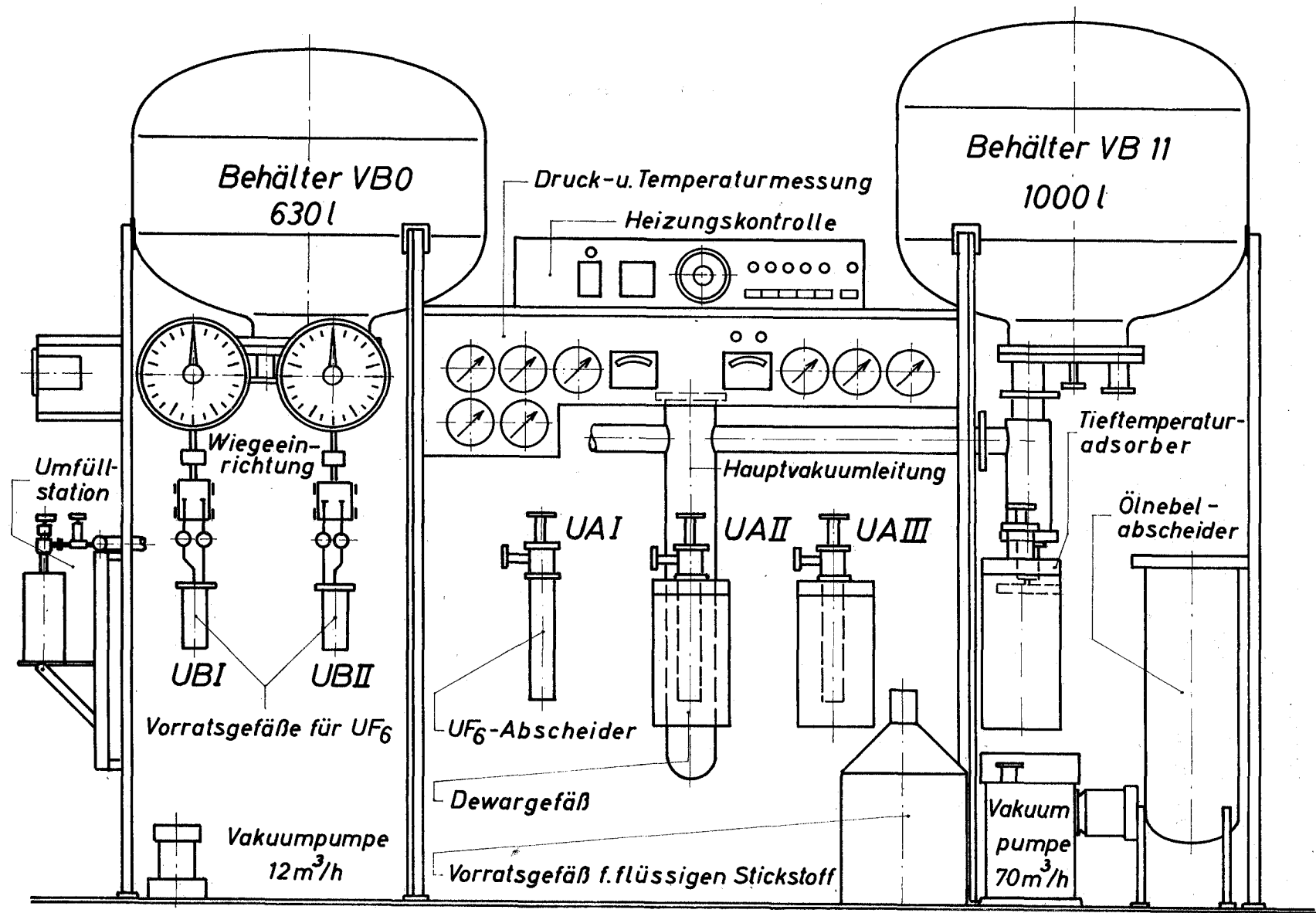


Abb. 9: Schematische Darstellung der UF_6 -Abscheidungsanlage

die Anlagenteile für die Heliumreinigung: die Sperrschieberpumpe, der Ölnebelabscheider und der Tieftemperaturadsorber. Über den UF_6 -Abscheidern ist die Instrumententafel mit den Druckmeßgeräten und den Anzeigeelementen der Thermoelemente angebracht. Darüber angeordnet sind die Stromversorgung und die Meßinstrumente für die Heizung der UF_6 -Abscheider.

4. Das Vakuumsystem

Mit dem Vakuumsystem soll die Anlage entleert und ungefähr innerhalb einer Stunde auf einen Enddruck $< 10^{-5}$ Torr gebracht werden. Das Vakuumsystem soll ferner die Möglichkeit bieten, das Verfahrens- oder Passivierungsgas in Notfällen innerhalb weniger Minuten aus der Anlage zu entfernen³¹⁾. Da der Pumpstand weitgehend unbeaufsichtigt laufen soll, wurde er mit einer selbsttätigen Steuerung versehen, die die geforderten Evakuierungsvorgänge nach Maßgabe der anfallenden Gasmengen automatisch ablaufen läßt.

