

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

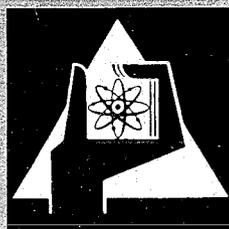
Februar 1967

KFK 550

Institut für Kernverfahrenstechnik

Erprobung des Trenndüsenverfahrens in einem geschlossenen  
Verfahrenskreislauf

R. Schütte, D. Seidel



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



SONDERDRUCK aus der Zeitschrift

# CHEMIE-INGENIEUR-TECHNIK

Zeitschrift für technische Chemie, Verfahrenstechnik und Apparatewesen

---

39. Jahrgang 1967

Heft 2

Seite 80-84

---

Verlag Chemie GmbH · Weinheim/Bergstr.

## Erprobung des Trenndüsenverfahrens in einem geschlossenen Verfahrenskreislauf

Dr.-Ing. R. SCHÜTTE und Dipl.-Ing. D. SEIDEL  
Institut für Kernverfahrenstechnik  
der Technischen Hochschule und des Kernforschungszentrums Karlsruhe

# MEMORANDUM FOR THE RECORD

DATE: 10/10/54  
SUBJECT: [Illegible]

[Illegible text]

# Erprobung des Trenndüsenverfahrens in einem geschlossenen Verfahrenskreislauf

DR.-ING. R. SCHÜTTE UND DIPL.-ING. D. SEIDEL

Institut für Kernverfahrenstechnik der Technischen Hochschule und des Kernforschungszentrums Karlsruhe

Bei einer praktischen Anwendung des Trenndüsenverfahrens zur Entmischung der Uran-Isotope muß der elementare Trenneffekt durch Hintereinanderschalten einer großen Zahl von Trennelementen in einer Trennkaskade vervielfacht werden. Es werden der Aufbau und die Erprobung eines mit einem  $UF_6$ -festen Roots-Gebläse arbeitenden geschlossenen Verfahrenskreislaufes beschrieben, der die Grundeinheit einer im Bau befindlichen zehngliedrigen Versuchskaskade ist.

Das Trenndüsenverfahren nützt die teilweise, räumliche Entmischung verschieden schwerer Komponenten eines Gasgemisches in einem expandierenden Überschallstrahl zur Isotopentrennung aus<sup>(1-8)</sup>. Das Verfahren ist vor allem für die Entmischung der Uran-Isotope von praktischem Interesse<sup>7)</sup>.

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde das mit  $^{235}U$  angereicherte oder an  $^{235}U$  verarmte Uranhexafluorid aus den betreffenden Teilströmen des Verfahrensgases in Tieftemperaturfallen abgeschieden, wonach das zur Erhöhung der Mach-Zahl benutzte leichte Zusatzgas mit gewöhnlichen Vakuumpumpen abgesaugt werden konnte<sup>7,8)</sup>. Bei einer praktischen Anwendung des Verfahrens muß der elementare Trenneffekt durch Hintereinanderschalten einer großen Zahl von Trennelementen in einer Trennkaskade vervielfacht werden. Dabei muß das in den Trennelementen expandierte  $UF_6$ -haltige Verfahrensgas vor Eintritt in die Nachbarelemente durch  $UF_6$ -feste Kompressoren verdichtet werden.

Für eine exakte Beurteilung der wirtschaftlichen Aussichten des Trenndüsenverfahrens ist eine genaue Kenntnis der gasdynamischen Stabilität bzw. des erforderlichen Regelaufwandes einer solchen Trenndüsenkaskade notwendig. Da eine theoretische Behandlung dieses Problems, wegen des Näherungscharakters entsprechender Rechnungen, für die Planung technischer Anlagen nicht ausreicht, wird in unserem Institut eine zehngliedrige Pilot-Anlage errichtet. In der vorliegenden Arbeit werden der Aufbau und die Erprobung der Grundeinheit dieser Pilot-Anlage beschrieben.

## Das Trennelement

Abb. 1 zeigt einen Querschnitt durch die verwendete Trenndüse. Ein Gemisch von 5 Mol-%  $UF_6$  und 95 Mol-% Helium wird mit der Molstromstärke  $L$  unter dem Düsenvordruck  $p_0 = 48$  Torr<sup>\*\*)</sup> 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<sup>\*\*\*)</sup>. Die engste Düsenweite beträgt 0,40 mm. In der Düse expandiert das Gasgemisch auf den Druck  $p_M = 16$  Torr<sup>\*\*)</sup>. 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  $\vartheta L$  und eine schwere Fraktion mit der molaren Stromstärke  $(1-\vartheta)L$  aufgespalten. Die angegebenen Maße und Betriebsbedingungen wurden auf Grund früherer Experimente festgelegt. Die Düse hat senkrecht zur Zeichenebene eine Länge von 100 mm. Sie ist damit 10mal so lang wie die bei den früheren Versuchen<sup>7,8)</sup> benutzten Düsen.

