

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

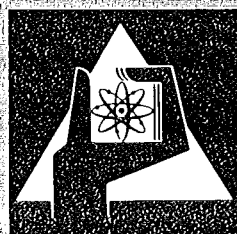
März 1975

KFK 2138

Institut für Kernverfahrenstechnik

**Experimentelle Untersuchung der Uranisotopen-Trennung  
in einem Trenndüsen-System mit gegenseitiger Umlenkung  
von zwei frontal aufeinander gerichteten Gasstrahlen**

W. Ehrfeld, U. Knapp



**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 2138

Institut für Kernverfahrenstechnik

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER URANISOTOPENTRENNUNG  
IN EINEM TRENNDÜSENSYSTEM MIT GEGENSEITIGER UMLENKUNG  
VON ZWEI FRONTAL AUF EINANDER GERICHTETEN GASSTRAHLEN

von

W. Ehrfeld  
U. Knapp<sup>+)</sup>

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe

+ ) Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität  
Karlsruhe (T.H.) genehmigte Dissertation.



## Zusammenfassung

Beim Trenndüsenverfahren zur Anreicherung von Uran-235 beruht die Entmischung der Uranisotope auf der Massenabhängigkeit der Zentrifugalkraft in einer schnellen gekrümmten Strömung aus gasförmigem Uranhexafluorid. Wird die Stromlinienkrümmung durch Umlenken eines Gasstrahles an einer feststehenden Wand erzeugt, so bildet sich in den wandnahen Strömungsbereichen ein steiles Geschwindigkeitsgefälle aus, das zu relativ hohen Reibungsverlusten führt und die für die Isotopentrennung wesentlichen Zentrifugalkräfte beeinträchtigt. Eine grundsätzliche Möglichkeit zur Erzeugung gekrümmter Stromlinien unter Vermeidung eines steilen Geschwindigkeitsgefälles bietet die gegenseitige Umlenkung von Gasstrahlen. In dieser Arbeit wird über die Ergebnisse von Trennversuchen an einem Trenndüsenystem berichtet, bei dem zwei bandförmige  $\text{UF}_6$ -haltige Strahlen frontal gegeneinander gerichtet sind.

Bei der Verwendung von  $\text{H}_2/\text{UF}_6$ -Gemischen als Verfahrensgas zeigt sich, daß bei gegenseitiger Strahlumlenkung im Bereich niedriger Expansionsverhältnisse höhere Elementareffekte der Isotopentrennung erzielt werden als bei der Strahlumlenkung an einer festen Wand. Bei höheren Expansionsverhältnissen werden jedoch die günstigen Trenneigenschaften des Systems mit fester Umlenkung nicht erreicht, was auf eine zu geringe Stromlinienkrümmung im Strömungsbereich vor dem Abschäler zurückgeführt werden kann.

Aus einem Wirtschaftlichkeitsvergleich geht hervor, daß beim gegenwärtigen Entwicklungsstand das Trennelement mit fester Umlenkwand dem mit gegenseitiger Strahlumlenkung noch deutlich überlegen ist. Bemerkenswert sind jedoch die günstigen Werte für den spezifischen Energieverbrauch, die bei der Verwendung von reinem  $\text{UF}_6$  als Verfahrensgas im Fall der gegenseitigen Strahlumlenkung erzielt werden.

Im Anhang wird über ergänzende Untersuchungen der Strömungskonfiguration im Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung berichtet. Dabei wurde festgestellt, daß sich bei  $\text{H}_2/\text{UF}_6$ -Gemischen ein Strömungszustand ausbilden kann, bei dem die gegeneinander gerichteten Gasstrahlen unter flachem Winkel aufeinander abgleiten. Dabei tritt keine nennenswerte Isotopen- und Gemischtrennung mehr auf.

## Experimental Investigation of Uranium Isotope Separation in a Separation Nozzle System with Opposed Gas Jets

---

### Summary

In the separation nozzle method for uranium-235 enrichment isotope separation is brought about by the mass dependence of the centrifugal force in a fast curved flow of gaseous uranium hexafluoride. If the stream line curvature is generated by deflection of a gas jet at a fixed wall, a steep velocity gradient exists within the flow regions near the wall. This results in relatively high friction losses and adversely affects the centrifugal force determining the separation. The generation of curved flow lines and the simultaneous avoidance of a steep velocity gradient are principally possible by mutual deflection of gas jets. This report describes separation experiments performed in a separation system in which two band-shaped jets are opposed to each other.

When  $H_2/UF_6$ -mixtures are used as a process gas, it appears that higher elementary effects of isotope separation are achieved with mutual jet deflection within the range of low expansion ratios than with jet deflection at a fixed wall. However, at higher expansion ratio the favourable separation properties of the system equipped with a fixed deflection wall are not attained. This can be explained by a decrease of the stream line curvature within the flow region in front of the skimmer.

A comparison of the economics makes evident that at the present state of development the separation element with a fixed deflection wall is still clearly superior to the opposed jet separation nozzle. However, an interesting result is the relatively low specific energy consumption, which is attained in the case of mutual jet deflection when pure  $UF_6$  is used as a process gas.