Abb. 10 zeigt den Leitungsplan des Hochvakuumumpstandes mit den verwendeten Rohrabmessungen und den Nenn-Saugleistungen der Pumpen. Das Fließbild des normalen Hochvakuumbetriebes ist durch größere Strichstärke hervorgehoben. Eine Öldiffusionspumpe mit einer Saugleistung von 3000 l/s im Druckbereich unter 10^{-3} Torr ist über die mit flüssigem Stickstoff gekühlte Falle F1 an die Hauptvakuumleitung angeschlossen, die zu allen Stufen der Trennkaskade, zu der UF_6 -Abscheidungsanlage und zu den Behältern führt. Das Vorvakuum wird von einer zweistufigen Sperrschieberpumpe (Saugleistung $90 \text{ m}^3/\text{h}$) mit vorgeschalteter Rootspumpe (Saugleistung $400 \text{ m}^3/\text{h}$) aufrechterhalten.

Steigt bei stärkerem Gasanfall der Druck in der Hauptvakuumleitung über einen bestimmten Wert, so wird durch das Manometer P1 zunächst das Ventil VV 20 geschlossen. Das abzupumpende Gas muß dann zusätzlich durch die Kühlfalle F2 strömen. Wird trotz des Druckabfalles in F2 ein bestimmter Druck in F1 überschritten, so werden durch das Manometer P1 die Ventile VV 21 und VV 23 geschlossen und das Ventil VV 22 geöffnet. Dadurch übernimmt der Vorvakuumumpumsatz die Evakuierung direkt unter Umgehung der Diffusionspumpe. Die Diffu-

31) Im Normalfall wird das Verfahrens- oder das Passivierungsgas über die UF_6 -Abscheidungsanlage abgesaugt (vgl. Abschnitt 3).

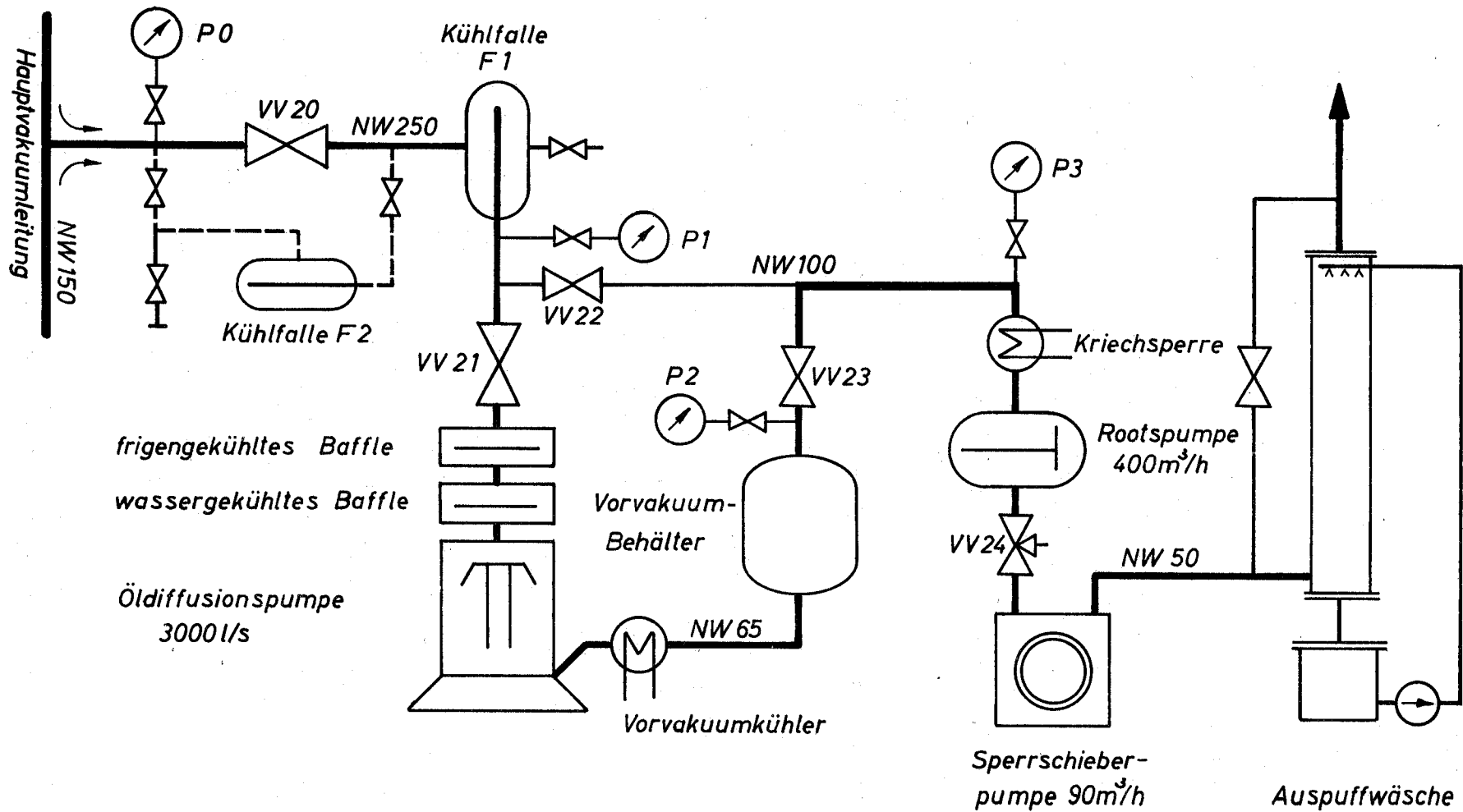


Abb. 10: Der Leitungsplan des Hochvakuum pumpstandes

sionspumpe läuft ungestört weiter, wobei ein Vorvakuumbehälter das für den Betrieb der Diffusionspumpe erforderliche Vorvakuum über längere Zeit aufrechterhält. Die Manometer P2 und P3 bewirken zusammen mit den Ventilen VV 23 und VV 24 das automatische An- und Abschalten des Vorpumpensatzes.