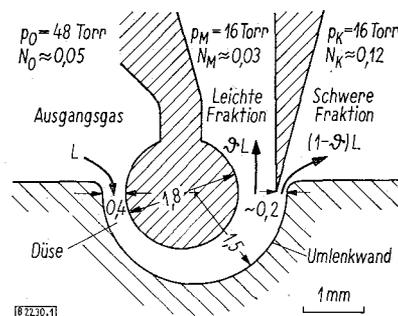


Abb. 1. Querschnitt durch die Trenndüse.  $N_0$ ,  $N_M$  und  $N_K$  = Molbruchteile des  $UF_6$  in dem als Arbeitsgas benutzten He/ $UF_6$ -Gemisch.  $L$  Molstromstärke.

Die Montage der Einzelteile geht aus Abb. 2 hervor. Wegen des vorgesehenen Versuchsbetriebes wurde eine Bauweise gewählt, die eine weitgehende Verstell- und Austauschmöglichkeit aller die Strahlgeometrie beeinflussenden Parameter bietet. Das den Düsenzylinder  $c$  tragende Blech  $b$  und das in den Abschäler auslaufende Blech  $f$  sind auf angefrästen Flächen des Messing-Zylinders  $a$  festgeschraubt. Die Bleche  $b$  und  $f$  wurden aus gehärtetem Werkzeugstahl (90 MnV8) her-

\*) Vgl. hierzu die in Heft 1/1967 (S. 1/7) erschienene Arbeit von E. W. Becker, K. Bier und W. Bier<sup>8)</sup>.

\*\*\*) Auslegungs-Nennwert.

\*\*\*) Diese Form der gekrümmten Laval-Düse besitzt im Vergleich zu den in der bereits erschienenen Arbeit<sup>8)</sup> ausführlich untersuchten Düsen den Vorteil eines einfacheren Herstellungsverfahrens für größere System-Längen.

gestellt und ebenso wie der Messing-Zylinder *a* nach der Fertigbearbeitung vernickelt. Die Stellungen des Düsenzylinders *c* und des Abschälers *g* gegenüber dem Umlenkkörper *d* können durch Verschieben der Bleche auf ihren Auflageflächen und durch Verspannen des geschlitzten Messing-Zylinders *a* mit Hilfe der Schrauben *e* verändert werden<sup>9)</sup>.

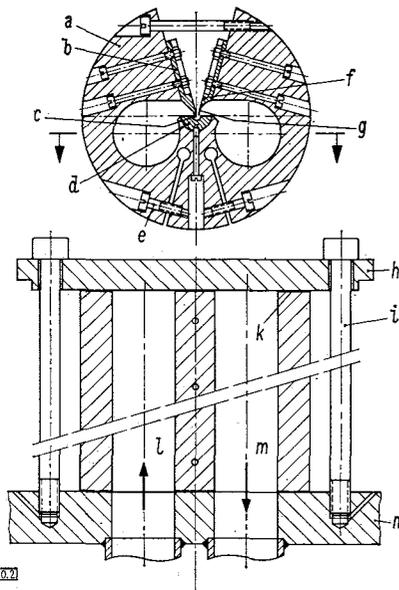


Abb. 2. Aufbau des gesamten Trennelementes. Die aus dem Umlenkkörper *d*, dem Zylinder *c* und dem Abschäler *g* bestehende Trenndüse ist in Abb. 1 vergrößert dargestellt. *a* Trennelementkörper, *b* Halterung für Düsenzylinder *c*; *d* Umlenkkörper, *e* Stellschrauben, *f* Halterung für den Abschäler *g*; *h* Blindflansch, *i* Befestigungsschrauben, *k* Teflon®-Folie, *l* Zuführung des Ausgangsgases, *m* Abführung der schweren Fraktion, *n* Deckel der Trennkammer.

Das Trennelement wird mit einem Blindflansch *h* und den Schrauben *i* auf den Deckelflansch *n* einer nicht gezeigten, das Trennelement umgebenden zylindrischen Kammer aufgespannt. Zur Abdichtung zwischen den plangeschliffenen Auflageflächen dienen 0,1 mm dicke Teflon®-Folien *k*. Die leichte Fraktion tritt zwischen Düsenblech *b* und Abschälblech *f* in die das Element umgebende Kammer und wird aus dieser abgesaugt.