The appendix to this report deals with supplementary investigations of the flow configurations existing in the separation nozzle with mutual jet deflection. Using  $H_2/UF_6$ -mixtures it was found that a flow field can exist in which the opposed gas jets slide off at each other forming a flat angle. In this case, only negligible separation occurs between the isotopes and the mixture components, respectively.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung .....	1
2. Apparatur und Versuchsdurchführung	
2.1 Funktionsprinzip der Trennapparatur .....	5
2.2 Das Trenndüsensystem .....	7
2.3 Instrumentierung und Meßwertverarbeitung	
2.3.1 Versuchsbetrieb mit H <sub>2</sub> /UF <sub>6</sub> -Gemischen .....	9
2.3.2 Versuchsbetrieb mit reinem UF <sub>6</sub> .....	12
3. Trennversuche mit H <sub>2</sub> /UF <sub>6</sub> -Gemischen als Verfahrensgas	
3.1 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Isotopen- und Gemischtrennung .....	15
3.2 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die spezifischen Aufwandsgrößen .....	20
4. Trennversuche mit reinem UF <sub>6</sub> als Verfahrensgas	
4.1 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Isotopentrennung .....	24
4.2 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die spezifischen Aufwandsgrößen .....	27
5. Vergleich von Trenndüsensystemen mit Strahlumlenkung an einer festen Wand und gegenseitiger Strahlumlenkung	
5.1 Isotopen- und Gemischtrennung .....	29
5.2 Spezifische Aufwandsgrößen .....	31
6. Diskussion der Ergebnisse .....	34
7. Anhang: Änderung der Strömungskonfiguration im Trenn- düsensystem mit gegenseitiger Strahlumlenkung bei hohen Einlaßdrücken und Expansionsver- hältnissen .....	37
Literaturverzeichnis .....	42

## 1. Einleitung

Für die Anreicherung des leichten Uranisotops U-235 wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe das Trenndüsenverfahren als Alternative zum Gasdiffusions- und zum Zentrifugenverfahren entwickelt/1/,/2/. Beim Trenndüsenverfahren beruht die Entmischung der Uranisotope, wie beim Zentrifugenverfahren, auf der Massenabhängigkeit der Zentrifugalkraft in einer schnellen, gekrümmten Strömung aus gasförmigem Uranhexafluorid. Die bei Versuchen im Laboratoriumsmaßstab und bei der Erprobung einzelner technischer Trenndüsenstufen erzielten Erfolge haben gezeigt, daß das Trenndüsenverfahren ernsthaft für die großtechnische Uranisotopentrennung in Frage kommt /3/.

Die günstigsten Ergebnisse für die praktische Anwendung des Verfahrens wurden bisher mit der in Abb.1 dargestellten

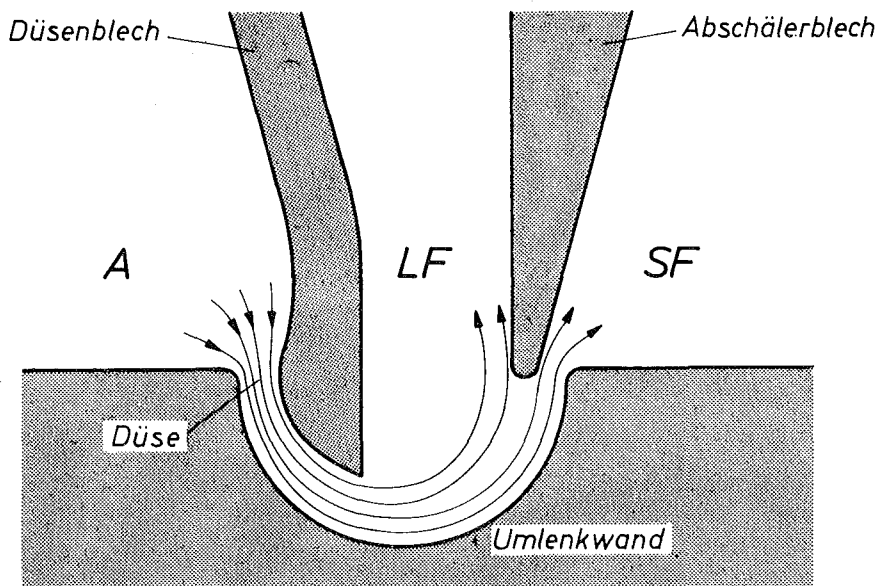


Abb.1: Schnitt durch ein schlitzförmiges Trenndüsenystem mit Umlenkung der Strömung an einer gekrümmten Wand.  
(A=Ausgangsgas, LF=leichte Fraktion, SF=schwere Fraktion)



Trenndüsenanordnung erzielt, bei der ein Strahl aus einem  $H_2/UF_6$ -Gemisch an einer gekrümmten Wand umgelenkt wird. Durch das in hohem Überschuß beigefügte leichte Zusatzgas wird die Strömungsgeschwindigkeit des  $UF_6$  stark erhöht und damit die für die Isotopentrennung wesentliche Zentrifugalkraft vergrößert. Außerdem verzögert das leichte Zusatzgas die gemeinsame Sedimentation der Uranisotope im Zentrifugalfeld der Strömung, was sich ebenfalls günstig auf die Isotopentrennung auswirkt /4/.

Unter den für die Isotopentrennung optimalen Betriebsbedingungen liegt eine Strömung mit einem steilen Geschwindigkeitsgefälle an der feststehenden Umlenkwand vor /5/, /6/, /7/. Die hierbei auftretenden Reibungsverluste bestimmen maßgeblich die Strömungsgeschwindigkeit in der Trenndüse und damit die für die Isotopentrennung wesentlichen Zentrifugalkräfte. Eine Erhöhung der Zentrifugalkräfte bei vorgegebenem Expansionsverhältnis der Strömung und damit eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist zu erwarten, wenn es gelingt, die Strahlumlenkung unter Vermeidung des steilen Geschwindigkeitsgefälles durchzuführen.

Eine grundsätzliche Möglichkeit zur Verminderung der Reibungsverluste bietet die gegenseitige Umlenkung zweier oder mehrerer Gasstrahlen /8/, /9/. In der vorliegenden Arbeit wird die Entmischung der Uranisotope an der in Abb.2 dargestellten Trenndüsenanordnung untersucht, bei der zwei bandförmige,  $UF_6$ -haltige Gasstrahlen frontal gegeneinander gerichtet sind.

Die Versuche wurden an einer gemeinsam mit F.M. Jäger /10/, /11/ gebauten Apparatur durchgeführt, für die im

Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Vorrichtung zur kontinuierlichen Bestimmung des Uranabschälverhältnisses und des Gemischtrennfaktors entwickelt wurde. Die Ergebnisse werden durch Berechnung der bei früheren Untersuchungen eingeführten spezifischen Aufwandsgrößen bezüglich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung analysiert.

