

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

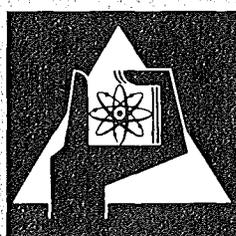
März 1973

KFK 1776

Institut für Kernverfahrenstechnik

**Verfahrensschema und Richtlinien für den Aufbau einer
technischen Trenndüsenkaskade zur Anreicherung von Uran-235**

R. Lücke, F. Weis



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1776

Institut für Kernverfahrenstechnik

VERFAHRENSSCHEMA UND RICHTLINIEN FÜR DEN AUFBAU
EINER TECHNISCHEN TRENNDÜSENKASKADE
ZUR ANREICHERUNG VON URAN-235

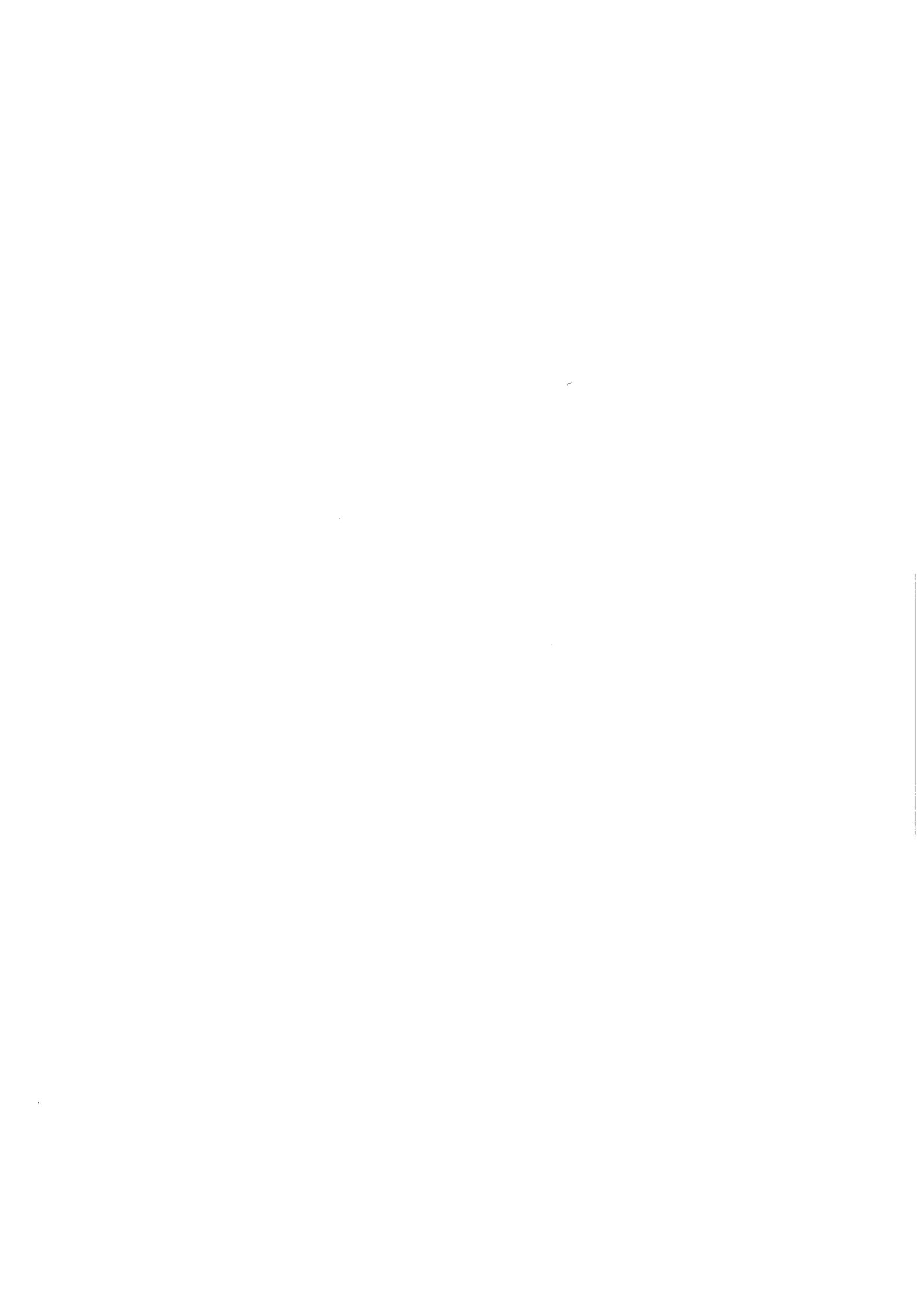
von

R. Lücke⁺)

F. Weis

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

+) Dissertation; Universität Karlsruhe (T.H.) Januar 1973



Übersicht:

Beim Trenndüsenverfahren zur Uran-235-Anreicherung kann -wie bei den anderen bekannten Verfahren auch- in einer einzelnen Trenneinheit nur auf einen Bruchteil der für Kernreaktoren üblichen Konzentration von ca. 3 % Uran-235 angereichert werden. Zur Erreichung dieser Konzentration müssen einige hundert Trenneinheiten zu einer Kaskade zusammengeschaltet werden.

Das verfahrenstechnische Schema einer Trenndüsenkaskade wird für verschiedene UF_6 -Abschälverhältnisse \mathfrak{J}_u und die drei möglichen Zuordnungen von Verdichter und Trenneinheit innerhalb einer kompakten Trenndüsenstufe gezeigt. Die Richtlinien für den Aufbau einer technischen Trenndüsenkaskade werden anhand einer Zuordnung von Verdichter und Trenneinheit und das UF_6 -Abschälverhältnis $\mathfrak{J}_u = 1/3$ angegeben. Hierbei finden sowohl betriebstechnische Gesichtspunkte wie Erstmontage und Wartung Beachtung, als auch sicherheitstechnische Aspekte, die aus der möglichen Verwendung des brennbaren Wasserstoffs als leichtes Zusatzgas resultieren.

Process Scheme and General Instructions for Building a Technical Separation Nozzle Cascade for Uranium-235 Enrichment

Abstract:

The separation nozzle process for uranium-235 enrichment, as any other known process, will generate in one stage only a small fraction of the concentration of 3 % uranium-235 usual for fission reactors. To reach this concentration it is necessary to build a cascade of several hundreds of separation units.

The process scheme of a separation nozzle cascade is shown for different UF_6 -cuts \mathfrak{J}_u and for the three possible coordinations of compressor and separation unit within a compact separation nozzle stage. General instructions are given by one coordination of compressor and separation unit and the UF_6 -cut $\mathfrak{J}_u = 1/3$ for building up a technical separation nozzle cascade. Both operating aspects, such as the first assembly and maintenance, and safety aspects resulting from the possible use of the combustible hydrogen as an additional light gas are taken into account.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung und Zusammenfassung	1
2. Verfahrensschema	
2.1 Grundlagen des Verfahrens und Betriebsparameter	3
2.2 Zuordnungsmöglichkeiten von Trenneinheit und Verdichter bei integrierter Stufenbauweise	7
2.3 Kaskadenabschluß	9
3. Stufenaufbau	
3.1 Übergeordnete Gesichtspunkte	11
3.2 Düsengasversion	13
3.3 Kerngasversion	13
3.4 Mantelgasversion	15
3.5 Verbindungs- und Schweißtechnik	17
4. Kaskadenaufbau	
4.1 Übergeordnete Gesichtspunkte	21
4.2 Rohrleitungssystem	21
4.3 Räumliche Anordnung der Kaskadenkomponenten	23
4.4 Montagekonzept	26
4.5 Wartungskonzept	27
5. Diskussion der Ergebnisse	29

1. Einleitung und Zusammenfassung

Im Institut für Kernverfahrenstechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe wurde in den letzten Jahren eine neue Methode zur Anreicherung des leichten Uranisotops U^{235} entwickelt, die als Trenndüsenverfahren bezeichnet wird¹⁾. Diese Methode beruht auf der teilweisen räumlichen Entmischung der Uranisotope in einer expandierenden auf gekrümmten Bahnen verlaufenden Gasströmung eines UF_6/He - bzw. UF_6/H_2 -Gemisches.

In einer einzelnen Trenneinheit kann nur auf einen Bruchteil der für Kernreaktoren üblichen Konzentration von 3 % Uran-235 angereichert werden. Es müssen daher -wie bei den anderen bekannten Verfahren auch²⁾- viele identische Trenneinheiten zu einer Kaskade hintereinandergeschaltet werden.

Zur Erprobung der wichtigsten Komponenten einer Trenndüsenkaskade wurde der Prototyp einer technischen Trenndüsenstufe gebaut³⁾. Die mit dieser Stufe durchgeführten Versuche zeigten, daß bei der Realisierung des Trenndüsenverfahrens keine grundsätzlichen technischen Schwierigkeiten zu erwarten sind.

-
- 1) E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel, *Angew. Chemie internat. Edit.* 6, 507 (1967)
Diese Arbeit enthält eine Zusammenstellung der früheren Veröffentlichungen über das Trenndüsenverfahren.
 - 2) E.W. Becker, *Z. Kerntechnik* 11, 129 (1969).
 - 3) E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, G. Eisenbeiß, G. Frey, H. Geppert, P. Happe, G. Heeschen, R. Lücke, D. Plesch, K. Schubert, R. Schütte, D. Seidel, U. Sieber, H. Völcker, F. Weis, Vortrag auf der vierten internationalen Konferenz der Vereinten Nationen über die friedliche Nutzung der Kernenergie, Genf 1971.

Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, zusammen mit der Industrie⁺⁾ das Verfahrensschema und Richtlinien für den Aufbau einer technischen Trenndüsenkaskade zur Anreicherung von Uran-235 zu erarbeiten. Die Untersuchungen beschränken sich auf eine Kaskade mit konstantem Urandurchsatz, da die in der Arbeit behandelten Fragestellungen durch die bei einer technischen Anlage vorzusehende Unterteilung in Abschnitte mit verschiedenen Durchsätzen praktisch nicht beeinflusst werden.

Nach einer Einführung in die Grundlagen des Trenndüsenprozesses werden zunächst die aus den drei Zuordnungsmöglichkeiten von Trenneinheit und Verdichter resultierenden Verfahrensschemata einander gegenübergestellt. Danach werden konstruktive Lösungen für die drei zugehörigen Trennstufenversionen vorgeschlagen. Der folgende Abschnitt befaßt sich mit dem konstruktiven Aufbau der Kaskade unter Berücksichtigung der durch Montage und Wartung sowie die eventuelle Verwendung des brennbaren Wasserstoffs als leichtes Zusatzgas bedingten Forderungen. Abschließend werden die Ergebnisse unter Berücksichtigung der für die Realisierung einer Trenndüsendemonstrationsanlage vorgesehenen Ausbauphasen diskutiert.

+) Die technische Realisierung des Trenndüsenverfahrens wird gemeinsam mit der Fa. STEAG AG, Essen durchgeführt. Für die Kaskadenplanung bestand ein Zusammenarbeitsvertrag mit der Fa. Linde AG, Höllriegelskreuth. Wir danken vor allem den Herren Ing. (grad) Eitel und Ing. (grad) Seifers von der Fa. Linde für ihre Mitarbeit.