### Der Verdichter

Bei einer technischen Realisierung des Trenndüsenverfahrens dürften nur Strömungsmaschinen als Verdichter in Frage kommen. Bei der Auswahl des Verdichtertyps für die Pilot-Anlage war jedoch zu berücksichtigen, daß die Anlage zur Verminderung der Kosten mit möglichst kleinem Gasdurchsatz arbeiten sollte. Ein vernünftiger Kompromiß ergab sich durch die Verwendung von Roots-Gebläsen. Sie lassen sich ohne weiteres für den gewünschten, relativ kleinen Gasdurchsatz von etwa 100 m<sup>3</sup>/h bauen und haben eine ähnliche

Abhängigkeit der Kompressionsleistung von der Zusammensetzung und den Zustandsgrößen des Fördergases wie Radial- bzw. Axialverdichter.

Der hier benutzte Roots-Verdichter besitzt hochvakuumdichte Wellendurchführungen in der Form von Sperrkammern, die durch doppelseitige Gleitringdichtungen abgeschlossen sind und die von einem UF<sub>6</sub>-festen Sperrmittel durchströmt werden. Er ist mit einem eingebauten Gaskühler ausgerüstet. Eine zusätzliche Innenkühlung der Drehkolben ist möglich. Der Verdichter wurde in Zusammenarbeit mit der Firma E. Leybolds Nachfolger, Köln-Bayental, aus der serienmäßigen Roots-Pumpe „Ruvac E 126“ entwickelt<sup>10)</sup>. Sämtliche speziellen Bauelemente wurden in unserem Institut unter Verfahrensbedingungen erprobt und schrittweise bis zur endgültigen Form gebracht.

Das geschweißte Verdichtergehäuse mit Saug- und Druckstutzen ist an den beiden Stirnseiten durch zwei Stirnplatten abgeschlossen, in denen die beiden Drehkolben in vier einzelnen Lagerdeckeln gelagert sind. Hinter diesen Lagerdeckeln sind in vier Buchsen vier doppelwirkende Gleitringdichtungen in die Stirnplatten eingesetzt. Sie bilden vier Sperrkammern, die von einem unter Überdruck stehenden Sperrmittel (KEL-F®-Öl) durchflossen werden. In den rechteckigen Druckstutzen ist ein wassergekühlter Schlangrohrkühler eingebaut. Bei Bedarf kann als zusätzliche Kühlmaßnahme der Sperrmittelstrom von einer Stirnseite zur anderen durch die Wellenbohrungen und die Kühlmittelkammern der Drehkolben geführt werden. Zum Antrieb wird ein angeflanschter Drehstrommotor mit 2900 U/min benutzt. Das geometrische Schöpfvolumen des Verdichters beträgt 2,2 l pro Umdrehung. Bei der Nenn-drehzahl ergibt sich eine nominelle Ansaugleistung von 380 m<sup>3</sup>/h.

Die Drehkolben bestehen aus dem Werkstoff Nr. 4571. Die Stirnplatten, das geschweißte Verdichtergehäuse und alle sonstigen mit dem Verfahrensgas in Berührung kommenden Teile wurden aus dem Werkstoff Nr. 4541 hergestellt. Zur Abdichtung zwischen mediumberührten Metallteilen dienen Rundschnurringe aus dem Fluorelastomer Viton®, die in Nuten eingelegt sind.

Die Gleitringdichtungen besitzen auf den Laufflächen eine Stellit-Auflage. Bei Dauererprobungen des Verdichters ergaben sich für den Sperrmittelübertritt in den Verfahrensraum Werte zwischen 0,5 und 1,8 cm<sup>3</sup> pro Tag und Verdichter. Die eingedrungenen Leckmengen werden in einen wassergekühlten Lecköl-sammler abgeleitet. Eine Dampfsperre erschwert den Übertritt von Sperrmitteldampf in den Schöpfraum des Verdichters.

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Verfahrensverdichters wurden Förderleistung *L* [gMol/h] und Kompressionsverhältnis  $k = p_2/p_1$  in Abhängigkeit vom Gegendruck *p*<sub>2</sub> mit einem UF<sub>6</sub>/Helium-Gemisch mit 5 Mol-% UF<sub>6</sub> gemessen. Bei diesen Messungen wurde stets die stationäre Temperaturverteilung des Verdichters abgewartet. Aus den in Abb. 3 dargestellten Kennlinien geht hervor, daß der Verdichter am vorgesehenen Arbeitspunkt, d. h. bei einem Durchsatz von

<sup>9)</sup> Für die Praxis wird man Trennelemente mit festgelegter Geometrie benutzen, bei denen die entscheidenden Dimensionen in genügend kleinen Abständen fixiert sind. Für die sorgfältige Anfertigung des Trennsystems danken wir Herrn Feinmechanikermeister *H. Ratzel*.