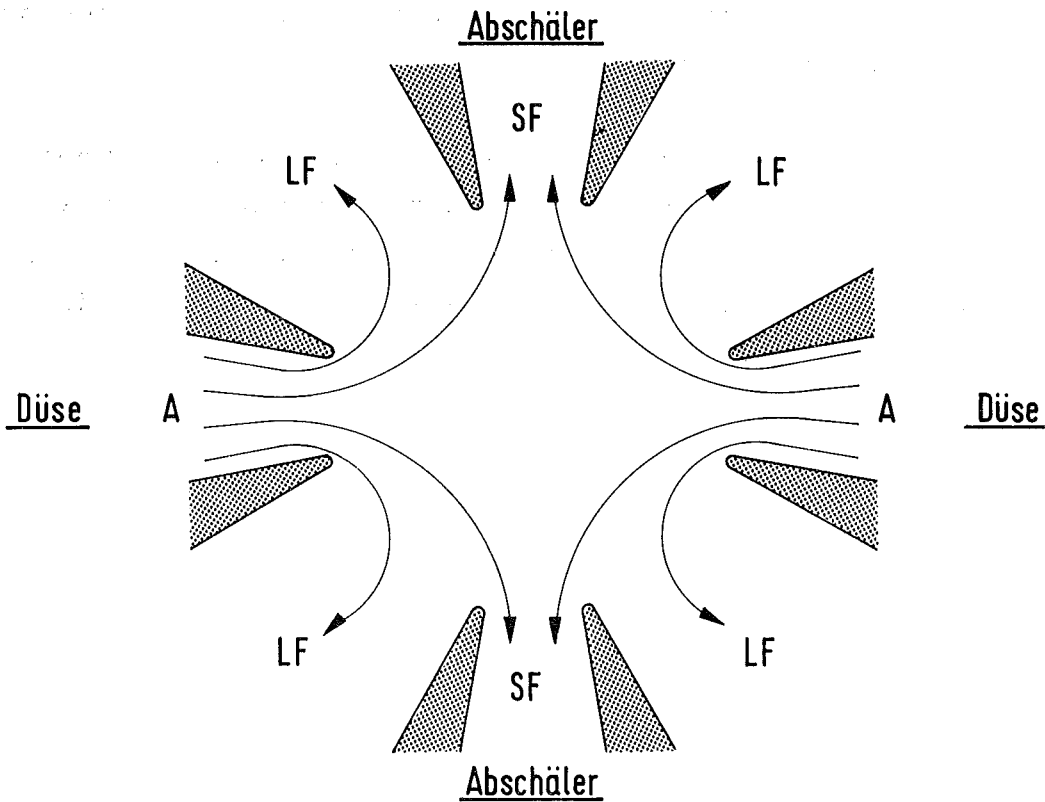


Abb.2: Schnitt durch ein schlitzförmiges Trenndüsenystem mit gegenseitiger Umlenkung von zwei frontal gegenüber gerichteten Gasstrahlen. (A=Ausgangsgas, LF=leichte Fraktion, SF=schwere Fraktion).

Es zeigt sich, daß die in Abb.2 dargestellte Anordnung mit gegenseitiger Strahlumlenkung bei Verwendung von  $H_2/UF_6$ -Gemischen dem Trennelement mit fester Umlenk wand (Abb.1) bei kleinen Expansionsverhältnissen wirtschaft-

lich überlegen ist. Bemerkenswert ist weiter, daß bei der Verwendung von reinem  $UF_6$  als Verfahrensgas die gegenseitige Strahlumlenkung günstigere Resultate aufweist als die Umlenkung durch eine feste Wand. Dagegen ist das Trennelement mit Umlenkwand unter seinen optimalen Betriebsbedingungen dem Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung in allen im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fällen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit überlegen.

Die Ergebnisse werden anhand eines diffusionstheoretischen Modells der Trenndüsenentmischung /4/ diskutiert. Dabei zeigt sich, daß bei der gegenseitigen Strahlumlenkung ein Ersatz des Wasserstoffs durch  $D_2$  oder He vorteilhaft sein könnte.

## 2. Apparatur und Versuchsdurchführung

### 2.1 Funktionsprinzip der Trennapparatur

Das Funktionsprinzip der Trennapparatur /9/, /10/, an der die vorliegenden Untersuchungen durchgeführt wurden, geht aus dem in Abb.3 dargestellten, vereinfachten Fließschema hervor. Das Ausgangsgas strömt aus einem der Vorratsbehälter (1) bzw. (2) über ein Regelventil (3), mit dem der Düsenvordruck  $p_0$  eingestellt wird, in die Trennelementkammer (4). Nach den Regelventilen (5) und (6) werden beide Fraktionen gemeinsam mit dem  $UF_6$ -beständigen Verdichter (7) vorkomprimiert. In einer Tiefkühlfalle (8) wird das  $UF_6$  abgeschieden, und das Zusatzgas mit einer Drehschieberpumpe (9) nach außen gepumpt. Die Schutzkühlfalle (10) verhindert sowohl ein Austreten von  $UF_6$ -Spuren aus der Anlage als auch ein Rückdiffundieren von Öldämpfen in den  $UF_6$ -Kreislauf. Zum Evakuieren der Versuchsapparatur auf Drücke unter  $10^{-3}$  Torr wird eine Turbomolekularpumpe (11) verwendet. Zum Ansetzen von neuem Verfahrensgemisch wird das  $UF_6$  aus dem Abscheider (8) in die Behälter (1) und (2) zurückgeführt. Das Zusatzgas wird über das Ventil (12) in die Behälter eingespeist.