Zur Vermeidung von Ölrückströmungen in die Kühlfalle F1 sind an der Saugseite der Diffusionspumpe ein wassergekühltes und ein frigengekühltes Baffle und an der Saugseite der Rootspumpe eine wassergekühlte Ölkriechsperre vorgesehen. Die Kriechsperre verhindert gleichzeitig das Eindringen von Vorpumpenöl in den Vorvakuumanschluß der Diffusionspumpe. Der Vorvakuumkühler auf dem Druckstutzen der Diffusionspumpe hat die Aufgabe, den Verlust an Treibmittel niedrig zu halten. Die Auspuffgase des Pumpstandes, in denen bei auftretenden Störungen Reste oder Reaktionsprodukte des Passivierungs- oder Verfahrensgases enthalten sein können, werden vor dem Austritt in die freie Atmosphäre in einer Waschsäule von diesen Beimengungen befreit. Als Waschflüssigkeit dient verdünnte Kalilauge.

Maßgebend für die Bestimmung der Abmessungen der Vakuumleitungen und die Wahl der Pumpengrößen waren nicht nur die zu evakuierenden Anlagenvolumina, sondern auch die zu entgasenden inneren Oberflächen³²⁾. In Tabelle 2 sind die entsprechenden Größen zusammengestellt. Die Verbindung zwischen der Diffusionspumpe und der Hauptvakuumleitung wurde, einschließlich der Ventile VV 21 und VV 20 sowie der Kühlfalle F1, mit der Nennweite 250 ausgeführt. Die Hauptvakuumleitung hat die Nennweite 150, die Vakuumanschlußleitungen zu den Behältern und der UF_6 -Abscheidungsanlage haben die Nennweite 100 und die Anschlußleitungen der Einzelstufen an die Hauptvakuumleitung die Nennweite 50. Der Pumpstand steht zwischen der Trennkaskade und den Behältern mit der UF_6 -Abscheidung (vgl. Abb. 3). Daraus ergibt sich ein relativ kurzes Leitungssystem

32) Für Edelstahloberflächen unter Raumtemperatur wurde mit einer Gasabgabe von 9×10^{-8} Torr l/s m^2 innerhalb der ersten Stunde gerechnet (E. Leybold's Nachfolger, Köln, Firmenkatalog, Teil II/63, Tabellenanhang)

Anlagenteil	Volumeninhalt l	innere Oberfläche m ²
Einzelstufe mit Probeentnahmebehältern	30	2,5
Trenndüsenkaskade ein- schließlich der Ein- heiten 0 u. 11	360	30,0
Vorratsbehälter mit Zuleitungen	VBO 650	3,7
	VB11 1085	4,9
UF ₆ -Abscheidungsanlage (ohne Füllkörperfüllung)	23	2,1
Vakuumhauptleitung mit Anschlußleitungen	220	6,1
Gesamt	2338	46,8

Tab. 2: Die zu evakuierenden Anlagenvolumina und deren innere Oberflächen

zu allen Anlagenteilen. An der Verbindungsstelle zwischen Pumpstand und Hauptvakuumleitung kann mit einer effektiven Sauggeschwindigkeit von ca. 300 l/s, an ihrem äußersten kaskadenseitigen Ende mit einer effektiven Sauggeschwindigkeit von ca. 35 l/s und am Anschluß der Behälter und der UF₆-Abscheidung mit einer effektiven Sauggeschwindigkeit von ca. 115 l/s gerechnet werden. Diese Sauggeschwindigkeiten sind an die Leitwerte der Einzelstufe mit je 6,5 l/s³³⁾ und die Entleerungsleitungen der Behälter mit je 40 l/s angepaßt.

In Abb. 11 ist der Aufbau des Hochvakuumumpumpstandes dargestellt. Er hängt an den überragenden Längsträgern (3) des Kaskadengestelles. Ein T-Stück (4) stellt über das Ventil VV 20 die Verbindung zwischen der Hauptvakuumleitung (1) und der Kühlfalle F1 her. Ein Rohrkrümmer (6) mit dem eingesetzten Ventil VV 21 führt von der Falle über die Baffles zur Ansaugöffnung der Diffusionspumpe³⁴⁾ (5). Der Vorvakuumanschluß der Diffusionspumpe ist über den Vorvakuumkühler und einen Dehnungsausgleicher mit dem quer zum Gestell aufgehängten Vorvakuumbehälter (2) verbunden, der einen Inhalt von etwa 80 l hat.

Die Rootspumpe³⁵⁾ (8) ist, ähnlich wie die Verfahrensverdichter, an ihrem saugseitigen Flansch am Gestell aufgehängt. Sie saugt über den wassergekühlten Vorvakuumkühler (7) mit Kriechsperre aus dem Vorvakuumbehälter über das Ventil VV 23 oder, bei Umgehung der Diffusionspumpe, über das Ventil VV 22 direkt aus der Kühlfalle F1 an. Zwischen Rootspumpe und Vorpumpe³⁶⁾ (10) ist das beim Abschalten der Vorpumpe automatisch

33) Der Leitwert von 6,5 l/s berücksichtigt nicht den eventuellen Saugleistungsanteil des laufenden Stufenverdichters.