<sup>10)</sup> Wir danken Herrn Dipl.-Ing. *W. Röllinger* und Herrn Dipl.-Ing. *H. Bode* von der Fa. E. Leybold's Nachfolger, Köln-Bayental, für die gute Zusammenarbeit.

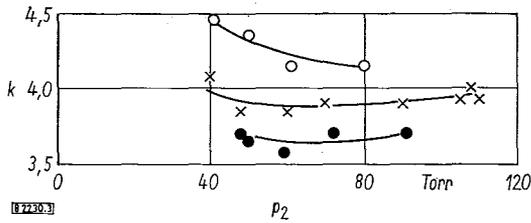


Abb. 3. Das Kompressionsverhältnis  $k = p_2/p_1$  in Abhängigkeit vom Gegendruck  $p_2$  bei verschiedenen Moldurchsätzen  $L$ . Gaskühler mit 2 l/min Kühlwasserdurchfluß.  $\circ \circ L = 28$  gMol/h;  $\times \times L = 43$  gMol/h;  $\bullet \bullet L = 60$  gMol/h; Mischungsverhältnis: 5 Mol-%  $UF_6$  : 95 Mol-% He.

60 gMol/h und 48 Torr Gegendruck, das geforderte Kompressionsverhältnis 3 um mehr als 20% überschreitet.

Förderleistungsmessungen an einem Vorserien-Verdichter ohne Gaskühler mit verschiedenen Fördermedien ergaben einen linearen Zusammenhang zwischen der Wurzel aus dem mittleren Molekulargewicht des gefördertem Gases und dem Kompressionsverhältnis, das der Verdichter bei vorgegebenem Moldurchsatz  $L$  und vorgegebenem Gegendruck  $p_2$  erreicht. Die Meßergebnisse für  $L = 60$  gMol/h und  $p_2 = 50$  Torr sind in Abb. 4 dargestellt.

### Der Verfahrenskreislauf

Der Aufbau des Verfahrenskreislaufes geht aus der Schnittzeichnung Abb. 5 hervor. Die schwere und die leichte Fraktion werden über getrennte Leitungen aus der Trennkammer herausgeführt und über die Ventile

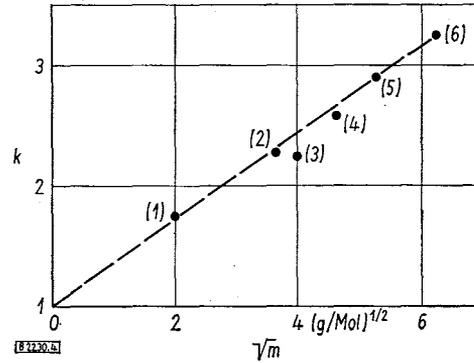


Abb. 4. Kompressionsverhältnis  $k$  in Abhängigkeit von der Wurzel aus dem Molekulargewicht  $m$  des Fördermediums. Roots-Verdichter der Vorserie ohne Gaskühler. Gegendruck  $p_2 = 50$  Torr, Moldurchsatz  $L = 60$  g Mol/h. Daten für die Meßpunkte: (1) He,  $m = 4$ ; (2) 2,7 Mol-%  $UF_6/97,3$  Mol-% He,  $m = 13,5$ ; (3)  $CH_4$ ,  $m = 16$ ; (4) 5 Mol-%  $UF_6/95$  Mol-% He,  $m = 21,4$ ; (5)  $N_2$ ,  $m = 28$ ; (6) 10 Mol-%  $UF_6/90$  Mol-% He,  $m = 38,8$ .

$b$  und  $c$  gemeinsam vom Roots-Verdichter  $h$  angesaugt. Das komprimierte Gas wird über das Ventil  $e$  in das Trennelement  $i$  zurückgeleitet. Parallel zu den Leitungen für das in das Trennelement eintretende Gas und für die schwere bzw. leichte Fraktion sind Probenentnahme-Behälter  $k$  angeschlossen, deren Volumen so bemessen ist, daß sie unter Verfahrensbedingungen im Gasgemisch eine für die massenspektrometrische Isotopenanalyse ausreichende  $UF_6$ -Menge von etwa 0,1 g enthalten. Sie werden während des Versuchs mit Verfahrensgas durchspült und vor der Probenentnahme vom Kreislauf isoliert. Der Gasinhalt wird durch nicht