In allen Fraktionen werden neben den Drücken  $p_0$ ,  $p_1$  und  $p_s$  vom Druck und der  $UF_6$ -Konzentration abhängige Ionenströme  $I_0$ ,  $I_1$  und  $I_s$  mit Ionisationsdetektoren gemessen. Aus diesen Meßgrößen werden mit Analog-Rechenstufen unmittelbar die  $UF_6$ -Molenbrüche, das  $UF_6$ -Abschälverhältnis und der Gemischtrennfaktor ermittelt. Der Gasdurchsatz  $L$  durch das Trennelement wird mit einem thermischen Strömungsmesser am Auspuff der Drehschieberpumpe (9) bestimmt. Zur Isotopenanalyse von leichter und schwerer Fraktion werden über die Ventile (13) und (14) Teilströme abgezogen, und das

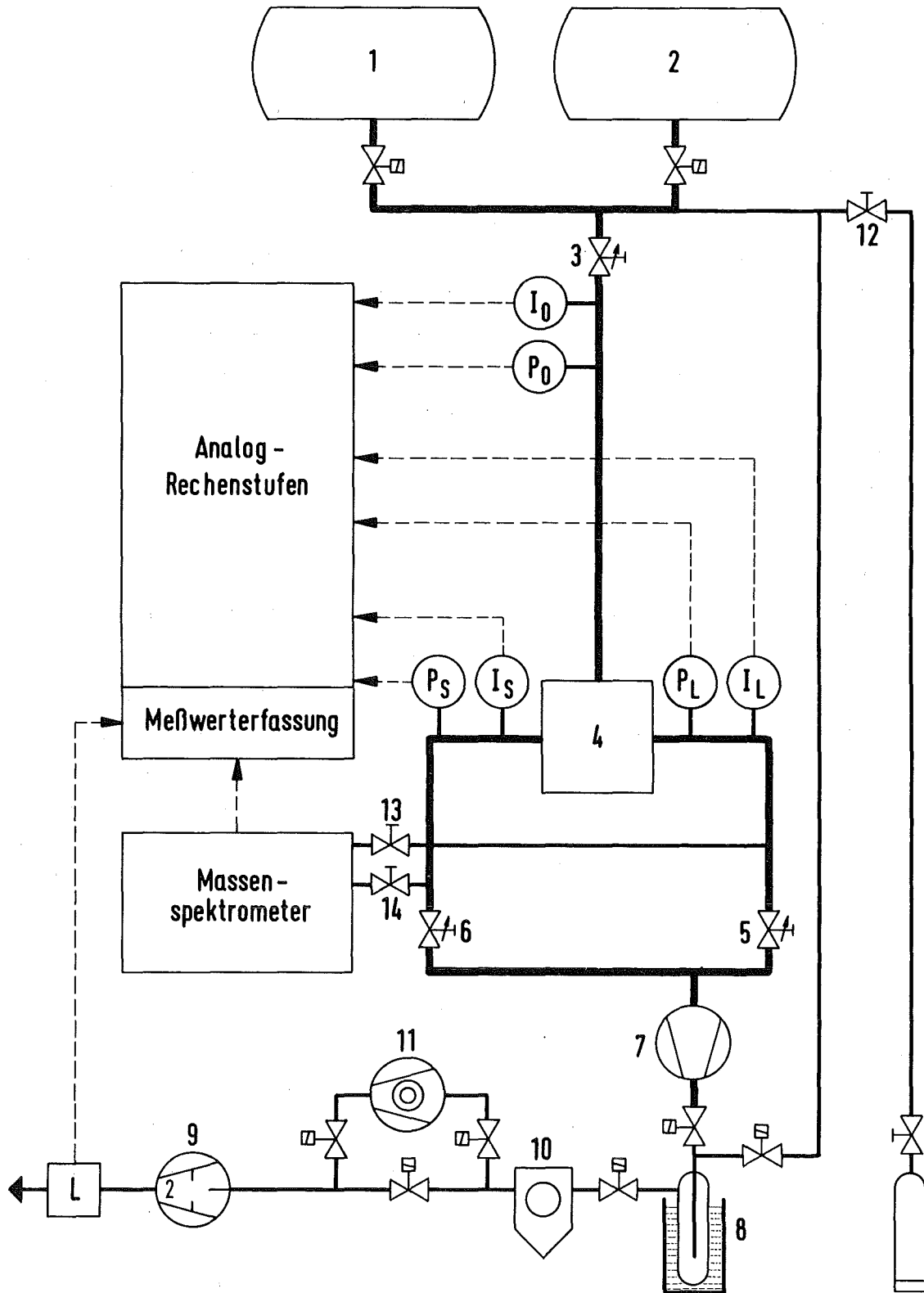


Abb.3: Schema der Trennapparatur

UF<sub>6</sub> wird in Pipetten, die mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, ausgefroren. In der Vorrichtung zur Probenentnahme wird das UF<sub>6</sub> automatisch gereinigt und dem Massenspektrometer zugeführt. Die Versuchsdaten werden mit einer Meßwerterfassungsanlage registriert. Als Datenträger dient ein Lochstreifen, der an einer Großrechenanlage ausgewertet wird.

## 2.2 Das Trenndüsensystem

Abb.4 zeigt den Aufbau des bei den Trennversuchen verwendeten Trenndüsensystems mit gegenseitiger Umlenkung von zwei frontal aufeinander gerichteten Gasstrahlen. Auf einer Grundplatte (1) sind vier Stege (2) aufgeschraubt, an denen die keilförmigen Führungswände (3) für die Gasströme des Ausgangsgases (A) und der leichten Fraktion (LF) bzw. der schweren Fraktion (SF) befestigt sind. Die Führungswände (3) besitzen alle einen Keilwinkel von 15°. Die Öffnungswinkel der durch die Führungswände gebildeten Kanäle betragen jeweils 30°. Das Ausgangsgas wird über zwei Bohrungen in der Grundplatte (1) den beiden einander gegenüberliegenden Düsen zugeführt. Die leichte Fraktion strömt zwischen der Grundplatte (1) und dem Deckflansch (4) radial nach außen ab. Die schwere Fraktion wird über zwei Bohrungen im Deckflansch (4) aus dem Trenndüsensystem abgesaugt. Zur Abdichtung der Führungswände auf der Grundplatte bzw. auf dem Deckflansch werden 0,2 mm starke Teflon-Folien verwendet.