34) Öldiffusionspumpe Type DI 3000, Heraeus, Hanau

35) Type WS 400, Heraeus, Hanau

36) Type DK 90, Heraeus, Hanau

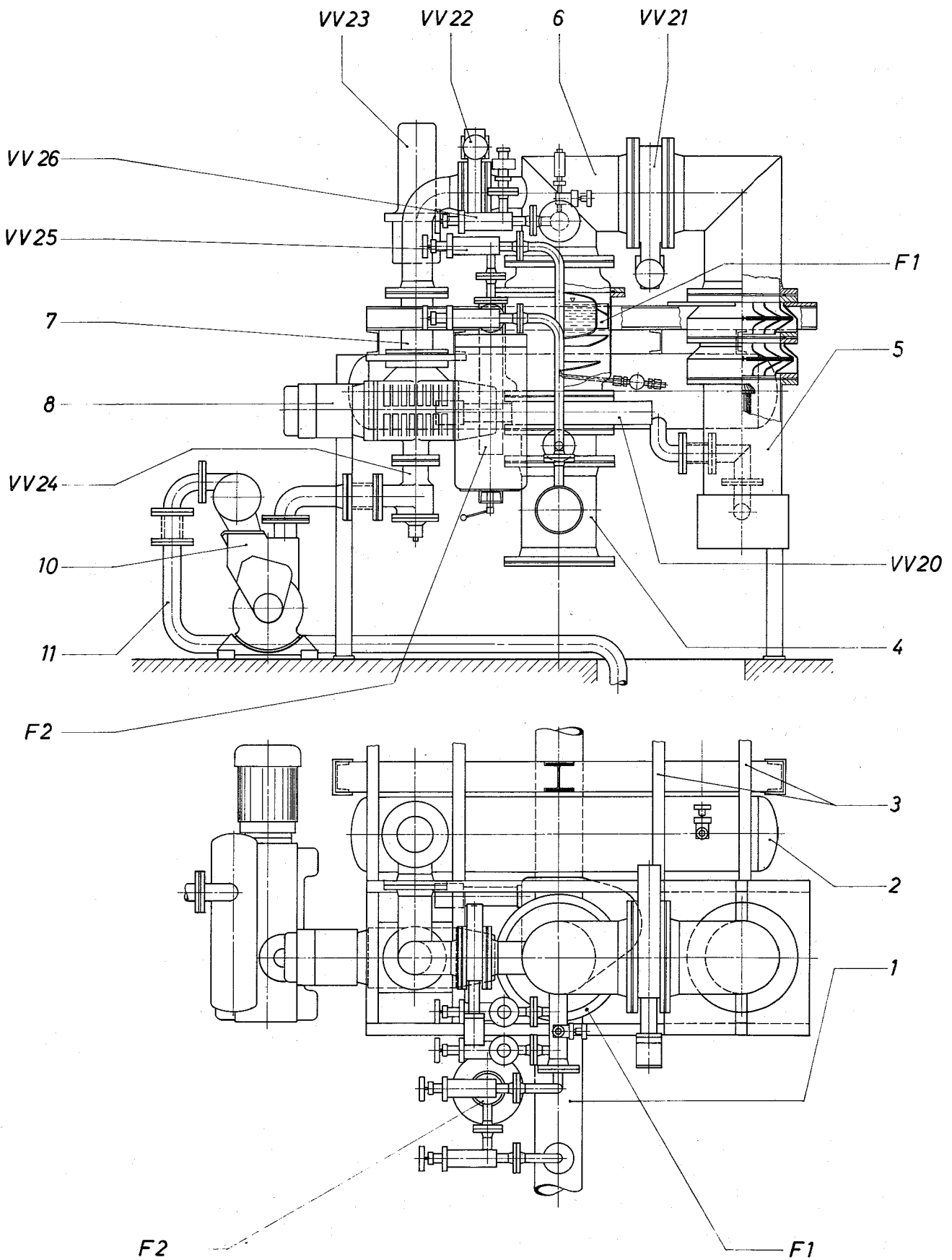


Abb. 11: Aufbau des Hochvakuumpumpstandes

schließende Ventil VV 24 eingebaut. Die Auspuffleitung (11) führt durch den Hallenlängskanal zur Auspuffwaschanlage.

Die Kühlfalle F2 ist über Leitungen und Ventile der Nennweite 25 mit der Vakuumsauptleitung bzw. dem Eingang der Kühlfalle F1 verbunden. Ihr konstruktiver Aufbau entspricht dem der UF_6 -Abscheider (Abb. 7). Die Kühlfalle F1 ist in Abb. 11 im Teilschnitt dargestellt. An das Kühlmittelgefäß mit einem Fassungsvermögen von 6 Litern sind an seiner zylindrischen Wand optisch dichte Schikanen angebracht. Der von unten kommende Gasstrom wird über ungekühlte schalenartige Umlenkmale an die kalten Oberflächen des Kühlfäßes und der Schikanen geführt, um dort kondensierbare Gase und Dämpfe abzuscheiden. Beim Auftauen der Kühlfalle werden die tropfbaren Anteile auf der unteren Schale aufgefangen. Sie können über die dort angebrachte Entleerungsleitung abgepumpt oder, zusammen mit dem übrigen Kühlfalleninhalt, in die Kühlfalle F2 überdestilliert werden. Die Ventile VV 20, 21 und 22, mit denen die Kühlfalle F1 von der übrigen Anlage abgesperrt werden kann, sind Pendelschieber³⁷⁾ mit Balgabdichtung der Schieberstange. Sie dichten beidseitig gegen Atmosphärendruck, so daß die angeschlossenen Anlagenteile in beliebiger Kombination unter Vakuum bzw. Atmosphärendruck gehalten werden können. Alle Druckmeßstellen sind mit Wärmeleitrohren bestückt, die Meßstellen P0 und P1 zusätzlich mit Penningröhren. Sämtliche Druckmeßgeräte sind absperbar an die Anlage angeschlossen.