2. Verfahrensschema

2.1 Grundlagen des Verfahrens und Betriebsparameter

Das Schema des Trenndüsenelementes und die der Planung zugrundegelegte Ausführung sind in den Abb. 1 und 2 dargestellt. Das Uran-Isotopengemisch mit der U^{235} -Konzentration n_0 wird als gasförmiges Uranhexafluorid zusammen mit dem die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens verbessernden Zusatzgas der schlitzförmigen Trenndüse mit der Gesamt-Molstromstärke L unter dem Einlaßdruck $p_0 = 600$ Torr zugeführt. Die Molkonzentration des UF_6 im Ausgangsgemisch beträgt $N_0 = 5$ %. In der gekrümmten Düse expandiert das Gas-/Isotopengemisch auf $p_k = p_m = 150$ Torr. Durch das am Ende der Düse angeordnete Abschälerblech wird das Gemisch in zwei Fraktionen unterschiedlicher Gemisch- und Isotopenkonzentrationen (N_1 , N_2 bzw. n_1 , n_2) mit den Molstromstärken $\vartheta \cdot L$ als leichte Fraktion und $(1 - \vartheta) \cdot L$ als schwere Fraktion aufgespalten, wobei ϑ als Gesamtabschälverhältnis bezeichnet wird. ϑ_u ist das partielle Abschälverhältnis des UF_6 und kennzeichnet das Verhältnis des UF_6 -Molenstromes in der leichten Fraktion zum UF_6 -Molenstrom im Ausgangsgas. Das Ausgangsgas wird auch als Düsengas bezeichnet, während für die leichte und die schwere Gemischfraktion auch die Bezeichnungen Mantelgas und Kerngas benutzt werden. Der Durchsatz L des Trenndüsenelementes kann beliebig durch Verlängerung der Schlitzlänge senkrecht zur Zeichenebene in Abb. 2 und Parallelschaltung der schlitzförmigen Düsen eingestellt werden. Heute verwendete technische Einheiten bestehen aus mehreren parallelgeschalteten, 2 Meter langen 10-Kammer-Rohren, auf deren Mantellinien am Umfang verteilt 10 schlitzförmige Düsensysteme angeordnet sind³⁾.

Die Zusammenschaltung der Trenneinheiten zur Trenndüsenkaskade geschieht unter Beachtung der Nichtvermischungsbedin-

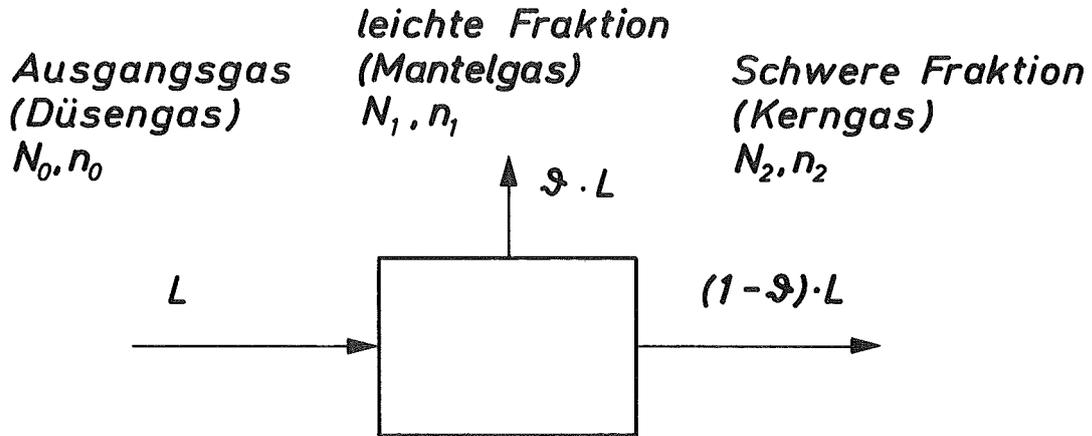


Abb. 1: Schema des Trenndüsenelementes mit den im Text erläuterten Bezeichnungen

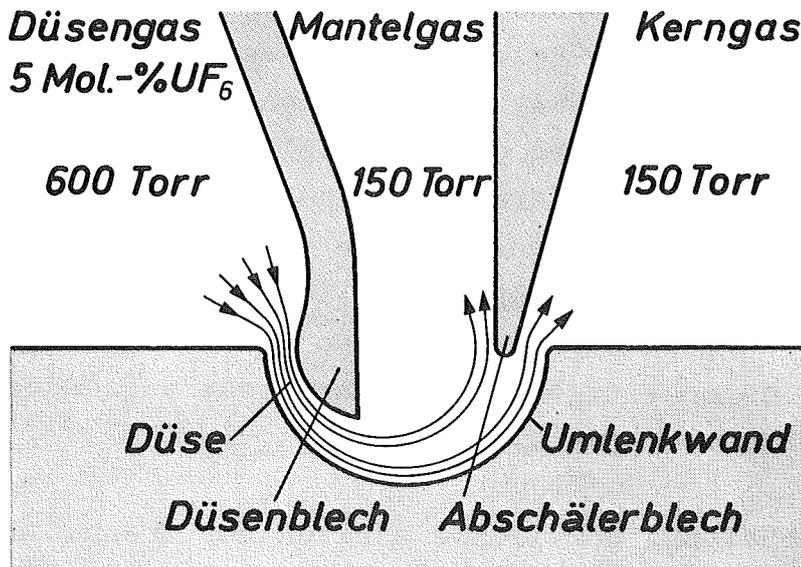


Abb. 2: Schnitt durch das der Planung zugrundegelegte Trenndüsenelement

gung⁴⁾, d.h. es dürfen nur Gasströme gleicher U^{235} -Konzentration miteinander gemischt werden. Parameter ist das UF_6 -Abschälverhältnis, das in früheren Untersuchungen³⁾ zu $\mathfrak{D}_u = 1/3$ festgelegt wurde. Abb. 3 zeigt die hierzu gehörende Verschaltung der Trenneinheiten, bei der kein über den Produkt- oder Abfallstrom hinausgehender Nettotransport des Urans längs der Kaskade stattfindet.

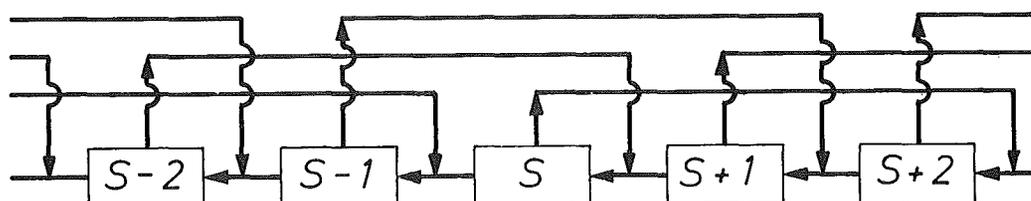


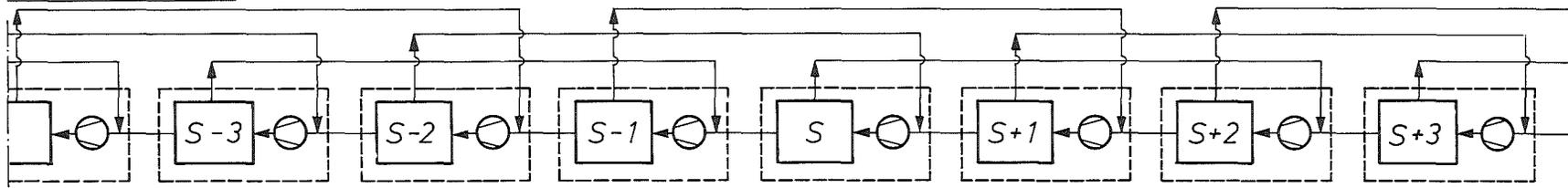
Abb. 3: Verschaltung der Trenneinheiten für ein UF_6 -Abschälverhältnis $\mathfrak{D}_u = 1/3$

Das Gesamtabschälverhältnis \mathfrak{D} ist mit dem UF_6 -Abschälverhältnis \mathfrak{D}_u über die Gemischtrennung verknüpft und beträgt bei der heutigen Trenndüse und für das leichte Zusatzgas Wasserstoff $\mathfrak{D} = 0,86$. Daraus ergibt sich der für das Trenndüsenverfahren spezifische Netto-Transport des Zusatzgases zum Kaskadenkopf. Die UF_6 -Abscheidungseinheiten⁵⁾ trennen das Zusatzgas vom UF_6 und übernehmen den Rücktransport des Zusatzgases zum Kaskadenfuß, womit die Trenndüsenkaskade bezüglich der ungewünschten Gemischtrennung kurzgeschlossen ist.

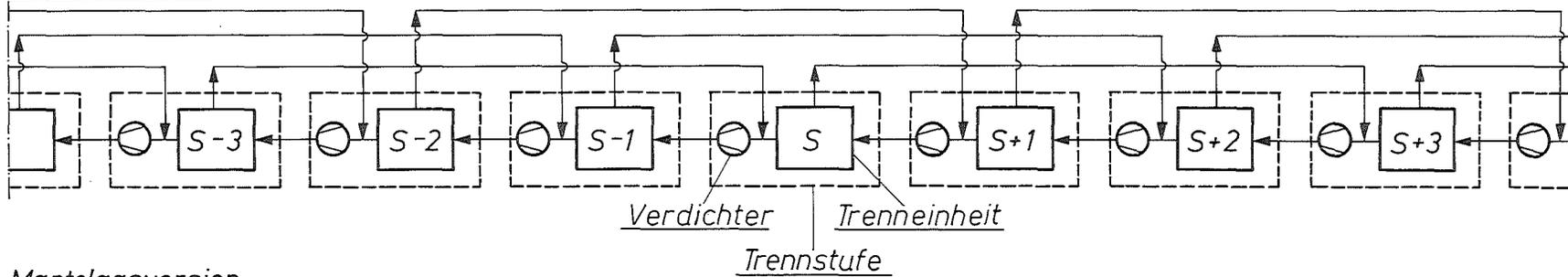
4) K. Cohen, Theory of Isotope Separation as Applied to the large Skale Production of U^{235} , Mc Graw Hill, New York 1951.

5) H.J. Fritsch, R. Schütte, KFK-Bericht 1437, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe (1971).

Düsengasversion



Kerngasversion



Mantelgasversion

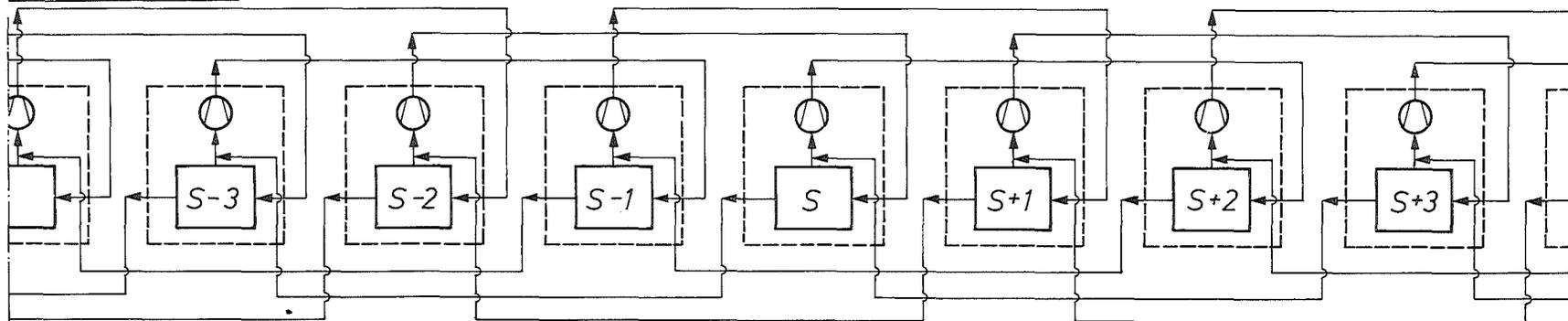


Abb. 4: Die drei möglichen Zuordnungen von Verdichter und Trenneinheit bei integraler Stufenbauweise für den speziellen Fall $\mathfrak{J}_u = 1/3$.