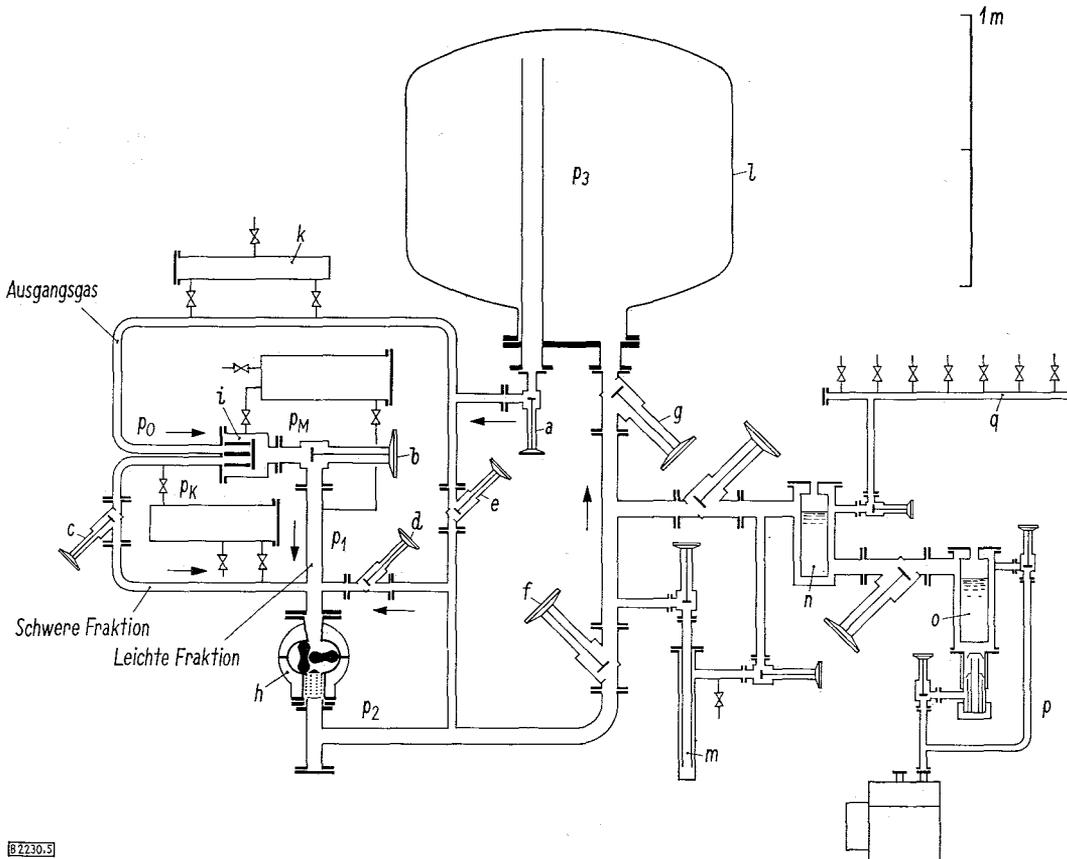


Abb. 5. Schnittbild des Verfahrenskreislaufes.  $a$  bis  $g$  Ventile,  $h$  Roots-Verdichter,  $i$  Trennsystem,  $k$  Probeentnahme-Behälter,  $l$  Vorratsbehälter,  $m$   $UF_6$ -Kühlfalle,  $n$  und  $o$  Kühlfällen mit flüssigem Stickstoff,  $p$  Vakuum-Pumpstand,  $q$  Vakuum-Verteiler.

gezeigte Kühlfallen abgepumpt, in denen das  $UF_6$  ausgefroren wird und nach der Wägung zur Isotopenanalyse gelangt. Aus dem  $UF_6$ -Gewicht, dem Druck und dem Volumen der Probenentnahme-Behälter wird die  $UF_6$ -Konzentration im  $UF_6$ /Helium-Gemisch bestimmt.

Um einen längeren Versuchsbetrieb mit häufiger Probenentnahme zu ermöglichen, kann zur Vergrößerung des 20 l betragenden Kreislaufvolumens ein 1000-l Vorratsbehälter *l* eingeschaltet werden. Der Behälter ermöglicht auch eine Veränderung der Betriebsdrücke ohne Entnahme bzw. Zugabe von Verfahrensgas. Bei geschlossenem Ventil *e* fördert der Verdichter durch die geöffneten Ventile *f* und *g* gegen den Behälterdruck  $p_3$ . Der Düsenvordruck  $p_0$  kann durch Drosselung des Ventils *a* auf Werte zwischen dem Behälterdruck  $p_3$  und dem Ansaugdruck  $p_1$  des Verdichters eingeregelt werden. Die Drücke der leichten und schweren Fraktion,  $p_M$  bzw.  $p_K$ , lassen sich mit den Ventilen *b* und *c* auf Werte zwischen  $p_0$  und  $p_1$  einstellen. Der Ansaugdruck  $p_1$  wird mit dem Bypass-Ventil *d* geregelt. Der Gegendruck  $p_2$  des Verdichters ist normalerweise mit dem Behälterdruck  $p_3$  identisch und ändert sich wegen des großen Volumenverhältnisses zwischen Vorratsbehälter und Kreislauf praktisch nicht, wenn die Betriebsdrücke am Trennelement variiert werden. Die Drücke werden mit direkt anzeigenden Kapselfeder- bzw. Membran-Manometern sowie mit elektrischen Druckaufnehmern gemessen<sup>oo)</sup>. Als Eichnormal dient eine selbstabgleichende elektromagnetische Druckwaage mit linearer Kennlinie im Bereich von 0 bis 760 Torr<sup>\*)</sup>. Für Messungen im Bereich unter 1 Torr ist ein elektrostatisches Membran-Mikromanometer mit einer maximalen Empfindlichkeit von  $10^{-3}$  Torr/Skt angeschlossen. Alle diese Geräte sind für die direkte Druckmessung in  $UF_6$  oder anderen fluorierenden Gasen bei Zimmertemperatur geeignet. Daneben dienen zur Kontrolle von Evakuierungsvorgängen und zur Messung des Endvakuums in den verschiedenen Anlageteilen Wärmeleitmanometer und Ionisationsmanometer, die bei Betrieb mit  $UF_6$ -Füllung im evakuierten Zustand vom Verfahrensgasraum abgetrennt werden.