37) Hersteller: Vakuum-Apparate-Technik, Haag, Schweiz

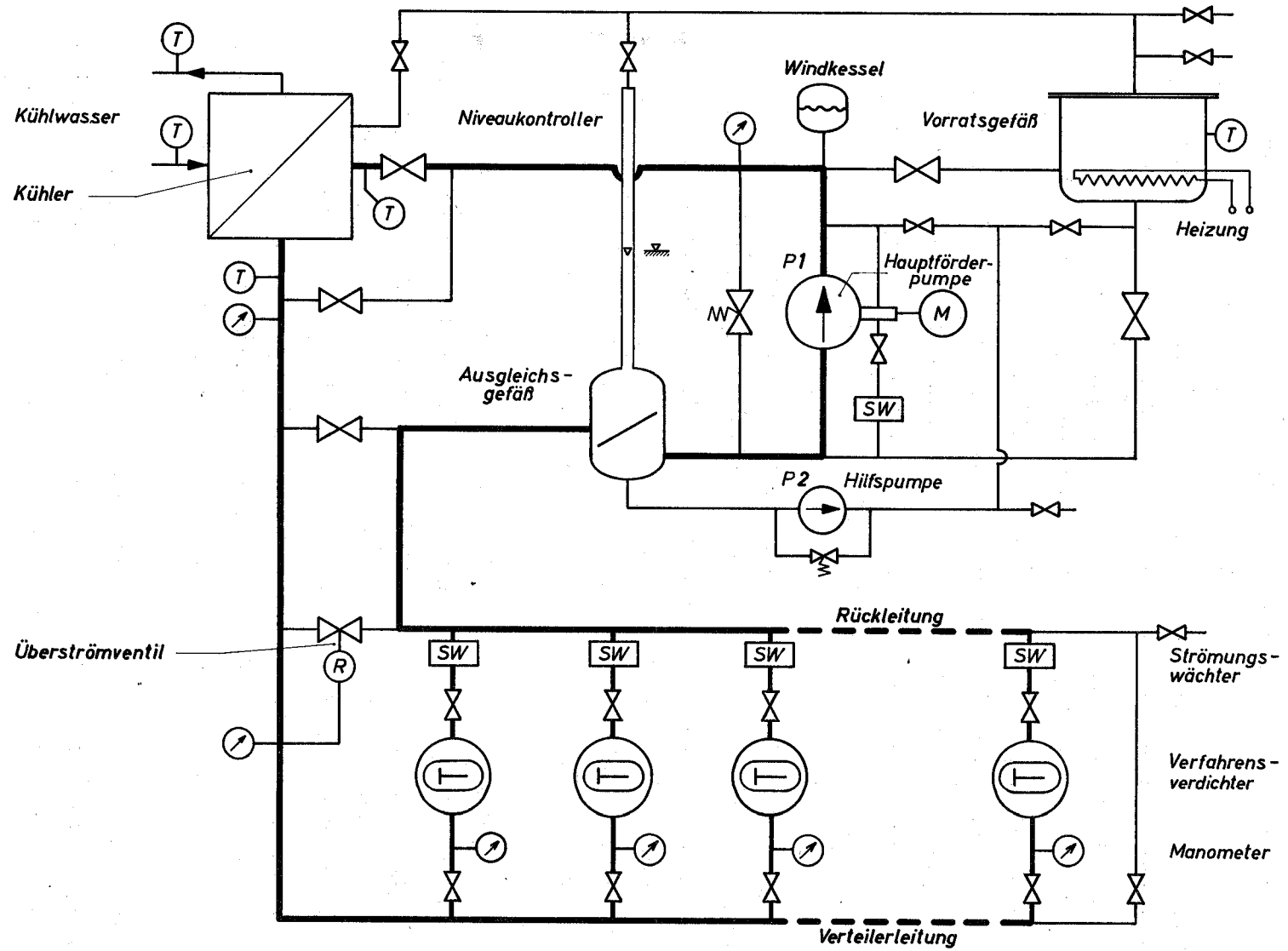
5. Die Sperrmittelversorgung der Verdichter

Die Rootsverdichter der Trenndüsenkaskade haben je vier mit Gleitringen abgedichtete Drehdurchführungen. Jede Durchführung besitzt zwei Gleitringpaare, zwischen denen sich eine von UF_6 -festem Halocarbonöl³⁸⁾ durchströmte Sperrkammer befindet. Das Öl dient zur Schmierung und zur Abführung der beträchtlichen Reibungswärme. Beim evtl. Betrieb der Verdichter mit Kolbenkühlung¹⁰⁾ hat das Öl zusätzlich einen Teil der Verdichtungswärme abzuführen. Die Wärmeleistung, die aus den vier Sperrkammern eines Verdichters abzuführen ist, beträgt ca. 1000 Watt. Der zusätzliche Anteil für Kolbenkühlung kann 400 Watt erreichen. Von den 12 Verdichtern der Kaskade sind also maximal 16800 Watt, d.h. 14400 kcal/h abzuführen. Bei einer angenommenen Temperaturerhöhung des Sperrmittels von $5^\circ C$ entspricht dem ein Kühlmittelstrom von 82 bzw. 114 l/min beim Betrieb ohne bzw. mit Kolbenkühlung. Die Ausgangstemperatur des Sperrmittels soll $30^\circ C$ nicht überschreiten.