2.2 Zuordnungsmöglichkeiten von Trenneinheit und Verdichter bei integraler Stufenbauweise

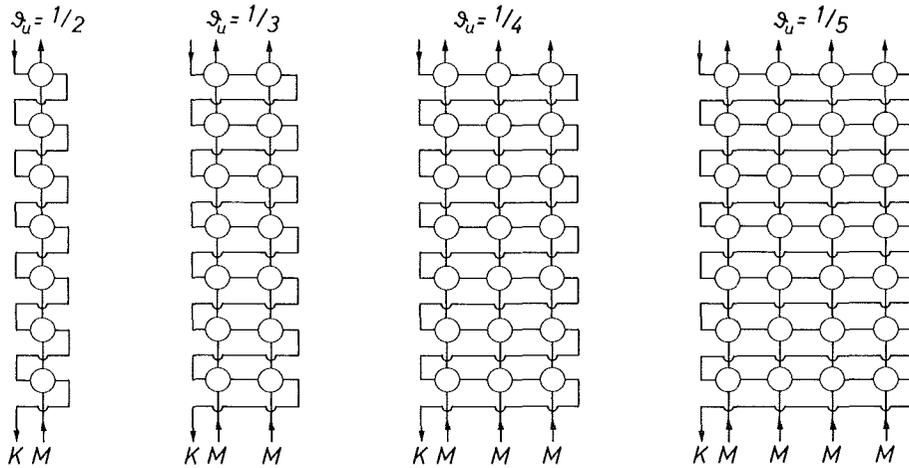
Die Expansion des Ausgangsgemisches von 600 Torr auf 150 Torr in der Trenneinheit erfordert eine Wiederverdichtung der Fraktionen, um sie den nächsten Trenneinheiten in der Kaskade zu speisen zu können. Nach Abb. 3 ist die Lage des Verdichteraggregates hinter der Vermischungsstelle von leichter Fraktion und schwerer Fraktion vorgezeichnet. Bei der angestrebten Integration von Trenneinheit und Verdichter mit Nachkühler in einer kompakten Trennstufe ergeben sich jedoch drei Möglichkeiten der Zuordnung von Verdichter und Trenneinheit.

Abb. 4 zeigt die als Düsengas-, Kerngas- und Mantelgasversion bezeichneten Zuordnungen für den speziellen Fall $\mathfrak{D}_u = 1/3$. Bei der Düsengasversion saugt der Verdichter der Stufe S das Mantelgas aus der Stufe S-2 und das Kerngas aus der Stufe S+1 an und fördert das verdichtete Düsengas zur Trenneinheit der eigenen Stufe S. Bei der Kerngasversion saugt der Verdichter der Stufe S das Kerngas aus der eigenen Trenneinheit und das Mantelgas aus der Stufe S-3 an und fördert das verdichtete Düsengas zur Stufe S-1. Bei der Mantelgasversion saugt der Verdichter der Stufe S das Mantelgas aus der eigenen Trenneinheit und das Kerngas aus der Stufe S+3 an und fördert das verdichtete Düsengas zur Stufe S+2.

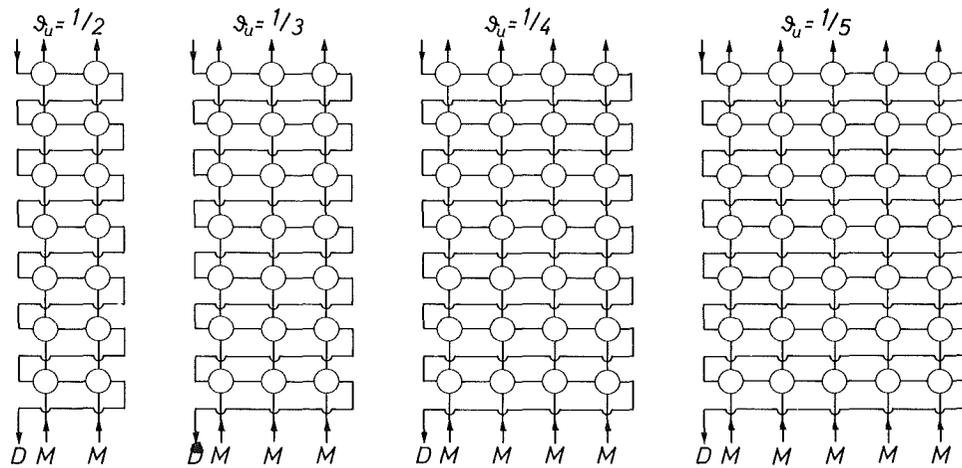
Abb. 5 zeigt die Verschaltung der Trennstufen für die drei Zuordnungsmöglichkeiten bei anderen UF_6 -Abschälverhältnissen⁺⁾ . Man bemerkt, daß mit um eins steigendem Nenner des Uran-Abschälverhältnisses auch die Zahl der parallel nebeneinander aufgestellten Trennstufenreihen sowie die Zahl

+) Beim Trenndüsenverfahren kommen aus Wirtschaftlichkeitsgründen voraussichtlich nur UF_6 -Abschälverhältnisse $\mathfrak{D}_u \leq 1/2$ infrage¹⁾.

Düsengasversion



Kerngasversion



Mantelgasversion

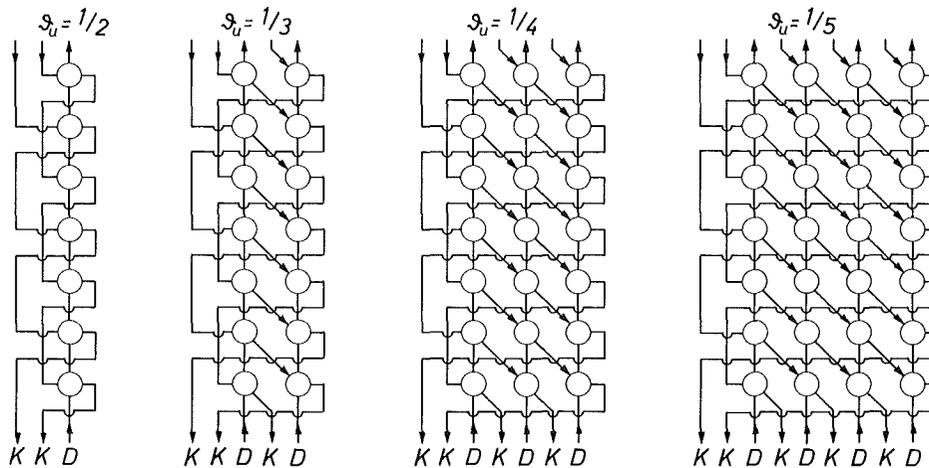


Abb. 5: Die Verschaltung der Trennstufen für die drei Zuordnungsmöglichkeiten und UF₆-Abschälverhältnisse von $\mathfrak{S}_u = 1/2$ bis $\mathfrak{S}_u = 1/5$. Die aus Verdichter, Kühler und Trenneinheit bestehende Trennstufe ist durch einen Kreis symbolisiert. Die Düsengas, Kerngas und Mantelgas führenden Verbindungsleitungen sind mit D, K und M gekennzeichnet.

der kaskadenaufwärts-führenden Rohrleitungen um eins ansteigen. Bei der Mantelgasversion steigt darüber hinaus auch die Zahl der kaskadenabwärts-führenden Rohrleitungen jeweils um eine an.

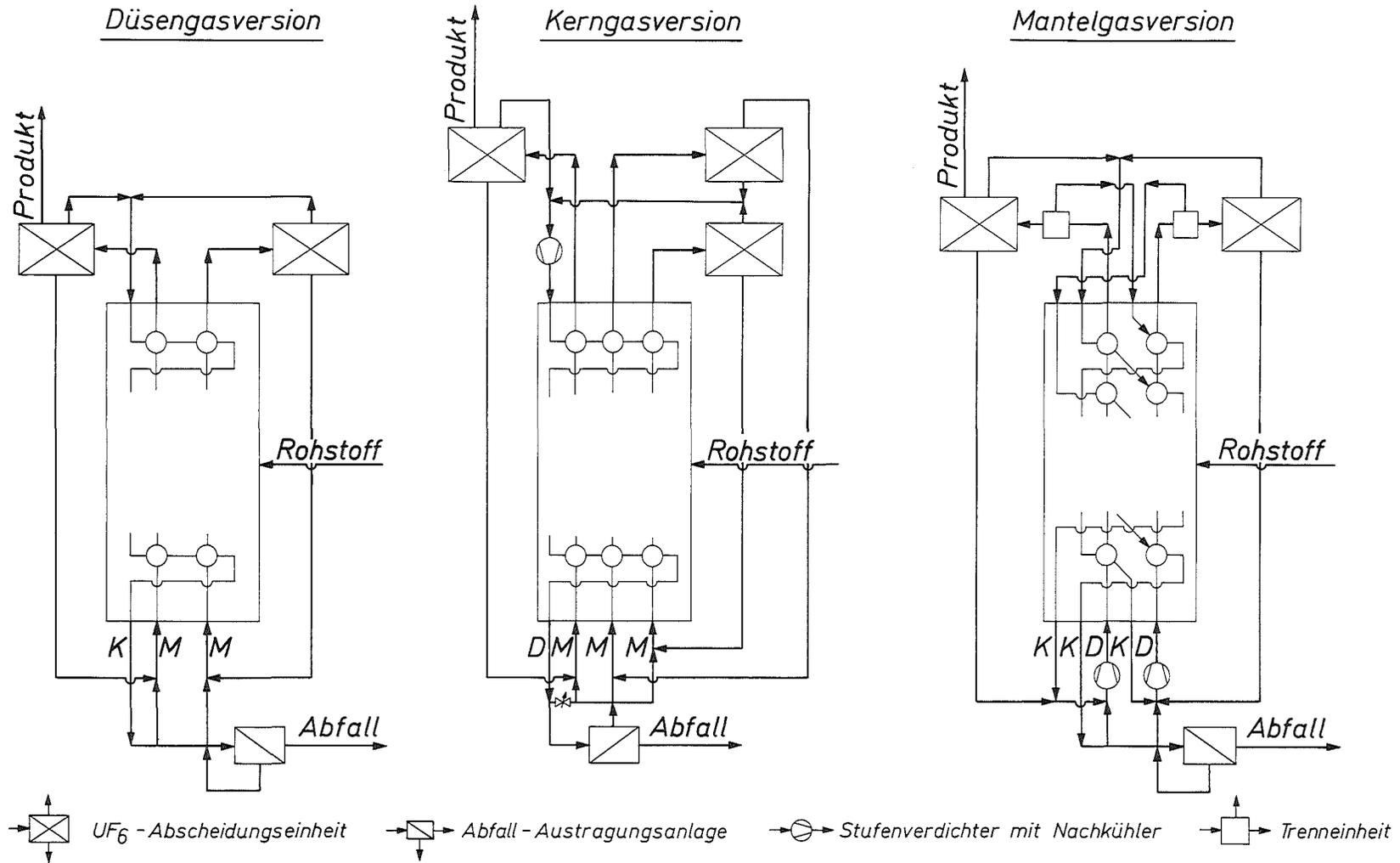
2.3 Der Kaskadenabschluß

Abb. 6 zeigt für die drei Zuordnungen den Abschluß des Kaskadenstrangs mit den UF_6 -Abscheidungseinheiten am Kaskadenkopf und den Gemischverteiltern am Kaskadenfuß für den speziellen Fall $\mathfrak{D}_u = 1/3$.

In den UF_6 -Abscheidungseinheiten wird der größte Teil des UF_6 kontinuierlich mit einer modifizierten Trennstufe abgeschieden, während die Feinabscheidung durch ein diskontinuierliches Ausfrierverfahren erfolgt⁵⁾. Die UF_6 -Abscheidungseinheiten erhalten in allen Fällen das Gemisch aus UF_6 und leichtem Zusatzgas mit der Mantelgaskonzentration bei einem Druck von 150 Torr und geben das reine Zusatzgas und den an UF_6 angereicherten Strom wieder mit einem Druck von 150 Torr ab.

Das vollständig vom UF_6 gereinigte Zusatzgas, dessen Stromstärke mit dem Auswärtstransport des Zusatzgases identisch ist, wird zum Kaskadenfuß zurückgeführt und auf die aufwärtsführenden Gemischleitungen verteilt. Der am Kopf verbleibende mit UF_6 angereicherte Gemischstrom wird auf die abwärts-führenden Leitungen verteilt, so daß am Kaskadenkopf bis auf den Produktstrom kein Nettotransport des UF_6 vorliegt.