Die Anlage kann durch die mit flüssigem Stickstoff gekühlte  $UF_6$ -Kühlfalle *m* entleert werden. Das Helium wird dabei von einer Drehschieberpumpe abgesaugt. Zur Erzeugung von Hochvakuum ist eine Quecksilber-Diffusionspumpe vorgesehen. Sie wird durch zwei mit flüssigem Stickstoff gekühlte Fallen *n*, *o* vor aggressiven Gasresten geschützt.

Als Konstruktionsmaterial wurden die austenitischen Stähle Werkstoff-Nr. 4541, 4550 und 4571 verwendet. Alle Ventile haben eine Faltenbalg- bzw. Membranabdichtung der Ventilspindel. Als Dichtungsmaterial dient Viton<sup>®</sup> und in Sonderfällen Teflon<sup>®</sup>. Für den gesamten Verfahrenskreislauf mit Meßgeräten und betriebsbereitem Verdichter, jedoch ohne den 1000-l-Behälter, wurde eine Gesamtundichtigkeit von maximal  $5 \cdot 10^{-6}$  Torr l/s zugelassen. Vor der Füllung mit  $UF_6$

<sup>oo)</sup> Hersteller: Appleby & Ireland, Basingstoke (England), Typ: 101 und 533. Hersteller: Heraeus GmbH, Hanau, Typ: VM-M. Hersteller CEC, Pasadena (USA), Typ: 4-353-0001. Hersteller: Ateliers de Construction de Bagneux, Bagneux/Seine (Frankreich), Typ 437 Gd 25 121 und 25 221.

<sup>\*)</sup> Hersteller: CEC, Pasadena (USA), Typ: 4-336-0102.

wird die fertig montierte Versuchsapparatur unter Hochvakuum ausgeheizt und anschließend mit einem Gemisch von Chlortrifluorid ( $ClF_3$ ) und Stickstoff passiviert.

### Die Entmischung der Uran-Isotope

Bei der Hintereinanderschaltung von Trennelementen in einer Trennkaskade sollen die sich vermischenden Ströme gleiche Isotopen-Zusammensetzung haben, da die Kaskade unter dieser Bedingung den maximal möglichen Trennwert erzeugt. Bei dem mit leichtem Zusatzgas arbeitenden Trenndüsenverfahren führt die Einhaltung dieser Bedingung automatisch dazu, daß auch die Forderung nach verschwindendem  $UF_6$ -Transport längs der Kaskade eingehalten wird<sup>\*\*)</sup>. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, das  $UF_6$ -Abschälverhältnis der Stufen auf einen Wert einzustellen, der durch die Art der Zusammenschaltung bestimmt ist. In der einfachsten Schaltungsart einer Trenndüsenkaskade, bei der jeder Verdichter die leichte Fraktion seiner Stufe und die schwere Fraktion der übernächsten Stufe gleichzeitig ansaugt, ist beispielsweise die Bedingung  $\vartheta_{UF_6} = 0,5$  einzuhalten<sup>\*\*\*)</sup>.

Der gewünschte Wert von  $\vartheta_{UF_6}$  läßt sich auf Grund von Vorversuchen durch geeignete Wahl des Abschälerabstandes mit einer gewissen Fehlergrenze einstellen. Da eine während des Betriebes zu betätigende Verstellmöglichkeit des Abschälers zu aufwendig wäre, wird man die Feinregulierung von  $\vartheta_{UF_6}$  unter Ausnutzung seiner Abhängigkeit vom Expansionsverhältnis durchführen.