In dem Leitungsplan des Sperrmittelkreislaufes (Abb. 12) ist das Fließbild des normalen Betriebszustandes mit größerer Strichstärke eingezeichnet: Die Hauptförderpumpe P1 saugt das Sperrmedium aus dem Ausgleichsgefäß an und fördert es in den Kühler. Das gekühlte Sperrmittel wird über die Verteilerleitung den zwölf Verdichtern zugeführt. Das in den Verdichtern erwärmte Sperrmittel fließt in das Ausgleichsgefäß zurück.

38) Halocarbon Products Corp., Hackensack, N.J. (USA)
Die verwendete Spezialfraktion des Öles Series 11-21 hat laut Firmenangabe folgende Daten:
Mittleres Molekulargewicht: 680 g/mol
Dichte bei $38^\circ C$: $1,925\text{ g/cm}^3$
Spez. Wärme bei $20^\circ C$: $0,2\text{ cal/grad}\cdot\text{g}$
Kinemat. Zähigkeit : bei $20^\circ C$ 139,8 c. St.
 bei $50^\circ C$ 21,2 c. St.
Dampfdruck : bei $20^\circ C$ $2\cdot 10^{-3}$ Torr
 bei $60^\circ C$ $6\cdot 10^{-2}$ Torr

Abb. 12: Leitungsplan des Sperrmittelkreislaufes



Jeder Verdichter kann durch Ventile von der Verteilerleitung und der Rückleitung abgetrennt werden (vgl. Abb. 5). Am Eintritt in den Verdichter wird der Vordruck mit einem Manometer und am Austritt die Sperrmittelstromstärke mit einem direktanzeigenden Strömungswächter SW mit Minimalkontakt gemessen. Der Strömungswächter schaltet den Verdichter ab, wenn der Sperrmittelstrom unter den eingestellten Wert sinkt. Zwischen der Verteiler- und der Rückleitung ist ein den Vordruck begrenzendes Überströmventil eingebaut. Die von der Pumpe hervorgerufenen periodischen Druckschwankungen werden in einem Windkessel mit gasüberlagerter Ausgleichsmembrane gedämpft.

Zur Überwachung der im Kreislauf enthaltenen Sperrmittelmenge ist an das Ausgleichsgefäß ein Steigrohr angeschlossen, dessen Schwimmer über eine magnetische Ankopplung einen außen liegenden Schaltkontakt betätigt, der bei Unterschreiten eines eingestellten Niveaus die Hauptförderpumpe und damit indirekt alle Rootsgebläse abschaltet.

Ein elektrisch geheiztes Vorratsgefäß von 120 Liter Inhalt dient zum Aufbewahren und Entgasen des Sperrmittels. Mit einer Hilfspumpe P2 läßt sich der Anlageninhalt in dieses Vorratsgefäß zurückbefördern. P2 kann auch zum Umpumpen von Sperrmittel verwendet werden, wenn für Kontrollzwecke jeweils nur ein Verdichter betrieben werden soll. Das Vorratsgefäß, das Ausgleichsgefäß und der Kühler stehen über eine Argonatmosphäre in Verbindung.

Wegen des hohen Preises des Halocarbonöls³⁹⁾ mußte das Volumen des Sperrmittelkreislaufes möglichst klein gehalten werden. Für die Rohre des Hauptkreislaufes wurde die Nennweite 25, für die Verteiler- und Rückleitung die Nennweite 20 und für die Verdichteranschlußleitungen und Hilfsleitungen die Nennweite 10 gewählt. Die Verbindung zwischen Ausgleichs-

39) ca. 250 DM pro Liter

gefäß und Hauptförderpumpe wurde zur Vermeidung von Kavitation mit NW 50 bemessen. Als Rohrverbindungselemente wurden genormte Schneidringverschraubungen und Flansche mit Viton-Flachdichtungen verwendet.

Die Hauptförderpumpe ist eine langsam laufende Kreiskolbenpumpe⁴⁰⁾ mit einer maximalen Förderleistung von 130 l/min und einer Gegendruckverträglichkeit von maximal 20 atü. Ihr Antrieb erfolgt über ein stufenlos verstellbares Getriebe zur Anpassung des Förderstromes an die jeweiligen Betriebsverhältnisse. Die Wellendurchführungen sind mit Gleitringdichtungen aus Wolframkarbid abgedichtet. Die Hilfspumpe ist eine Zahnradpumpe⁴¹⁾ mit einer Förderleistung von 10 l/min bei einem Gegendruck von 10 atü.

Der Kühler⁴²⁾ enthält 84 von Wasser umströmte Röhren von 2,4 m Länge und 14 mm Durchmesser. Das Sperrmittel durchläuft vier in Serie geschaltete Gruppen von je 21 parallelgeschalteten Röhren. Der Druckabfall am Kühler beträgt ca. 8 Atmosphären bei 120 l/min Durchsatz und einer mittleren Temperatur des Sperrmittels von 27,5 °C.

40) Type KRH-65 aus Edelstahl, Hersteller: Firma Lederle, Freiburg i. Br.