Bei der Mantelgasversion müssen die Ankopplungen der UF_6 -Abscheidungseinheiten an die 5 % UF_6 führenden Düsengasleitungen über spezielle Trennstufen erfolgen, die keine Verdichter und Kühler enthalten. Ihr Mantelgas wird den Ab-



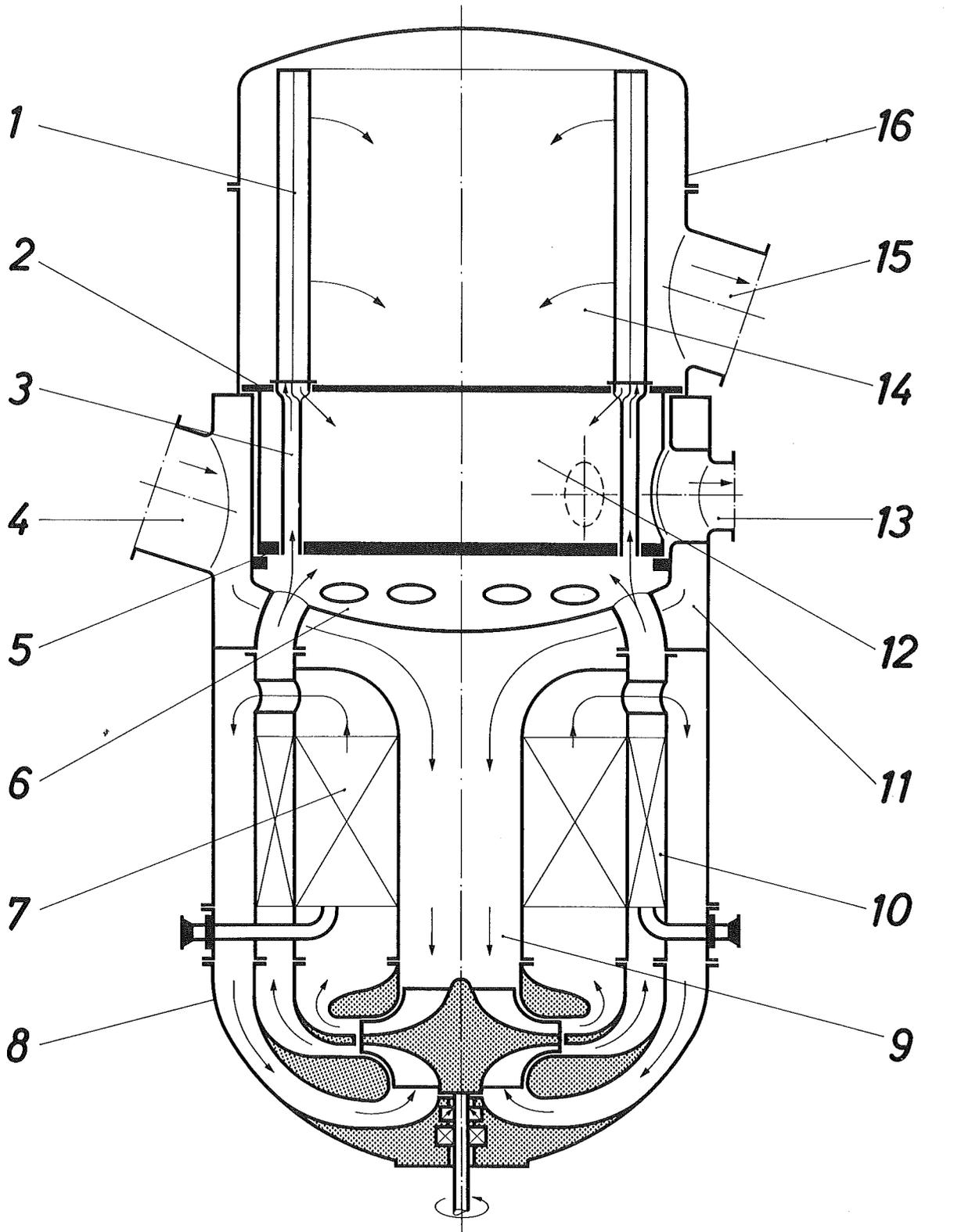
scheidungseinheiten zugeführt, während ihr Kerngas auf eine in den Kaskadenstrang rückführende Kerngasleitung gegeben wird. Das zum Kaskadenfuß zurückgespeiste Zusatzgas wird mit dem dort die Kaskade verlassenden Kerngas vermischt und muß den unteren Trennstufen über zwei Verdichter/Kühler-Aggregate zugeführt werden, die mit den in der Kaskade verwendeten identisch sind. Bei der Kerngasversion muß das aus den UF_6 -Abscheidungseinheiten mit 150 Torr austretende UF_6 -Zusatzgas-Gemisch in einem Verdichter/Kühler-Aggregat auf 600 Torr verdichtet werden, ehe es als kaskadenabwärtsführendes Düsen- gas der obersten Trennstufe am Kaskadenkopf zugespeist werden kann.

Bei der Düsengasversion sind für die Ankopplungen der UF_6 -Abscheidungseinheiten an die Kaskade keine Sonderaggregate erforderlich.

3. Stufenaufbau

3.1 Übergeordnete Gesichtspunkte

Bei den Vorschlägen für den Aufbau der drei Trennstufenversionen sollte die mit dem Prototyp der technischen Trenndüsenstufe³⁾ erprobte gegenseitige räumliche Anordnung der Stufenkomponenten beibehalten werden. Aus Dichtigkeits- und Sicherheitsgründen war anzustreben, die Stufen weitgehendst als Schweißkonstruktion auszubilden und die Anzahl der lösbaren Flanschverbindungen so niedrig wie möglich zu halten. Im Hinblick auf das im Abschnitt 4 behandelte Montage- und Wartungskonzept sollten die Stufen untereinander jedoch durch lösbare Flansche verbunden werden. Um bei den hohen Dichtheitsanforderungen die Ausfallquote der Schweißnähte bei der Herstellung auf einem technisch vernünftigen Wert zu halten, mußten Kehlnähte insbesondere zwischen Verfahrensgas und Atmosphäre soweit als möglich vermieden werden.



- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1 Trennelementrohre | 9 Ansaugrohr |
| 2 obere Halteplatte | 10 Endkühler |
| 3 Verteilerringer | 11 Ringraum |
| 4 Mantelgasstutzen (Eintr.) | 12 Kerngassammelraum |
| 5 untere Halteplatte | 13 Kerngasstutzen (Austr.) |
| 6 Düsegassammelraum | 14 Mantelgassammelraum |
| 7 Zwischenkühler | 15 Mantelgasstutzen (Austr.) |
| 8 Verdichter | 16 Deckel |

Abb. 7: Die Stufenkonstruktion für die Düsegasversion

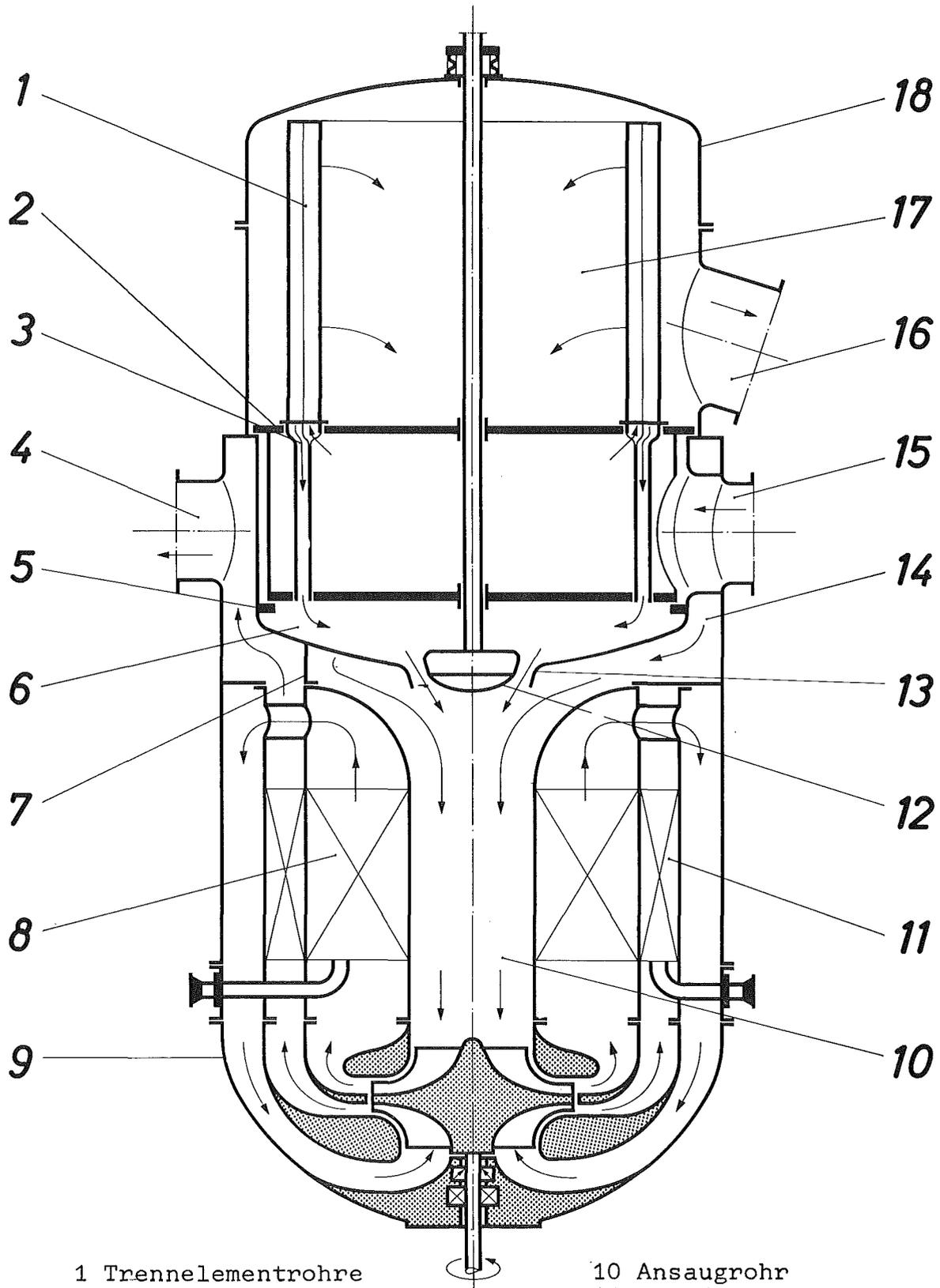
Außerdem war ein konstruktiver Aufbau der Stufe anzustreben, der bei den in Zwangslage durchzuführenden Schweißungen eine gleichzeitige beiderseitige Schweißung ermöglicht.

3.2 Düsengasversion

Abb. 7 zeigt die vorgesehene Stufenkonstruktion für die Düsengasversion. Der über den Kühlern angeordnete Düsengassammelraum sammelt das vom Verdichter komprimierte Düsengas, um es den Trennelementrohren zuzuführen. Dazu sind spezielle Verteilerfinger zwischen zwei den Kerngassammelraum begrenzenden Halteplatten angebracht. Das pro Trennelementrohr auf 5 Kanäle verteilte Düsengas wird im Trenndüsenelement in Kerngas und Mantelgas zerlegt. Das Kerngas strömt in Nachbarkanälen im Trennelementrohr im Gegenstrom zum Düsengas zum Kerngassammelraum durch die Verteilerfinger zurück, um von dort vom Verdichter der Stufe S-1 angesaugt zu werden. Das Mantelgas sammelt sich im Raum um die Trennelementrohre und verläßt die Trennstufe durch einen seitlich angebrachten Stutzen, um von dem in der Kaskade zwei Stufen höher arbeitenden Verdichter angesaugt zu werden. Das von der zwei Stufen niedriger arbeitenden Trenneinheit abgegebene Mantelgas tritt durch einen seitlich angebrachten Stutzen in den Ringraum ein, in den ebenfalls das Kerngas der eine Stufe höher arbeitenden Trenneinheit mündet. Der Ringraum verengt sich konisch und läuft in das Ansaugrohr der 1. Verdichterstufe aus.