Aus diesem Grunde wurden mehrere Reihen von Isotopen-Anreicherungsversuchen ausgeführt, bei denen besonders das Verhalten des Trenneffektes und des Abschälverhältnisses bei Variation des Expansionsverhältnisses interessierte. Gleichzeitig dienten diese Versuche der Dauererprobung des Trenndüsen-systems.

Die Anreicherungsversuche wurden mit einem Gemisch von 5 Mol-%  $UF_6$  und 95 Mol-% Helium bei einem konstanten Düsenvordruck  $p_0 = 48$  Torr (Düsendurchsatz  $L = 60$  gMol Gemisch/h) unter Variation des Expansionsverhältnisses  $p_0/p_M$  durchgeführt. Die Drücke in der leichten und in der schweren Fraktion waren gleich groß ( $p_M = p_K$ ). Der Verdichter arbeitete gegen den Druck  $p_3$  des Vorratsbehälters, der etwas oberhalb 48 Torr lag, so daß in der Anlage eine genügend große Überschuß-Gasmenge für die Probenentnahme vorhanden war. Das Expansionsverhältnis wurde mit dem Bypass-Ventil *d*, der Düsenvordruck  $p_0$  wurde mit dem Ventil *a* geregelt (s. Abb. 5).

In Abb. 6 sind die  $UF_6$ -Molenbrüche  $N_o$ ,  $N_M$ ,  $N_K$  im Ausgangsgas, in der leichten und schweren Fraktion sowie der mit den entsprechenden Molenbrüchen  $n_M$

<sup>\*\*)</sup> Von dem  $UF_6$ -Strom, der zur Erfüllung der Produktionsaufgabe durch die Kaskade hindurchläuft kann hier abgesehen werden.

<sup>\*\*\*)</sup> Für die zehngliedrige Versuchsanlage wurde  $\vartheta_{UF_6} = 0,5$  wegen der damit verbundenen einfachen Schaltung vorgesehen. Auf Grund der Voruntersuchungen erscheint es nicht ausgeschlossen, daß bei einer großtechnischen Anlage  $\vartheta_{UF_6} = 0,33$  günstiger ist<sup>§)</sup>.

und  $n_K$  des  $^{235}\text{U}$  gebildete elementare Trenneffekt\*)

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

in Abhängigkeit vom Expansionsverhältnis  $p_o/p_M$  aufgetragen. Die Abschälverhältnisse  $\vartheta$  und  $\vartheta_{\text{UF}_6}$  wurden unter Benutzung der folgenden Beziehungen errechnet:

$$\text{Gesamtabschälverhältnis: } \vartheta = \frac{N_o - N_K}{N_M - N_K} \quad (2),$$

$$\text{UF}_6\text{-Abschälverhältnis: } \vartheta_{\text{UF}_6} = \frac{N_M}{N_o} \cdot \vartheta \quad (3).$$

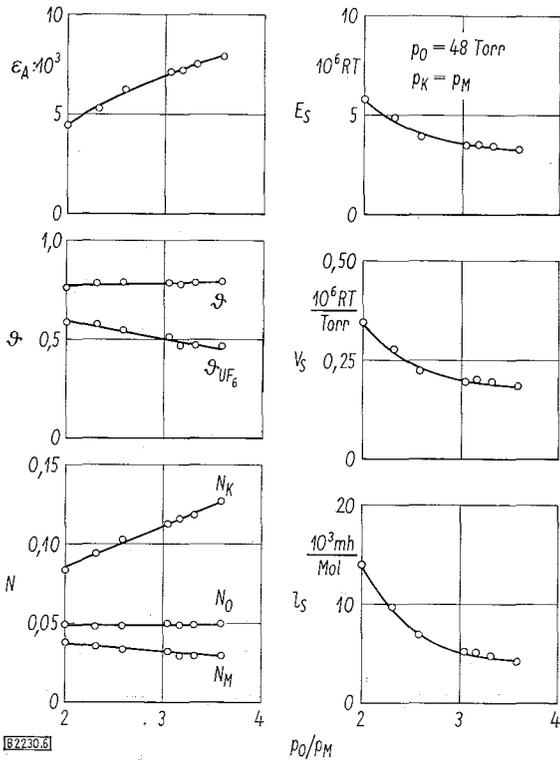


Abb. 6. Der Einfluß des Expansionsverhältnisses  $p_o/p_M$  auf den elementaren Trenneffekt  $\varepsilon_A$ , das Gesamt-Abschälverhältnis  $\vartheta$ , das  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnis  $\vartheta_{\text{UF}_6}$ , die  $\text{UF}_6$ -Molenbrüche im Ausgangsgas und in der leichten bzw. schweren Fraktion  $N_o$ ,  $N_M$  und  $N_K$ , die spezifische Kompressionsarbeit  $E_s$ , das spezifische Ansaugvolumen  $V_s$  und die spezifische Schlitzlänge  $l_s$  für ein Gemisch aus 5 Mol-%  $\text{UF}_6$  und 95 Mol-%  $\text{He}$ .