41) Type LT1 aus Edelstahl, Hersteller: Firma Lederle

42) Hersteller: Firma Halberg, Ludwigshafen, volumensparende Sonderausführung des Types OE6RI

6. Abwicklung der Planung und des Baus der Anlage

Die Konstruktionsarbeiten für die Pilot-Anlage wurden im Juni 1964 begonnen und, mit Ausnahme der UF_6 -Abscheidungsanlage, Ende Juni 1965 abgeschlossen. Die UF_6 -Abscheidungsanlage konnte erst in der Zeit von April bis Juni 1966 projektiert werden, da die für die Auslegung notwendigen experimentellen Ergebnisse²⁴⁾ nicht früher vorlagen. Von der Trenndüsenkaskade wurden neben den Konstruktionszeichnungen fertigungsgerechte Detailzeichnungen hergestellt, während von den Hilfseinrichtungen der UF_6 -Abscheidungsanlage, dem Hochvakuumpumpstand und der Sperrmittelversorgung nur Konstruktionszeichnungen ausgeführt wurden.

Für die gesamte Anlage wurden ausführliche technische Liefer- und Abnahmebedingungen ausgearbeitet. Sie enthalten neben den allgemeinen Verpflichtungen des Lieferers und dessen Unterpelieferanten detaillierte Vorschriften über die Auswahl, die Prüfung und die Verarbeitung der Werkstoffe und Halbzeuge sowie über die Kontrolle der Oberflächengüte und der Vakuumdichtigkeit der fertigen Teile. Außerdem wurde die Art und Durchführung der Fertigungsüberwachung, der Montage und der Abnahmeprüfungen festgelegt.

Im August 1965 wurde die Herstellung und die Montage der Pilot-Anlage ohne die UF_6 -festen Rootsverdichter und zunächst auch ohne die UF_6 -Abscheidungsanlage ausgeschrieben. Als Ausschreibungsunterlagen dienten die Konstruktions- und Fertigungszeichnungen, die technischen Liefer- und Abnahmebedingungen sowie ausführliche Funktions- und Betriebsbeschreibungen. Der Auftrag wurde am 23.12.1965 an die Firma Heraeus Hochvakuum GmbH, Hanau, vergeben und am 11.10.1966 auf die UF_6 -Abscheidungsanlage ausgedehnt. Den Auftrag für die Lieferung der UF_6 -festen Rootsgebläse erhielt die Fa. E. Leybolds Nachfolger, mit der zusammen diese Gebläse entwickelt worden waren¹⁰⁾.

Gemeinsam mit den Lieferfirmen wurden Terminpläne ausgearbeitet, die eine Koordination der Arbeiten in den Fertigungswerkstätten mit den teilweise parallel laufenden Prüfungen und der Montage ermöglichten. Die Fertigungsüberwachung und die Prüfungen im Herstellerwerk wurden zusammen mit der Technischen Abteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt⁴³⁾.

Im Dezember 1966 konnte mit der Endmontage im Institut für Kernverfahrenstechnik begonnen werden. Zuerst wurden der Hochvakuumpumpstand und der Sperrmittelkreislauf aufgebaut, anschließend die Trennkaskade und die UF₆-Abscheidungsanlage. Die Montage fand unter erhöhten Sauberkeitsbedingungen statt. Sie war am 15. Juni 1967 beendet.

Im Anschluß an die Endmontage jeder Baugruppe wurde mit den Abnahmeprüfungen begonnen. Diese umfaßten bei jeder Baugruppe den Lecktest und eine Funktionsprüfung, beim Hochvakuumpumpstand und beim Sperrmittelkreislauf zusätzlich eine dreiwöchige bzw. einwöchige Dauererprobung unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen.

Beim Lecktest wurden die Einzelstufen der Kaskade sowie Abschnitte der UF₆-Abscheidungsanlage und des Hochvakuumpumpstandes mit einem Lecksuch-Massenspektrometer⁴⁴⁾ verbunden und einzeln in ein Plastikzelt eingehüllt, in das Helium eingeblasen wurde⁴⁵⁾. Durch Registrierung der Anzeige des Lecksuchgerätes auf einem Linienschreiber war eine Unterscheidung

43) Wir danken Herrn Ingenieur W. Seither für die gewissenhafte Durchführung der Prüfungen und für die gute Zusammenarbeit.

44) ATLAS-Gasdetektor, Type C-MS61

45) Da die Verdichter von einer anderen Firma geliefert wurden, (siehe oben) wurden sie beim Lecktest zunächst durch entsprechende Paßrohre ersetzt. Die Verdichter wurden erst nach Abnahme des Verfahrenskreislaufes eingebaut und getestet.

zwischen dem Heliumeinstrom durch ein Leck und der im allgemeinen wesentlich größeren Heliumpermeation durch die Viton-O-Ringe möglich, da die beiden Effekte mit verschiedenen Zeitkonstanten verlaufen. Für die Eichung wurde ein aus der Zeltatmosphäre versorgtes Standardleck benutzt.

Von den 453 Flanschverbindungen der Kaskade und der UF₆-Abscheidungsanlage zeigten 12 zunächst geringfügige Undichtigkeiten, die durch Fremdkörper oder Riefen auf den Dichtflächen verursacht worden waren. Diese Fehler ließen sich ohne Schwierigkeiten beseitigen. Von den 345 Ventilen waren nach außen und im Durchgang zunächst alle mit einer Ausschlußgrenze von 1×10^{-9} Torr l/s dicht. Nach mehrmaligem Ausheizen der Kaskade bei 70°C ⁴⁶⁾ unter gleichzeitigem Abpumpen zeigten 3 Ventile NW 25 und 1 Ventil NW 50 jedoch eine Undichtigkeit infolge einer Pore im Gehäuse. Diese Ventile wurden ausgewechselt. Anschließende Messungen des Druckanstieges in den abgesperrten Einzelstufen bzw. Einheiten ergaben Maximalwerte von 2×10^{-4} Torr/h.