3.3 Kerngasversion

Die vorgesehene Stufenkonstruktion für die Kerngasversion geht aus Abb. 8 hervor. Der äußere Ringraum ist diametral geteilt, um auf der einen Seite das Düsengas der Stufe und auf der anderen Seite das Mantelgas der drei Stufen kaskadenabwärts angeordneten Trenneinheit aus- bzw. einführen zu können. Das Mantelgas tritt durch einen schräg nach oben



- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| 1 Trennelementrohre | 10 Ansaugrohr |
| 2 obere Halteplatte | 11 Endkühler |
| 3 Verteilerringer | 12 Drosselkegel |
| 4 Düsengasstutzen (Austr.) | 13 Mischanordnung |
| 5 untere Halteplatte | 14 geteilter Ringraum |
| 6 Kerngassammelraum | 15 Düsengasstutzen (Eintr.) |
| 7 Teilblech | 16 Mantelgasstutzen (Austr.) |
| 8 Zwischenkühler | 17 Mantelgassammelraum |
| 9 Verdichter | 18 Deckel |

Abb. 8: Die Stufenkonstruktion für die Kerngasversion

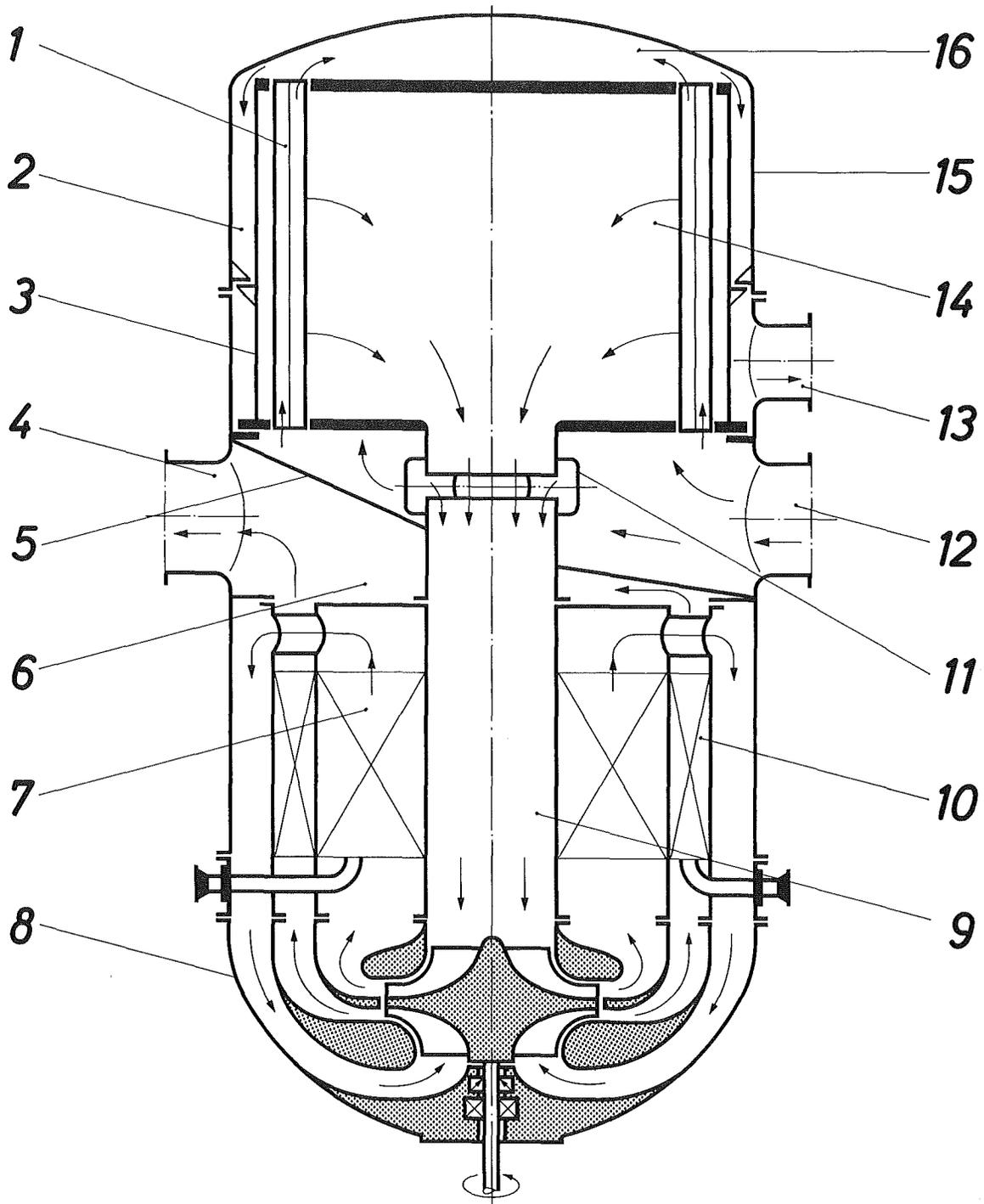
angeordneten Stutzen (im Bild nicht gezeichnet) in den geteilten Ringraum ein und wird vom Verdichter über die Mischanordnung angesaugt. In dieser Mischanordnung wird dem Mantelgas das Kerngas der Stufe beigemischt, das aus den Trennelementrohren über die Verteilerfinger strömt, sich im Kerngassammelraum sammelt und einen Drosselkegel⁺⁾ passiert. Nach der Verdichtung tritt das Düsengas in den geteilten Ringraum ein und verläßt die Stufe durch einen waagerechten Stutzen. Auf der gegenüberliegenden Seite tritt das Düsengas des eine Stufe höher arbeitenden Verdichters ein und wird durch den Ringraum in den inneren Düsengassammelraum zwischen den Halteplatten geführt. Von dort strömt es durch die einzelnen Verteilerfinger in die Trennelementrohre. Das Mantelgas der Stufe sammelt sich im Mantelgassammelraum um die Trennelementrohre und strömt durch einen schräg nach unten verlaufenden Stutzen zur Stufe S+3.

3.4 Mantelgasversion

Abb. 9 zeigt die für die Mantelgasversion vorgesehene Stufenkonstruktion mit Trennelementrohren, in denen im Gegensatz zu den beiden anderen Versionen Düsengas und Kerngas gleichsinnig geführt sind. Das von dem in der Kaskade zwei Stufen tiefer arbeitenden Verdichter komprimierte Düsengas strömt oberhalb eines schrägen Teilblechs in die Stufe ein und verteilt sich auf die Trennelementrohre. Das dort anfallende Mantelgas sammelt sich um die Trennelementrohre und wird vom Stufenverdichter angesaugt. Über eine Mischvorrichtung wird das Kerngas der drei Stufen höher arbeitenden Trenneinheit dem Mantelgas zugespeist. Das Düsengas kommt vom Endkühler in den Düsengassammelraum unterhalb des Teilblechs und strömt

+) Die fertigungsbedingten Abweichungen des UF_6 -Abschälverhältnisses vom Sollwert können durch den Rückstau des ⁶⁾ Kerngases innerhalb gewisser Grenzen eliminiert werden⁶⁾.

6) E.W. Becker, G. Frey, R. Schütte, D. Seidel, Z. Atomwirtschaft 13, 359 (1968)



- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1 Trennelementrohre | 9 Ansaugrohr |
| 2 Ringraum | 10 Endkühler |
| 3 Korb | 11 Mischvorrichtung |
| 4 Düsen gasstutzen (Austr.) | 12 Düsen gasstutzen (Eintr.) |
| 5 Teilblech | 13 Kern gasstutzen (Austr.) |
| 6 Düsen gasammelraum | 14 Mantel gasammelraum |
| 7 Zwischenkühler | 15 Deckel |
| 8 Verdichter | 16 Kern gasammelraum |

Abb. 9: Die Stufenkonstruktion für die Mantelgasversion

durch einen waagrecht liegenden Stutzen der in der Kaskade zwei Stufen höher angeordneten Trenneinheit zu.

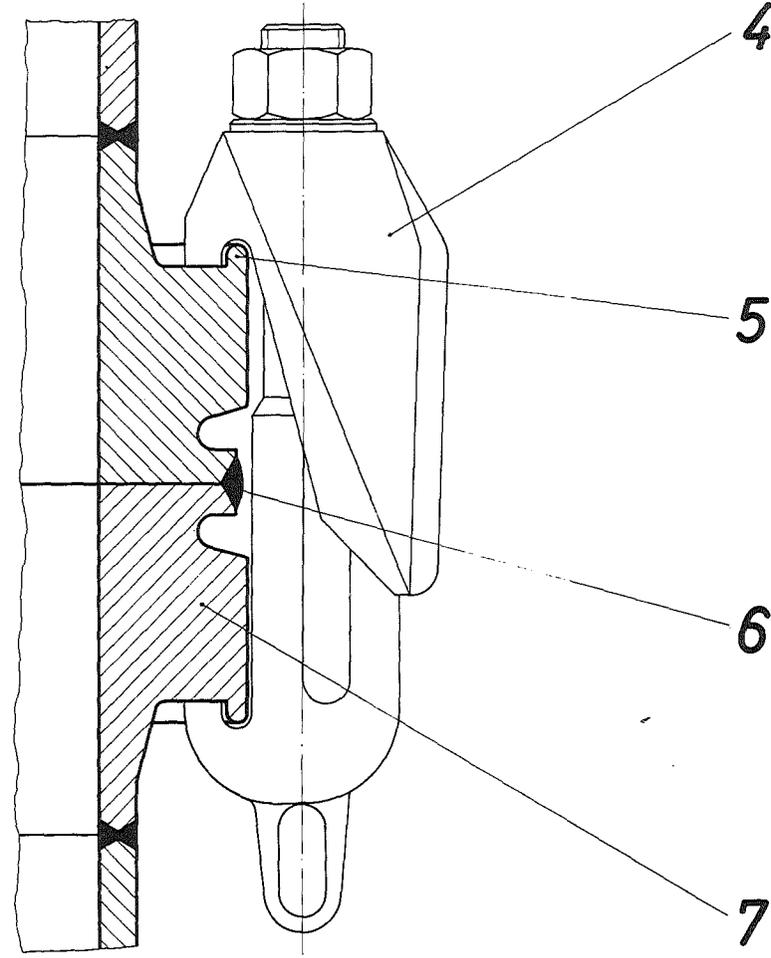
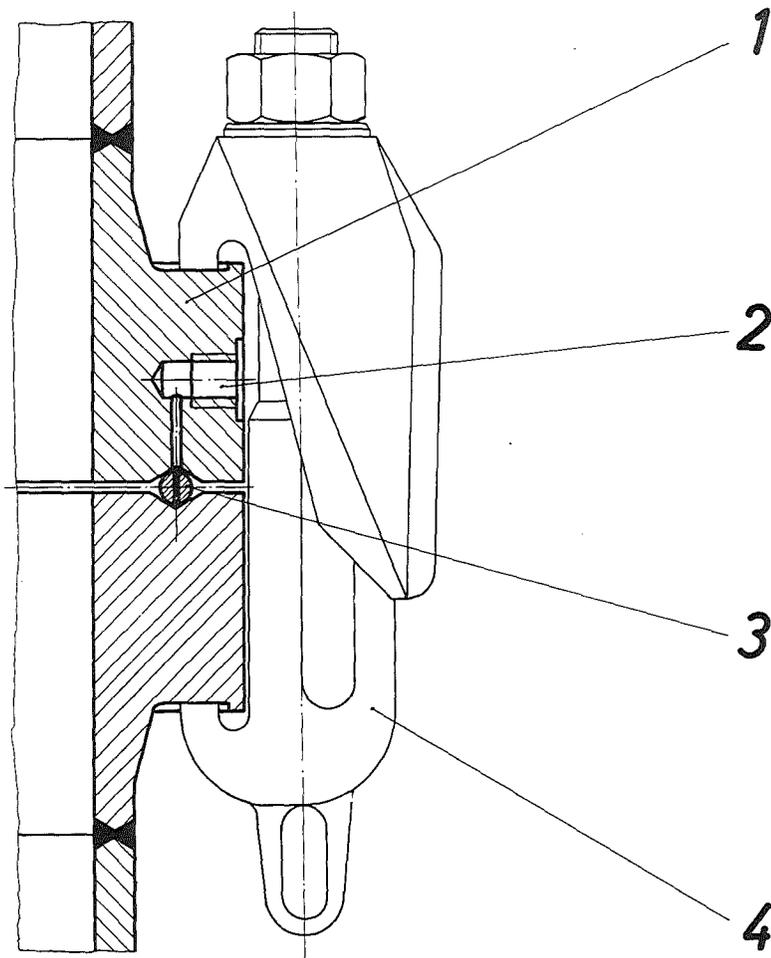
Das Kerngas verläßt die Trennelementrohre am Kopf und strömt im äußeren Ringraum zum Austrittsstutzen. Die Trennelementrohre sind hier in einem Korb mit zusätzlichem äußeren Mantel untergebracht, der es ermöglicht, das Kerngas tief herunter zu führen und damit auch den Behälterflansch niedrig anzuordnen. Zusammen mit der Befestigung des Trennelementkorbes am Behälterdeckel führt dies zu einer ähnlich niedrigen Ausbauhöhe wie bei den beiden anderen Versionen.