In Tabelle 1 sind die charakteristischen Abmessungen des untersuchten Trennelements zusammengestellt. Die Trennversuche mit H<sub>2</sub>/UF<sub>6</sub>-Gemischen wurden an der Justierung A, die mit reinem UF<sub>6</sub> an der Justierung B durchgeführt. Mit

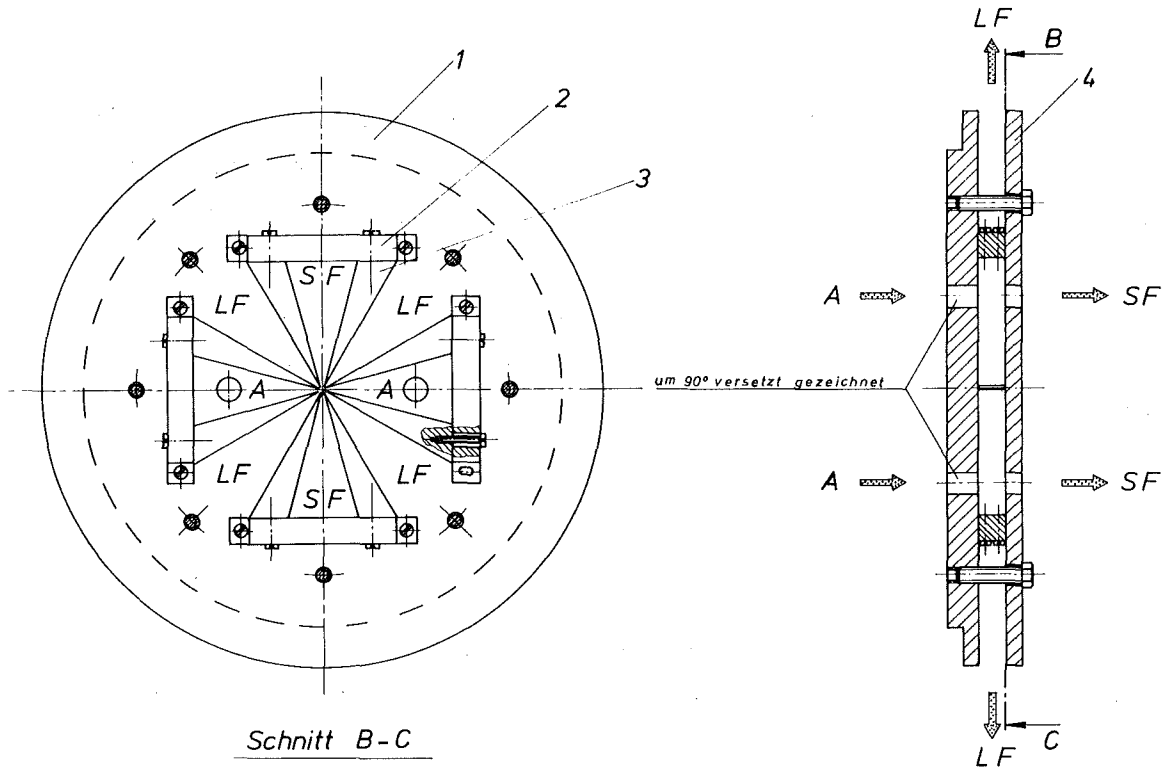


Abb.4a: Aufbau des bei den Trennversuchen verwendeten Trenndüsensystems

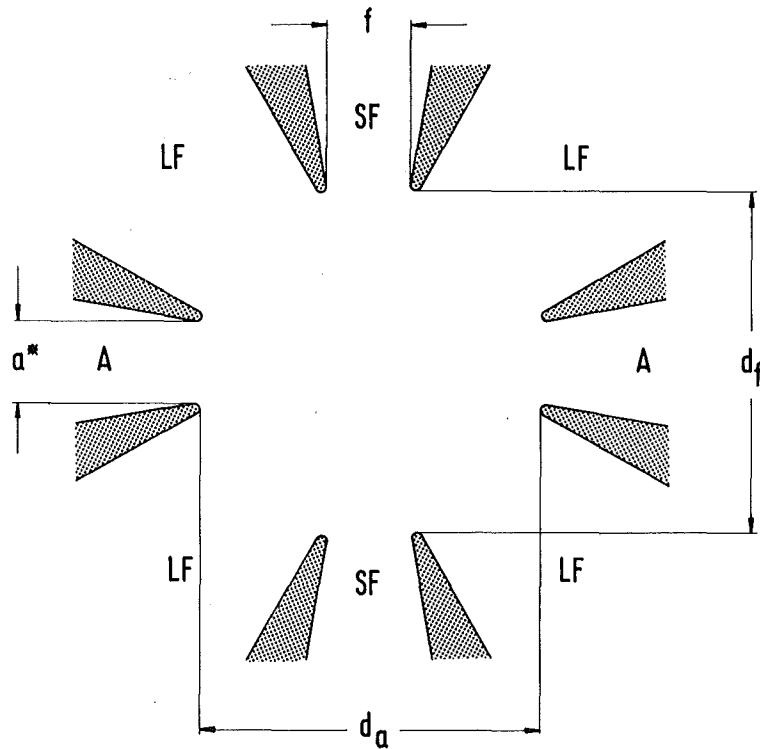


Abb.4b: Definition der charakteristischen Abmessungen. Siehe hierzu auch Tabelle 1.

diesen Justierungen wurden bei Vorversuchen an insgesamt 9 Trennelementeinstellungen die günstigsten Ergebnisse erzielt.

Justierung	$a^+$ /mm	f/mm	$d_a$ /mm	$d_f$ /mm
A	0,2	0,3	0,6	0,6
B	0,1	0,3	0,5	0,4

Tabelle 1: Charakteristische Abmessungen des Trennelements mit frontal gegeneinander gerichteten Gasstrahlen. Siehe hierzu auch Abb.4b.