Bei der abschließenden Funktionsprüfung und der Dauererprobung konnten die in den technischen Liefer- und Abnahmebedingungen festgelegten Forderungen ohne Schwierigkeiten in allen Punkten erfüllt werden. Die Pilot-Anlage wurde am 30. Juni 1967 übergeben.

Die Abbildungen 13 und 14 zeigen die fertigmontierte und betriebsbereite Anlage. In der Abb. 13 ist die Ansicht der Trenndüsenkaskade vom Kontrollraum aus gesehen dargestellt. Im Hintergrund sind die beiden Vorratsbehälter VBO und VB11

46) Die Kaskade wurde abschnittsweise unter einem Zelt aus flammgeschützten Planen erwärmt. Die Beheizung erfolgte durch elektrische Heizlüfter, die die Zeltatmosphäre umwälzten.

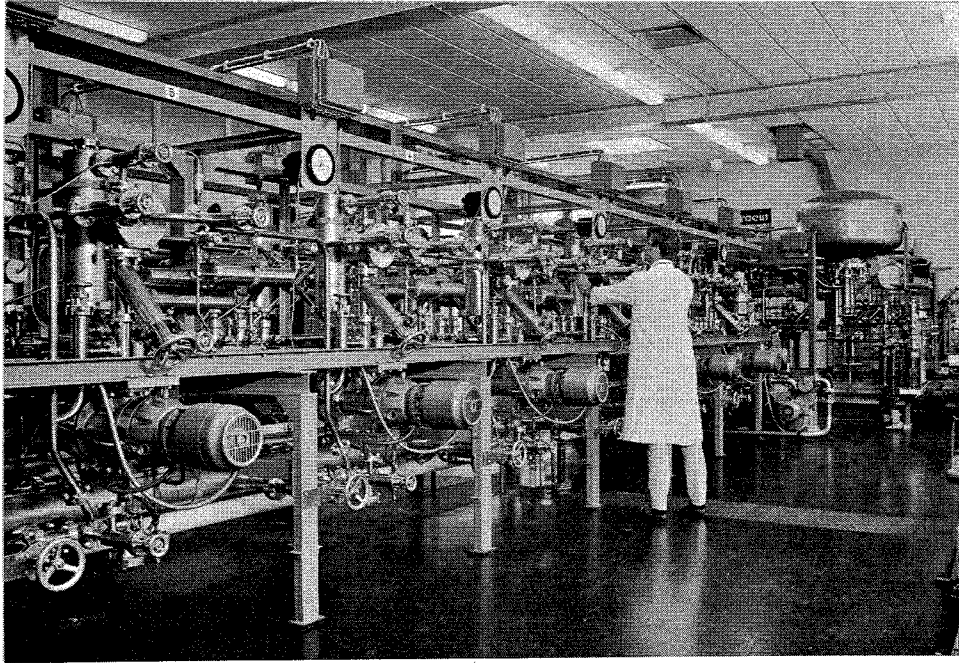


Abb. 13: Ansicht der Trenndüsenkaskade vom Kontrollraum aus gesehen. Im Hintergrund sind die beiden Vorratsbehälter VBO und VB11 sowie ein Teil der UF_6 -Abscheidungsanlage zu erkennen.

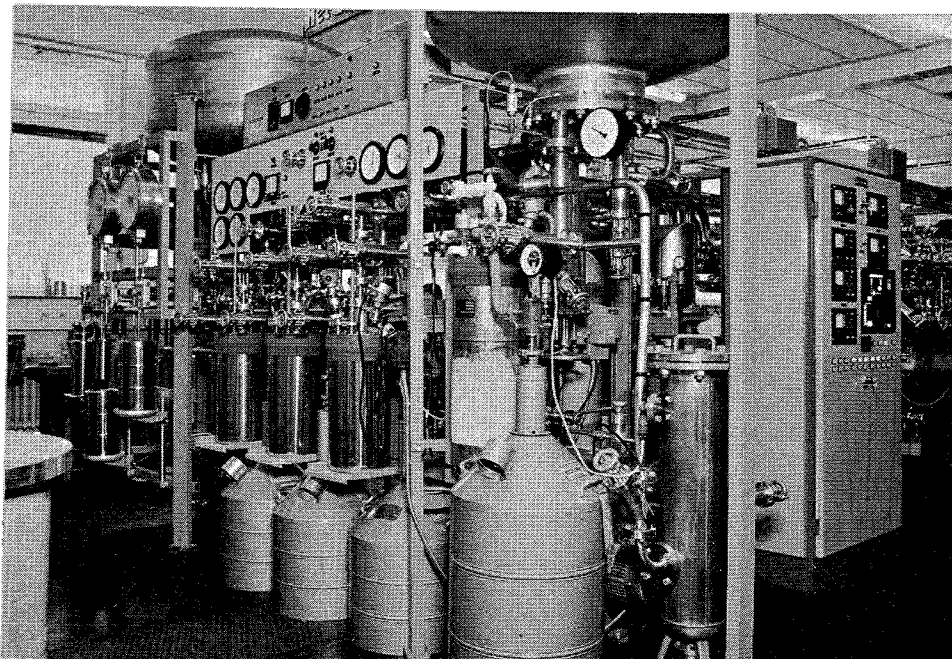


Abb. 14: Ansicht der UF_6 -Abscheidungsanlage und des Steuer-schranks des Hochvakuum-pumpstandes.

und ein Teil der UF_6 -Abscheidungsanlage zu erkennen. Die Abb. 14 zeigt die UF_6 -Abscheidungsanlage und den Steuerschrank des Hochvakuumpumpstandes.