3.5 Verbindungs- und Schweißtechnik

Die hohe Korrosivität und Zersetzlichkeit des Verfahrensgases bei Anwesenheit von Spuren von H_2O erfordert eine extrem hohe Dichtheit der Trennstufen und Verbindungsleitungen. Darüberhinaus schränkt das Verfahrensgas und eine eventuell erforderliche Konditionierung der Anlage mit hochaggressiven Mitteln die Auswahl der beständigen Dichtungswerkstoffe stark ein. Metalldichtungen, sowie Teflon und Kel-F haben sich als korrosionsfest erwiesen, während das in der Technik weitverbreitete Viton nur bedingt einsetzbar ist und bei längerem Einsatz versprödet. Teflon- und Kel-F-Dichtungen weisen jedoch eine hohe Permeationsrate besonders für Wasserdampf auf, so daß ihr Einsatz auf interne Abdichtungen innerhalb der Trennstufe beschränkt bleibt. Die Abdichtung nach außen muß daher mit Metalldichtungen erfolgen, sofern eine Verschweißung aus konstruktiven Gründen nicht möglich ist.

Abb. 10. zeigt zwei in Zusammenarbeit mit der Fa. Linde AG entwickelte und erprobte Metall-Dichtsyste-me.

Das System mit Metalldichtung stellt die Weiterentwicklung einer in der Technik bewährten Dichtungsart dar, bei der durch axiale Anbohrung des Dichtrings und Anbringung einer



a) System mit Metaldichtung und Lecksuchmöglichkeit

b) System mit Schweißlippe und Führungsschiene für Schweißautomaten

- | | | | |
|-------------------|----------------------------------|-------------------|-----------|
| 1 Flansch | 3 Metaldichtring mit Querbohrung | 5 Führungsschiene | 7 Flansch |
| 2 Lecksuchbohrung | 4 Segment-Klammerschraube | 6 Schweißlippe | |

Abb. 10: Zwei in Zusammenarbeit mit der Fa. LINDE AG entwickelte und erprobte Metaldichtsysteme

Anschlußbohrung im Flansch eine einfache Lecktestmöglichkeit gegeben ist. Es werden Dichtheiten von ca. $10^{-7} \frac{\text{Torr ltr}}{\text{sec} \cdot \text{m}}$ He und kleiner erreicht, die die gestellten Bedingungen voll erfüllen.

Ein Test der gezeigten Schweißlippendichtung unter Verfahrensbedingungen erbrachte keinerlei Beanstandung. Die Dichtung kann mehrmals aufgeschnitten und wieder verschweißt werden, wobei durch die konstruktive Ausführung einer Führungsschiene einem späteren Einsatz eines Schweißautomaten besonders bei waagrechter Lage des Flansches Rechnung getragen ist.

Die durchgeführten Schweißuntersuchungen sollten Klarheit darüber verschaffen, ob ein einseitiges Verschweißen von AlMg 3 Teilen in Zwangslage unter Einhaltung der geforderten Dichtheiten und Spaltfreiheiten möglich und wirtschaftlich ist. Es wurde in längeren Versuchsserien festgestellt, daß die gestellten Forderungen nur bei exakter Beachtung der Schweißparameter erfüllt werden können. Hierzu zählt insbesondere eine maschinelle Bearbeitung der Schweißkanten und Einstellung von Schweißspalten von ca. 0,1 mm, wodurch ein einseitiges Schweißverfahren unwirtschaftlich wird. Als günstig hat sich ein Verfahren erwiesen, bei dem zunächst die Wurzellage bei Schweißspalten von bis zu 50 % der Blechdicke beidseitig und gleichzeitig nach dem WIG-Verfahren⁺ geschweißt wird. Anschließend werden die Decklagen einseitig nach dem MIG-Verfahren⁺⁺ aufgebracht. Für den Einsatz eines Schweißautomaten in Zwangslage gilt das schon für die einseitige Schweißung Gesagte, so daß beim heutigen Stand der Technik eine manuelle beidseitige Schweißung bei den gestellten Bedingungen die wirtschaftlichste Lösung darstellt.

+) Der Lichtbogen brennt beim WIG-Verfahren (Wolfram-Inertgas) zwischen der nicht abschmelzenden Wolfram-Elektrode und dem Werkstück.

++) Der Lichtbogen brennt beim MIG-Verfahren (Metall-Inertgas) zwischen der abschmelzenden Zusatzwerkstoff-Elektrode und dem Werkstück.

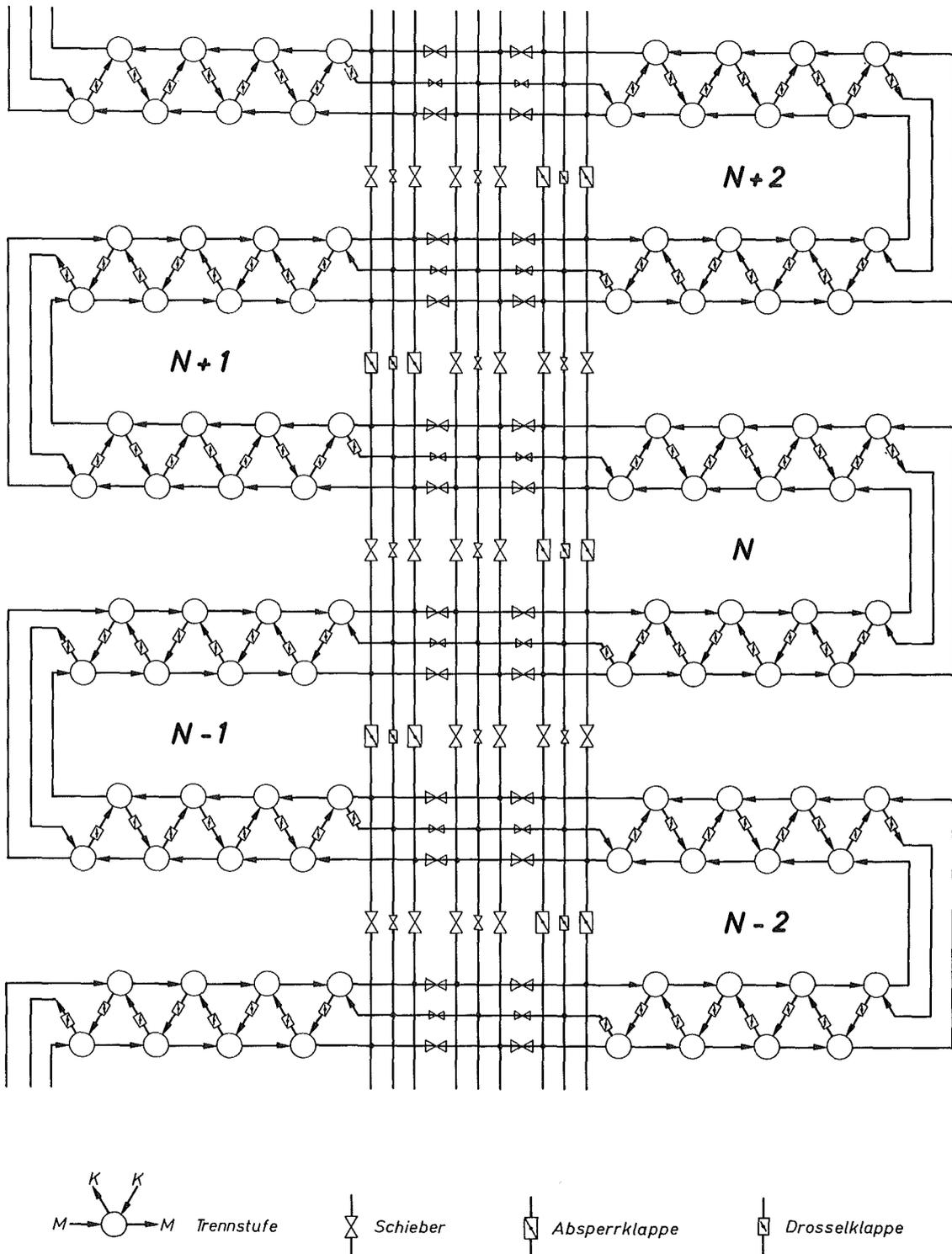


Abb. 11: Die Verschaltung der Trennstufen und Verfahrensgasleitungen mit dem Ventilsystem; beispielhaft gezeigt für die Düsendgasversion und ein UF_6 -Abschälverhältnis $\mathfrak{J}_u = 1/3$.

4. Kaskadenaufbau

4.1 Übergeordnete Gesichtspunkte

Die räumliche Anordnung der Stufen und Verbindungsleitungen mußte außer dem Verschaltungsplan (vgl. Abb. 5) auch dem in Abschnitt 4.4 besprochenen Montage-, sowie dem in Abschnitt 4.5 dargelegten Wartungskonzept gerecht werden. Bei Verwendung des brennbaren Wasserstoffs als leichtes Zusatzgas ist zur Erfüllung der Sicherheitsforderungen u.a. eine Bildung zündfähigen Gemisches zu verhindern. Hierzu wird eine Inertgasumhüllung der Stufen und aller verfahrensgasführender Leitungen in Erwägung gezogen⁺⁾ . Der Kaskadenaufbau wird zunächst für diesen Fall konzipiert, während eventuelle Vereinfachungen bei der Wahl des inerten Heliums im Kapitel 5 diskutiert werden.

Eine hohe Verfügbarkeit der aus einigen hundert Trennstufen aufgebauten Trenndüsenkaskade mußte durch Unterteilung der Kaskade in einzelne separat abschaltbare Gruppen angestrebt werden. Das dazu benötigte Ventilsystem mußte einmal ein Ein- und Ausschalten, sowie Überbrücken der Gruppen ermöglichen, zum anderen eine Wartung der eingesetzten Ventile bei in Betrieb befindlicher Kaskade gestatten.