## 2.3 Instrumentierung und Meßwertverarbeitung

### 2.3.1 Versuchsbetrieb mit $H_2/UF_6$ -Gemischen

Für eine gezielte und schnelle Durchführung von Trennversuchen mit  $H_2/UF_6$ -Gemischen als Verfahrensgas ist es wesentlich, daß während des Versuchs nicht nur die Drücke sondern auch die  $UF_6$ -Molenbrüche in leichter und schwerer Fraktion sowie das  $UF_6$ -Abschälverhältnis und der Gemischtrennfaktor angezeigt werden. Dadurch wird es zum einen möglich, über die Betriebsdrücke das Abschälverhältnis auf einen vorgegebenen Wert einzuregeln. Zum andern kann eine direkte Beobachtung der Gemischtrennung bereits für die Einstellung des Versuchs wichtige Aufschlüsse über das Entmischungs- und Strömungsverhalten des Trenndüsen-systems liefern, so daß die Zahl der zeitaufwendigen Massenspektrometer-Messungen eingeschränkt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb eine Meßanordnung entwickelt, die eine kontinuierliche Be-



stimmung der  $UF_6$ -Molenbrüche, des  $UF_6$ -Abschälverhältnisses und des Gemischtrennfaktors während des Trennversuchs gestattet.

Das Prinzip dieser Meßanordnung geht aus dem in Abb.5 gezeigten Blockschaltbild hervor: Zur Bestimmung der Gemischkonzentration wird mit dem Alpha-Ionisationsdetektor<sup>1)</sup> der von den Partialdichten der Gemischkomponenten abhängige Ionenstrom gemessen. Die Meßzelle des Ionisationsdetektors besteht aus einer zylindrischen Elektrode, die gegenüber einem konzentrischen Kollektordraht auf positivem Potential liegt. Durch einen Alpha-Strahler in der Meßzelle wird das Gasgemisch teilweise ionisiert und es wird mit einem Elektrometerverstärker ein zum Ionenstrom proportionales Spannungssignal erzeugt. Der Gesamtdruck des Gemischs wird mit einem Membrandruckaufnehmer gemessen<sup>2)</sup>. Die Auslenkung der Membran verstimmt eine DMS-Brücke und erzeugt ein druckproportionales Spannungssignal, das soweit verstärkt wird, daß es im gleichen Spannungsbereich liegt wie das Ausgangssignal des Elektrometerverstärkers. Die Ionisationsmeßzellen und Druckaufnehmer mit ihren zugehörigen Verstärkern sind am linken Bildrand symbolisch angedeutet.

In einer Rechenstufe, die den Verstärkern des Druckaufnehmers und des Ionisationsdetektors nachgeschaltet ist, werden die entsprechenden Spannungssignale mit Operationsverstärkern so miteinander verknüpft, daß der  $UF_6$ -Molen-

---

1) Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine  $UF_6$ -beständige Ausführung des schon früher als Gemischanalysator verwendeten Alpha-Ionisationsdetektors /5/ entwickelt.