Abb. 6 zeigt weiterhin den Verlauf der spezifischen Kompressionsarbeit  $E_s$ , des spezifischen Ansaugvolumens  $V_s$  und der spezifischen Schlitzlänge  $l_s$ . Diese „spezifischen Aufwandsgrößen“ sind ein Maß für den Energieverbrauch des Verfahrens bzw. für die Investierungskosten der Kompressoren und Trennelemente.

\*) Die in Gl. (1) vorkommenden Isotopen-Mischungsverhältnisse  $n_M/(1 - n_M)$  und  $n_K/(1 - n_K)$  wurden massenspektrometrisch bestimmt. Wegen der Meßmethode vgl. 3). Für die Durchführung der Messungen danken wir den Herren W. Mannherz u. G. Schüler.

Sie wurden mit den Gln. (5) bis (8) der bereits veröffentlichten Arbeit<sup>8)</sup> aus den Meßwerten berechnet.

Die in der vorliegenden Untersuchung mit dem um den Faktor 10 verlängerten Trenndüsen-system im geschlossenen Verfahrenskreislauf erzielten Trenneffekte und Aufwandsgrößen stimmen innerhalb der Fehlergrenzen mit den in den Voruntersuchungen<sup>8)</sup> unter entsprechenden Bedingungen erhaltenen Werten überein.

Alle in Abb. 6 dargestellten Versuchsergebnisse wurden mit einer Einstellung der Abschälerweite  $f = 0,20$  mm erhalten. Die Meßkurve  $\vartheta_{\text{UF}_6}$  läuft innerhalb der Fehlergrenze durch den vorgesehenen Arbeitspunkt ( $\vartheta_{\text{UF}_6} = 0,5$  bei  $p_o/p_M = 3$ ). Aus anderen Versuchsreihen ergab sich, daß beim gleichen Expansionsverhältnis eine Verkleinerung der Abschälerweite  $f$  um 0,01 mm eine Erhöhung des  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnisses von 0,50 auf 0,54 bewirkt. Die Kurve  $\vartheta_{\text{UF}_6}$  in Abb. 6 zeigt, daß eine derartige Abweichung vom Sollwert durch eine Erhöhung des Expansionsverhältnisses um etwa 10% ausgeglichen werden kann.

Eine der Meßreihen wurde nach 4 Monaten wiederholt. In der Zwischenzeit wurden die Saugleistungsmessungen durchgeführt und der Roots-Verdichter im Dauerversuch erprobt. Während der gesamten Zeit war die Anlage mit dem  $\text{He}/\text{UF}_6$ -Gemisch gefüllt. Für etwa 1100 h wurde sie unter Verfahrensbedingungen in Betrieb gehalten. Es zeigte sich, daß die Ergebnisse aus beiden Versuchsabschnitten praktisch übereinstimmen. Das bedeutet, daß sich die Eigenschaften des Trennelementes durch den mehrmonatigen Versuchsbetrieb nicht meßbar verändert haben.

Wir danken Herrn Dipl.-Ing. G. Frey für seine Mitarbeit an der Entwicklung der Wellenabdichtungen des Roots-Verdichters, Herrn J. Dröge für seine Hilfe bei den Versuchen. Herrn Prof. Dr. E. W. Becker gilt unser Dank für die dieser Arbeit zuteil gewordene Förderung.

Eingegangen am 9. Dezember 1966 [B 2230]

## Literatur

- 1) E. W. Becker, K. Bier u. H. Burghoff, Z. Naturforschg. 10a, 565 [1955].
- 2) E. W. Becker, W. Beyrich, K. Bier, H. Burghoff u. F. Zigan, Z. Naturforschg. 12a, 609 [1957].
- 3) E. W. Becker u. R. Schütte, Z. Naturforschg. 15a, 336 [1960].
- 4) E. W. Becker, H. Burghoff u. J. Gspann, Z. Naturforschg. 16a, 955 [1961].
- 5) F. Zigan, Z. Naturforschg. 17a, 772 [1962].
- 6) E. W. Becker, K. Bier u. W. Bier, Z. Naturforschg. 17a, 778 [1962].
- 7) E. W. Becker, K. Bier, W. Bier u. R. Schütte, Z. Naturforschg. 18a, 246 [1963].
- 8) E. W. Becker, K. Bier u. W. Bier, diese Zeitschr. 39, 1/7 [1967].