4.2 Rohrleitungssystem

Abb. 11 zeigt beispielhaft für die Düsengasversion und ein UF_6 -Abschälverhältnis $\vartheta_u = 1/3$ die verfahrenstechnisch günstigste Verschaltung der Trennstufen und Verfahrensgasleitungen mit dem Ventilsystem. Man erkennt bei der Aufstellung der Trennstufen die Ausnutzung des Stufensprungs der Mantelgasfraktion um zwei Stufen und der Kerngasfraktion um eine

+) Vergl.: Sicherheitsstudie der Fa. Linde AG vom 14.12.1971 (unveröffentlicht)

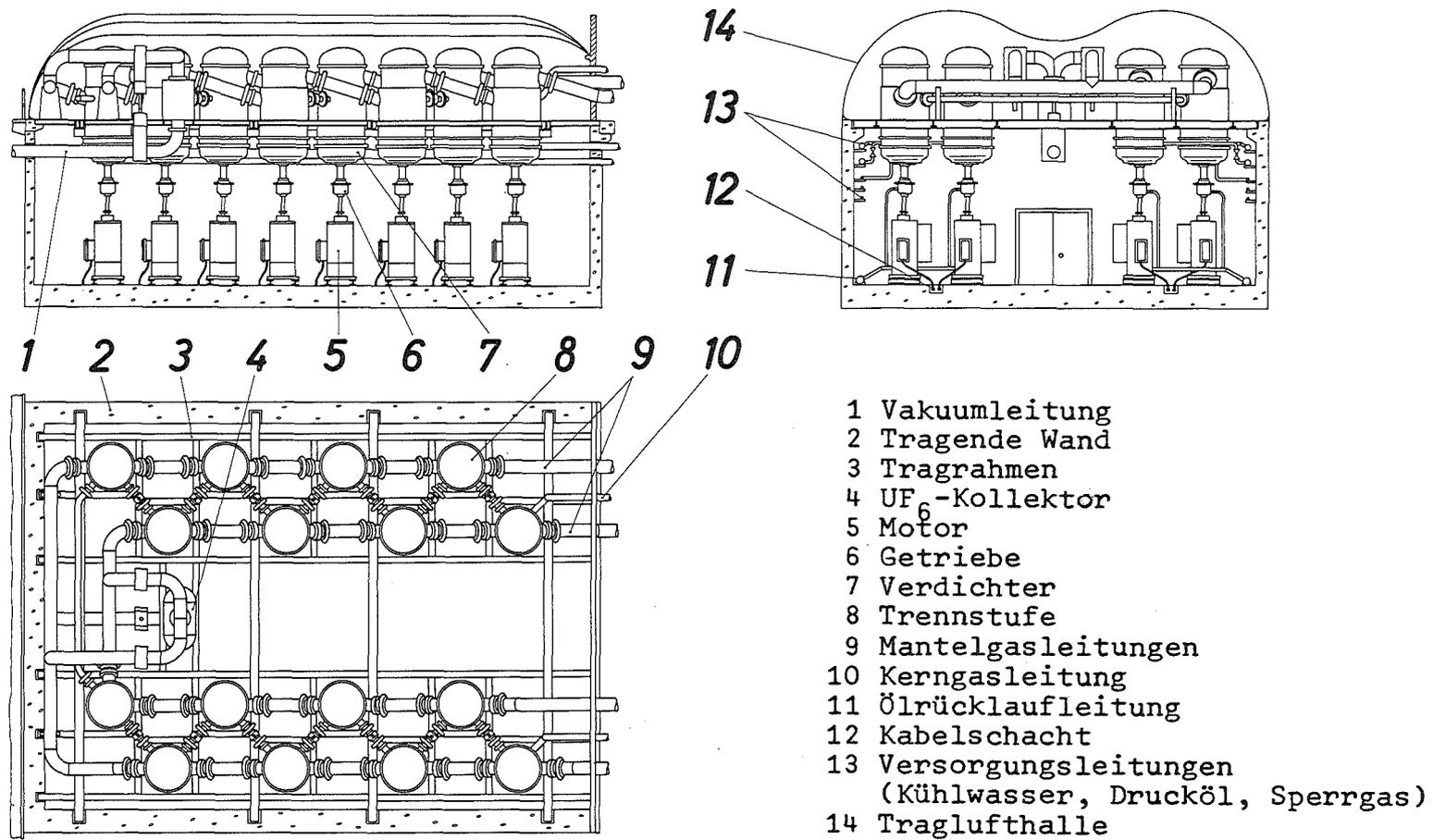


Abb. 12: Die vorgesehene Aufstellung der Trennstufen einer Gruppe in einer Zelle; gezeigt für die Düsendgasversion und ein UF₆-Abschälverhältnis $\mathfrak{D}_u = 1/3$.

Stufe, wodurch eine kreuzungsfreie Rohrleitungsführung ermöglicht wird. Bei der gewählten Gruppengröße von 16 Trennstufen⁺) hat sich in theoretischen Untersuchungen die U-förmige, mäanderartige Anordnung der Trennstufen-Zweierreihe beiderseits des zentral verlaufenden Kurzschluß- und Umgehungsleitungstraktes als günstig erwiesen. Die mögliche I-förmige Anordnung⁺⁺⁾ ist bei kleineren Stufenzahlen günstig, während eine geradlinige Anordnung der Zweier-Reihe der Trennstufen den Montage- und Sicherheitsanforderungen nur ungenügend gerecht wird. Die in den Kerngasleitungen zwischen den Trennstufen angeordneten Drosselklappen dienen zur exakten Einstellung des UF_6 -Abschälverhältnisses auf den Sollwert⁶⁾.

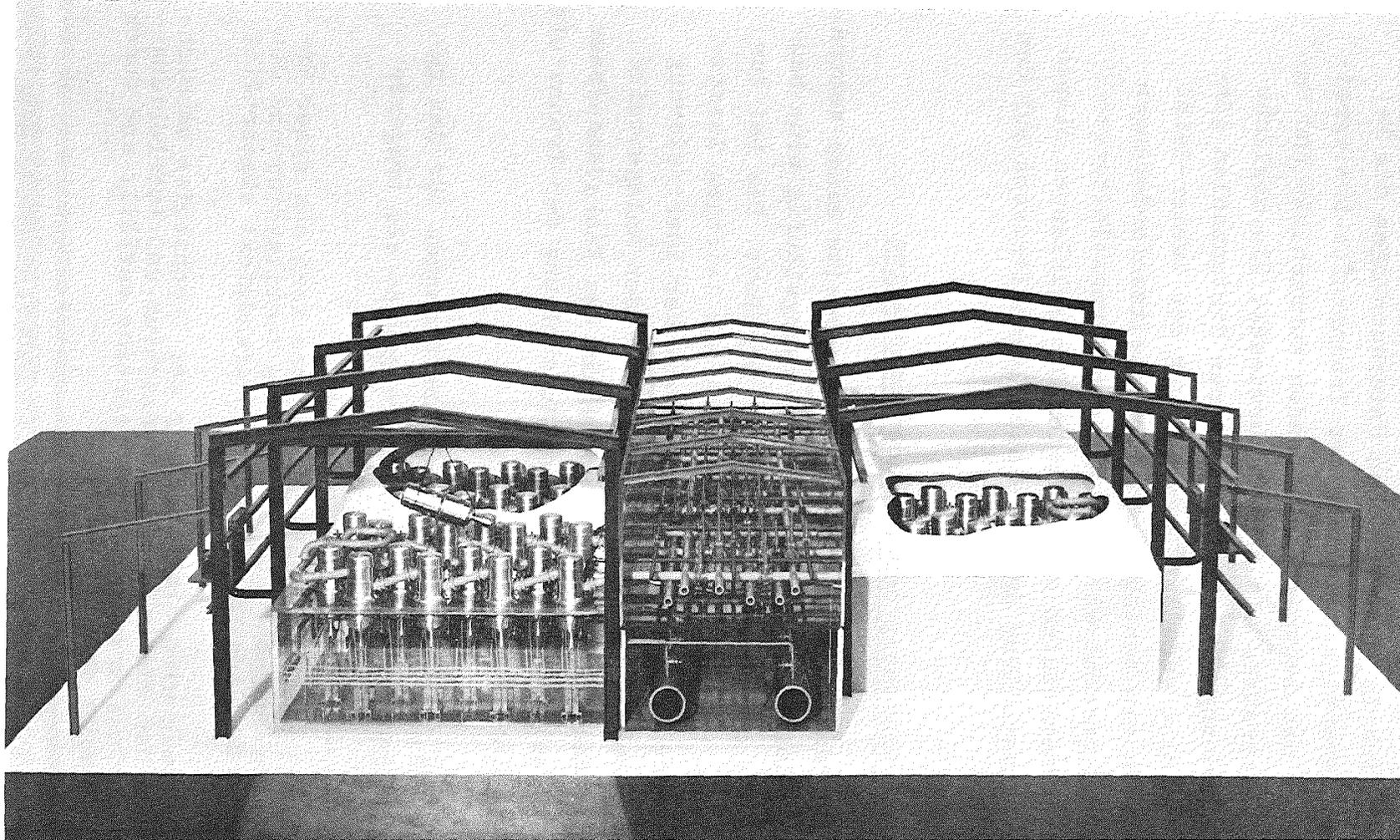
4.3 Räumliche Anordnung der Kaskadenkomponenten

Durch die Anordnung der Trennstufen beiderseits eines zentral verlaufenden Rohrleitungstraktes wird zwangsläufig eine bauliche Trennung der Trennstufengruppen erreicht. Die bei der Verwendung des brennbaren Wasserstoffs als leichtes Zusatzgas vorgesehene Zellenbauweise zum Zweck der Inertisierung der verfahrensmäßig Wasserstoff- UF_6 führenden Anlagenteile stellt somit keine besondere Erschwernis des Kaskadenaufbaus dar. Abb. 12 zeigt die vorgesehene Aufstellung der Trennstufen einer Gruppe in einer Zelle.

Es bot sich an, die erforderlichen Abstützungen für den gemeinsamen Tragrahmen einer Trennstufengruppe als tragende

+) Die günstigste Stufenzahl pro Gruppe kann aus einer Gegenüberstellung der Kosten für das Ventilsystem und den Produktausfallkosten bei einem Stufendefekt abgeschätzt werden.

++) Als I-förmig wird die Anordnung der Trennstufen bezeichnet, bei der die wieder zum Kurzschluß- und Rohrleitungstrakt zurückführende Trennstufenreihe entfällt und durch Rohrleitungen ersetzt wird.



A.N.3075-2204

Abb. 13: Ansicht des Modells des vorgeschlagenen Kaskadenaufbaus.

Wände einer Zellenstruktur auszuführen, die senkrecht zu dem zentral verlaufenden Rohrleitungstrakt liegen. Dadurch wird das Untergeschoß einer Zelle für die Trennstufen gebildet. Hierin sind die Motore und Getriebe der Trennstufen aufgestellt. Das Stufenunterteil mit Verdichter und Kühler hängt von dem die Zwischendecke bildenden Tragrahmen in diesen unteren Zellenteil herab, während die Verfahrensgasleitungen zwischen den Stufen oberhalb des Tragrahmens verlaufen. Man erhält so eine klare Trennung von Verfahrensgasleitungen oberhalb des Tragrahmens und Hilfsmedien wie Wasser, Öl, Strom etc. sowie konventionellen Anlagenbauteilen unterhalb des Tragrahmens. Oberhalb des Tragrahmens wird die Zelle mit einer Traglufthalle abgeschlossen, die mit dem vorgesehenen Inertgas aufgeblasen wird.

Die räumliche Anordnung der Komponenten einer Trenndüsenkaskade untereinander wurde mit Hilfe von Lay-Out-Modellen erarbeitet. Abb. 13 zeigt die Ansicht des Modells des vorgeschlagenen Kaskadenaufbaus. Die schon bei der Zellenstruktur durchgeführte vertikale Trennung von Verfahrensgasleitungen und konventionellen Anlagenbauteilen wurde auch beim zentral verlaufenden Rohrleitungstrakt beibehalten. Die räumliche Abgrenzung des Rohrleitungstraktes gegenüber den Trennstufenzellen ergibt sich durch die bauliche Gliederung in Haupthallen, die die Zellen aufnehmen und in eine Mittelhalle, die den Rohrleitungstrakt aufnimmt. Diese Mittelhalle wird von einigen Schotts unterteilt und oberhalb des Zwischenbodens vollständig inertisiert, während die Haupthallen und Seitenhallen atmosphärische Luft enthalten und damit frei begehbar sind. In den niedrigeren Seitenhallen sind Hilfsanlagen und Wartenräume untergebracht.