2) Typ 4-353 der Fa. CEC International Div., Pasadena, USA

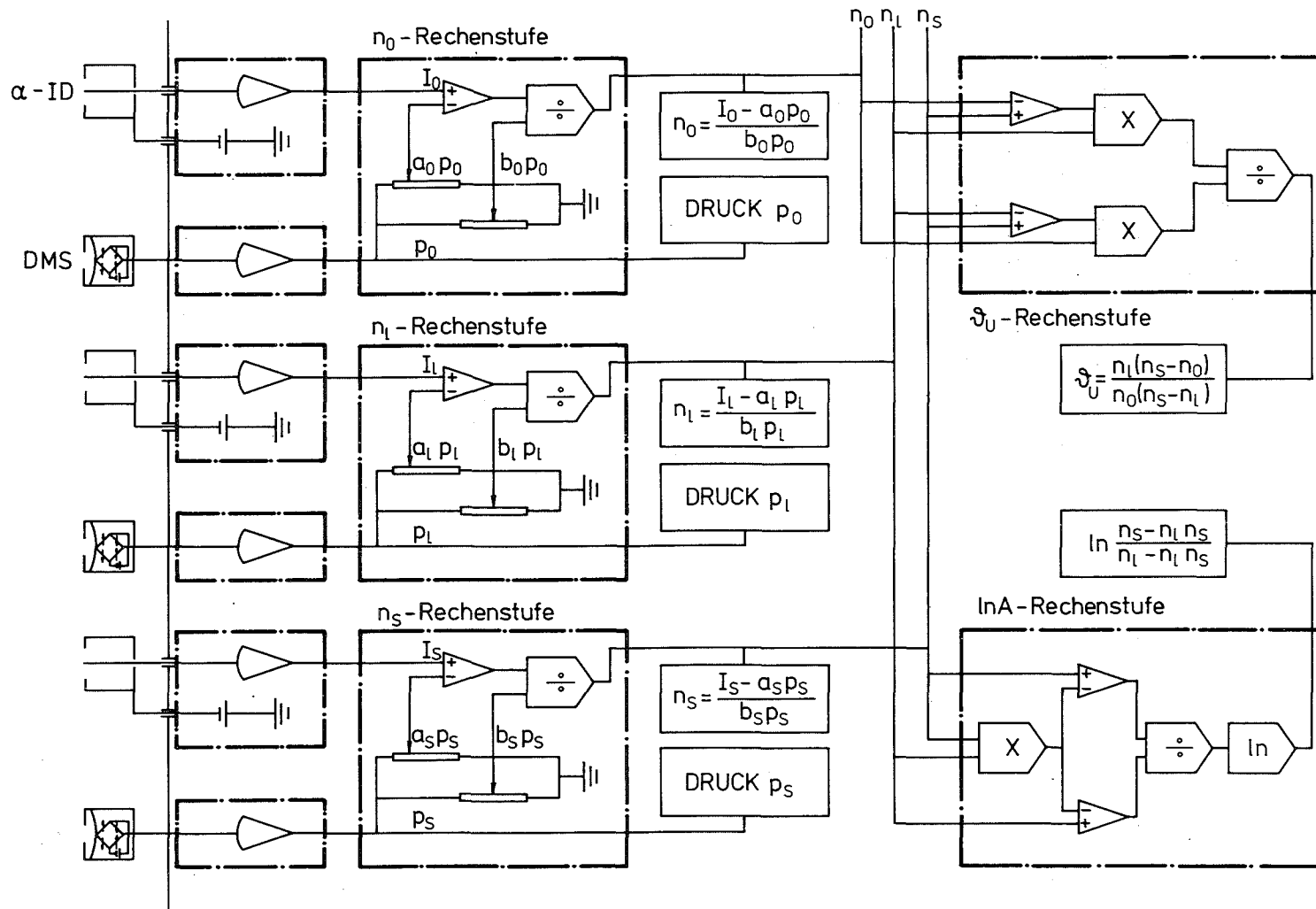


Abb.5: Schematische Darstellung der Meßanordnung zur direkten Bestimmung der Gemischkonzentrationen, des Uranabschälverhältnisses und des logarithmischen Gemischtrennfaktors.

bruch  $n$  nach der Beziehung

$$n = (I - ap) / bp$$

berechnet wird. Dabei sind  $I$  und  $p$  die zum Ionenstrom und zum Gesamtdruck proportionalen Spannungen;  $a$  und  $b$  sind Eichkonstanten, die von der Geometrie der Ionisationsmeßzelle und der Gasart abhängen. An Potentiometern werden die Bruchteile  $a$  und  $b$  vom Drucksignal  $p$  abgegriffen. Impedanzwandler, Teiler und Verstärker, die lediglich der Anpassung der Signale an den Dynamikbereich der einzelnen Rechenbausteine dienen, sind hier und in den folgenden Rechenstufen nicht eingezeichnet.

Aus den  $UF_6$ -Molenbruch-Signalen werden in zwei weiteren Rechenstufen das Uranabschälverhältnis

$$\mathfrak{D}_u = \frac{n_1 (n_s - n_o)}{n_o (n_s - n_1)}$$

und der Logarithmus des Gemischtrennfaktors

$$\ln A = \ln \frac{n_s (1 - n_1)}{n_1 (1 - n_s)}$$

ermittelt. Dabei sind  $n_o$ ,  $n_1$  und  $n_s$  die  $UF_6$ -Molenbrüche im Ausgangsgas bzw. in der leichten und schweren Fraktion. Der Dynamikbereich der Rechenstufen wurde so gewählt, daß bei  $\mathfrak{D}_u$ -Werten  $\geq 0,1$  und  $\ln A$ -Werten  $\geq 1$  eine Rechengenauigkeit von  $\pm 2,5\%$  gewährleistet ist.

### 2.3.2 Versuchsbetrieb mit reinem $UF_6$

Bei Trennversuchen mit reinem  $UF_6$  wurden zur Druckmessung die Ionisationsdetektoren verwendet, da bei den erheblich niedrigeren Betriebsdrücken bei reinem  $UF_6$  die Meßgenauig-

keit der DMS-Membrandruckaufnehmer nicht mehr ausreichend war<sup>3)</sup>. Die Genauigkeit der Druckmessung mit den Ionisationsdetektoren betrug im Druckbereich zwischen 0,01 und 5 Torr etwa 0,5%.

Das Uranabschälverhältnis  $\vartheta_u$  wurde aus den Elementareffekten der Isotopenanreicherung in der leichten und schweren Fraktion,  $\epsilon_\alpha$  und  $\epsilon_\beta$ , bestimmt<sup>4)</sup>.

$$\vartheta_u \approx \epsilon_\beta / (\epsilon_\beta + \epsilon_\alpha)$$

Da die  $\vartheta_u$ -Bestimmung mit dem Massenspektrometer wegen der sehr kleinen Anreicherungseffekte  $\epsilon_\alpha$  und  $\epsilon_\beta$  mit einem relativ großen Meßfehler behaftet war<sup>5)</sup>, wurden zusätzlich an dem hier untersuchten Trenndüsensystem Kontrollmessungen mit den nichtkorrosiven Gasen SF<sub>6</sub> und N<sub>2</sub> durchgeführt. Dabei wurde die Abhängigkeit des Abschälverhältnisses von den Betriebsbedingungen durch eine direkte Messung der Gasströme der leichten und der schweren Fraktion mit Gaszählern ermittelt. Es zeigte sich, daß bei gleicher

---

3) Zur Eichung der Ionisationsdetektoren wurde ein kapazitives Membranmikromanometer verwendet, dessen Genauigkeit im untersuchten Druckbereich etwa 0,2% beträgt. (Typ AC 11 der Fa. Datametrics, Wilmington, Mass., USA)

4) Die Elementareffekte der Isotopenanreicherung  $\epsilon_\alpha$  und  $\epsilon_\beta$  sowie der Elementareffekt der Isotopentrennung werden aus den Molenbrüchen  $N_1$ ,  $N_s$  und  $N_o$  des Uran-235 in der leichten und schweren Fraktion sowie im Ausgangsgas bestimmt:

$$\epsilon_\alpha = \frac{N_1(1-N_o)}{N_o(1-N_1)} - 1 \quad \epsilon_\beta = \frac{N_s(1-N_o)}{N_o(1-N_s)} - 1 \quad \epsilon_A = \frac{N_1(1-N_s)}{N_s(1-N_1)} - 1$$

5) Die elementaren Anreicherungseffekte  $\epsilon_\alpha$  und  $\epsilon_\beta$  lagen mit  $\epsilon_\alpha \approx 2-4^\circ/oo$  und  $\epsilon_\beta \approx 1-2^\circ/oo$  nur wenig oberhalb der Nachweisgrenze von  $0,5^\circ/oo$  des Massenspektrometers.