4.4 Montagekonzept

Das Montagekonzept sieht vor, vorgefertigte Einheiten auf der Baustelle möglichst nur kraftschlüssig zu verbinden und speziell Schweißarbeiten an verfahrensmäßigen Anlagenteilen nur dort zuzulassen, wo eine Prüfung und Reinigung der Schweißnaht nachträglich möglich ist. Auf spezielle Hebezeuge sollte bei der Erstmontage so weit als möglich verzichtet werden. Die Montage der Einzelteile mit Hilfe der Hallenkräne muß dann in der Reihenfolge geschehen, daß die untenstehenden Teile wie Motore und Getriebe zunächst montiert werden, und anschließend die darüber angeordneten Teile eingebaut werden (Vergl. hierzu Abb. 12). Nach der Montage der Motore einer Gruppe wird der Stufentragrahmen als vorgefertigte Einheit auf die Stützmauern aufgelegt und in vorgesehenen Aussparungen ausgerichtet und vergossen. Der Rahmen ist mit sämtlichen Anschlußbohrungen versehen, um die Trennstufen auf ihm millimetergenau ausrichten und befestigen zu können. Die Trennstufen werden als komplett montierte, leckgetestete und gereinigte Einheiten angeliefert und haben mit Blinddeckeln versehene Anschlußflansche nach dem in Abb. 10 gezeigten Metalldichtsystem. Nach Befestigung der Stufen auf dem Tragrahmen werden die Motore ausgerichtet, die Wellen gekuppelt und sämtliche Hilfsmedien, wie Wasser, Öl, Strom etc. angeschlossen.

Im letzten Arbeitsgang, nachdem für entsprechende Sauberkeit des Arbeitsplatzes Sorge getragen ist, werden die vorgefertigten und gereinigten Rohrleitungsstücke zwischen den Stufen eingebaut und die Dichtstellen mit einem He-Lecktest auf Dichtheit überprüft. Die Rohrstücke tragen je zwei Dehnungskörper zum Ausgleich von kleinen Montagetoleranzen und zur Aufnahme der Wärmedehnungen.

Der Rohrleitungstrakt, der die Kurzschluß- und Umgehungsleitungen enthält, wird dagegen verschweißt. Die Ventile bilden

die Fixpunkte im Rohrleitungssystem, und durch eingebaute Dehnungskörper werden sowohl Schweißspannungen, als auch Wärmespannungen aufgenommen. Das Konzept der vollständigen Verschweißung kann hier angewandt werden, da durch geeigneten Arbeitsablauf ein inneres Gegenschweißen der Rundnähte und eine nachträgliche Reinigung mit erträglichem Aufwand durchzuführen sind. Dabei wird allerdings davon ausgegangen, daß sowohl die Schieber- als auch die Absperrklappeneinsätze austauschbar sind, während die Gehäuse fest eingeschweißt bleiben. Läßt sich eine preisgünstige Konstruktion für die Absperrklappen mit austauschbarem Innenteil nicht finden, so müssen diese in die Rohrleitungen eingeflanscht, bzw. durch Schieber ersetzt werden.

Für die Trennstufen-Hallen und den Rohrleitungstrakt sind separate Krananlagen vorhanden, so daß gleichzeitig unabhängig an den einzelnen Anlagenabschnitten gearbeitet werden kann.

4.5 Wartungskonzept

Das Wartungskonzept sieht vor, im Störfall oder bei größeren Wartungsarbeiten sämtliche mit Verfahrensgas berührten Stufenteile wie Verdichter, Kühler etc. im kompletten Verbund mit der Trennstufe gegen eine neue betriebsbereite Reservestufe auszutauschen. Motor und Getriebe können einzeln ausgetauscht werden, ohne die Stufe aus dem Gruppenverband entfernen zu müssen.

Zum Ausbau einer Trennstufe ist vorgesehen, mit einem auf Schienen fahrbaren Pumpstand über einen ortsfesten, gruppenspezifischen UF_6 -Kollektor die entsprechende Gruppe zu evakuieren, mit Inertgas zu fluten und unter Inertgasatmosphäre die verbindenden Rohrstücke zur defekten Stufe zu lösen, sowie die offenen Stutzen mit Blindflanschen vakuumdicht zu verschließen. Sodann kann das Tragluftzelt entfernt, die

Stufe herausgehoben und eine Reservestufe eingesetzt werden. Die Anflanschung an die Gruppe erfolgt entsprechend in umgekehrter Reihenfolge wie beim Ausbau. Die defekte ausgebaut Stufe wird in einem speziellen Clean-Raum repariert, auf einem Prüfstand getestet und ins Reserveteillager übernommen.

Da angenommen werden kann, daß eine Störung an den Trennelementen nicht vorkommt, ist der obere Stufenflansch als Schweißlippendichtung ausgeführt. Bei einem eventuellen später erfolgenden Einbau verbesserter Trennelemente wird dieser Flansch vor Ort aufgeschnitten, die Elemente werden gewechselt und der Flansch erneut verschweißt.

Wartungsarbeiten an Schiebern und Drosselklappen müssen innerhalb der unter Inertgasatmosphäre stehenden Mittelhalle durchgeführt werden, da ein Belüften der Abteilungen die Sicherheitsvorkehrungen durchbrechen würde und daher nicht zulässig ist. Die Arbeiten am Ventilsystem beschränken sich aber auf ein Austauschen von Schieber- oder Absperrklappen-Einsätzen und stellen somit keine diffizile Arbeit dar. Da die Mehrzahl der Schieber und Absperrklappen nur bei von Verfahrensgas entleerter Gruppe gewartet werden können, soll die Evakuierung des Rohrleitungstraktes über die entsprechende Trennstufengruppe erfolgen.

5. Diskussion der Ergebnisse

Der im Kapitel 4 vorgeschlagene Kaskadenaufbau wurde anhand der Düsengasversion gezeigt. Für die beiden anderen Versionen ändert sich dieser Aufbau nicht prinzipiell. Es wird jedoch aus Abb. 5 ersichtlich, daß das Rohrleitungssystem und die Verschaltung der Trennstufen untereinander deutlich komplizierter werden, als bei der Düsengasversion.

Die besondere Einfachheit der Stufenverschaltung der Düsengasversion läßt sich damit erklären, daß hier konsequent die Tatsache beachtet wird, daß nach der Verdichtung des Düsengases keine Verzweigung oder Vermischung von Gasströmen erfolgt, sondern direkt die Trenneinheit gespeist wird. Das Kerngas und das Mantelgas der Trenneinheit müssen dagegen anderen Trenneinheiten zugespeist werden, so daß das Führen dieser Fraktionen innerhalb derselben Trennstufe nur einen Umweg mit entsprechend komplizierterer Rohrleitungsführung zur Folge hat.

Die ebenfalls besondere Einfachheit des Kaskadenabschlusses bei der Düsengasversion läßt sich plausibel aus der Größe der kaskadenaufwärts führenden Verfahrensgasströme ableiten. So zeigt eine Addition der Molströme der kaskadenaufwärts führenden Gemische den kleinsten Wert für die Düsengasversion, während die Kerngas- bzw. die Mantelgasversion deutlich größere Molströme zum Kaskadenkopf führen.

Die Anfertigung der konstruktiven Stufenentwürfe erfolgte unter dem Gesichtspunkt, daß die in der Prototyptrennstufe bewährten Konstruktionen für den Aufbau der Trennstufen übernommen werden sollten. Hierzu zählte insbesondere der zweistufige Radialverdichter, der seine Bewährungsprobe bestanden hat³⁾.

Der Aufbau der Trennstufe nach der Düsengasversion würde sich jedoch im Bereich des Düsengassammelraumes deutlich einfacher gestalten, wenn das Verdichterkonzept hinsichtlich der Führung der Verfahrensgasströme geändert würde, unter Beibehaltung des prinzipiellen konstruktiven Konzepts der fliegend gelagerten, Rücken an Rücken sitzenden Verdichterlaufräder. Und zwar sollte das Gemisch aus Kerngas- und Mantelgas anderer Trenneinheiten von dem unteren Laufrad als erster Stufe angesaugt werden und das obere Laufrad als zweite Stufe die Verdichtung des Gemisches auf den Ausgangsdruck vollziehen. Hierzu müßte die gasdynamische Auslegung des Verdichters geändert werden, sowie eventuell die Lagerung, da der dann umgekehrt auftretende Axialschub des Verdichters im Gegensatz zum bisherigen Prototypverdichter sich zum Laufradgewicht addieren würde. Bei der Kerngas- und Mantelgasversion brächte ein derart geänderter Verdichter keinen Vorteil gegenüber dem bisherigen Konzept.

Diese Überlegungen fanden aber noch keinen Eingang in die Stufenkonstruktion der Düsengasversion, weil zunächst die Betriebserprobung eines geänderten Prototypverdichters stattfinden müßte.

Die Realisierung der geplanten Trenndüsendemonstrationsanlage mit einer Jahresleistung von ca. 160 to 3%igen U^{235} -Konzentrats³⁾ ist in mehreren Schritten vorgesehen. Dabei soll zunächst mit wenigen Trennstufengruppen das Betriebsverhalten der Trennstufen im Verbund mit den UF_6 -Abscheidungseinheiten erprobt werden. Diese Versuchskaskade würde innerhalb der Trenndüsendemonstrationsanlage den obersten Teil des Anreicherungsabschnittes darstellen. In den weiteren Ausbauphasen soll auf den gewonnenen Erkenntnissen der Versuchskaskade aufbauend diese weiter zum Kopfteil des Anreicherungsabschnittes ausgebaut werden. Durch Anfügen des Basisteils mit Trennstufen der dreifachen Durchsatzleistung gegenüber dem Kopfteil sowie

eines Fußteils mit gleichen Trennstufen wie im Kopfteil wird der Endausbau der Trenndüsendemonstrationsanlage erreicht.

Bei der Versuchskaskade soll der in Abb. 13 dargestellte Kaskadenaufbau verwirklicht werden. Das dort vorgeschlagene Rohrleitungssystem mit der Möglichkeit der Wartung sämtlicher Absperrorgane bei produzierender Kaskade wurde aus mangelnder Erfahrung mit derart hochqualifizierten Absperrorganen konzipiert. Die z.Zt. anlaufende Versuchsreihe mit Schiebern der Nennweite 600 wird einige Erfahrungen bezüglich der Betriebssicherheit und Dichtheit der Absperrorgane erbringen. Danach kann sich bei positiven Ergebnissen die Möglichkeit andeuten, bei der Rohrleitungsverschaltung der Kaskade auf die Wartungsmöglichkeit der Absperrorgane zu verzichten. Dies würde die Zahl der Absperrorgane um 20 % verringern bei gleichzeitiger Einsparung an Rohrleitungen und Verbindungsstücken, ohne jedoch eine Änderung der räumlichen Anordnung von Trennstufengruppen und Rohrleitungstrakt zu bewirken.

Die wegen der möglichen Verwendung des brennbaren Wasserstoffs als leichtes Zusatzgas aus Sicherheitsgründen vorgesehene Zellenbauweise dürfte auch bei Verwendung des inerten Heliums als Zusatzgas zweckmäßig sein, da sie u.a. die Wartung der einzelnen Gruppen infolge der geringeren Geräuschbelästigung erleichtert. Die räumliche Anordnung von Trennstufengruppen und Rohrleitungstrakt würde nicht geändert, wogegen die hermetische Umschließung der Trennstufen und des Rohrleitungstraktes durch die Traglufthallen, sowie die Abschottung der Mittelhalle entfallen könnte.

Um ein Eindringen von Luftfeuchtigkeit in die Anlage bei Wartungsarbeiten zu verhindern, könnten die betroffene Gruppe oder der entsprechende Abschnitt des Rohrleitungstraktes durch Überstülpen eines Tragluftzeltes mit trockener Luft beaufschlagt, und die Wartungsarbeiten wie in Kap. 4.5 durchgeführt werden.