Reynolds-Zahl das Aufteilungsverhältnis der Strömung nicht merklich von der Gasart beeinflusst wurde. Die für  $\text{SF}_6$  und  $\text{N}_2$  ermittelte Abhängigkeit des Abschälverhältnisses von den Betriebsbedingungen konnte deshalb auf das Strömungsverhalten von  $\text{UF}_6$  übertragen werden, so daß die Meßunsicherheit bezüglich des  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnisses eingeschränkt werden konnte.

### 3. Trennversuche mit $H_2/UF_6$ -Gemischen als Verfahrensgas

#### 3.1 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Isotopen- und Gemischtrennung

In Abb.6 sind typische Meßergebnisse zum Einfluß des Einlaßdrucks und des Expansionsverhältnisses auf die Isotopen- und Gemischtrennung bei gegenseitiger Strahlumlenkung dar-

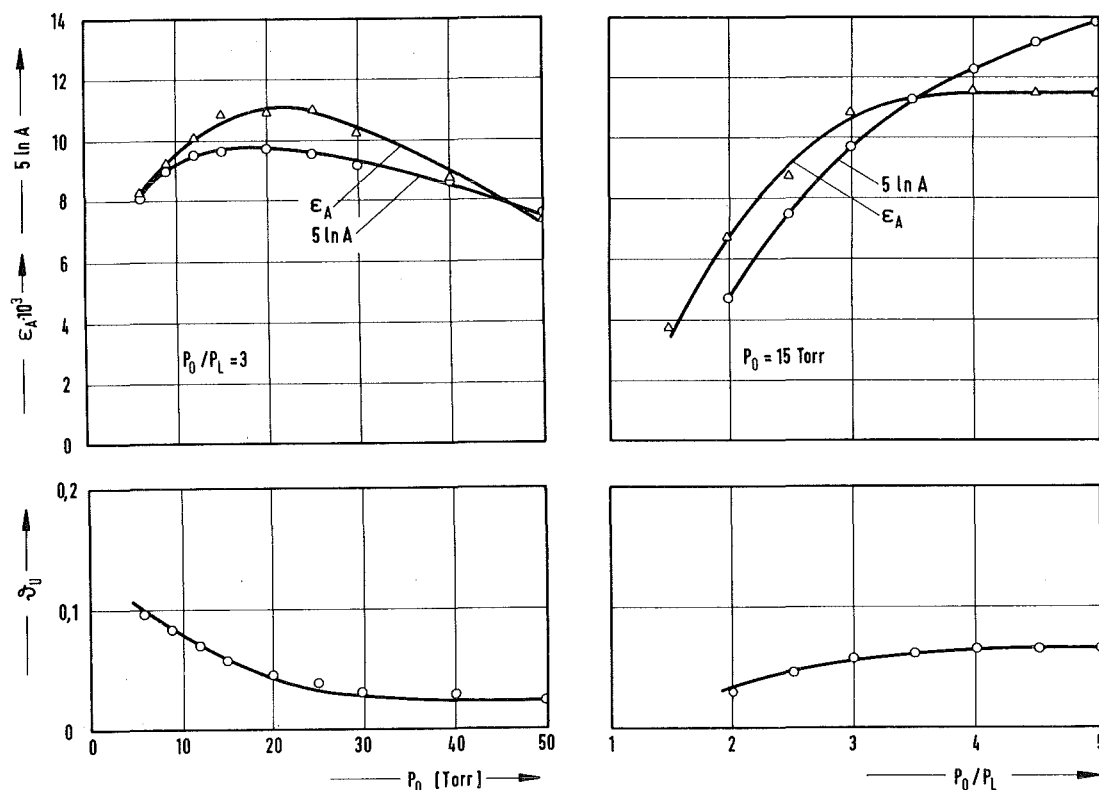


Abb.6: Einfluß des Einlaßdrucks  $p_0$  und des Expansionsverhältnisses  $p_0/p_1$  auf den Elementareffekt  $\epsilon_A$  der Isotopentrennung, den logarithmischen Gemischtrennfaktor  $\ln A$  und das  $UF_6$ -Abschälverhältnis  $\vartheta_u$ . Die Messungen wurden mit einem  $H_2/UF_6$ -Gemisch mit 10 Mol-%  $UF_6$  bei jeweils gleichen Absaugdrücken von leichter und schwerer Fraktion durchgeführt ( $P_0/P_L = P_0/P_S$ ).

gestellt. Bei den Versuchen wurde ein  $H_2/UF_6$ -Gemisch mit 10 Mol-%  $UF_6$  verwendet; die leichte und die schwere Fraktion wurden bei jeweils gleichem Druck abgesaugt.

Der Elementareffekt  $\epsilon_A$  der Isotopentrennung und der logarithmische Gemischtrennfaktor  $\ln A$  durchlaufen hier bei einem Einlaßdruck von etwa 20 Torr ein Maximum. Das Uranabschälverhältnis  $\mathcal{D}_U$  nimmt bei tieferen Einlaßdrücken stark und bei höheren Einlaßdrücken schwach mit zunehmendem Einlaßdruck ab, was auf eine durch Reibungseinflüsse bedingte Aufweitung der Stromlinien bei tieferen Einlaßdrücken zurückzuführen ist.

Mit zunehmendem Expansionsverhältnis steigt der Elementareffekt der Isotopentrennung zunächst steil an und erreicht bereits etwa beim Expansionsverhältnis 4 einen Sättigungswert. Der Gemischtrennfaktor nimmt hingegen im gesamten hier untersuchten Bereich kontinuierlich mit steigendem Expansionsverhältnis zu. Hieraus wird deutlich, daß die beim Elementareffekt der Isotopentrennung auftretende Sättigung nicht auf ungünstige Absaugbedingungen am Trennelement zurückzuführen ist. Das Uranabschälverhältnis nimmt mit steigendem Expansionsverhältnis leicht zu, d.h. die Stromlinien des  $UF_6$  weiten sich mit steigendem Expansionsverhältnis schwach auf<sup>6)</sup>.

Abb.7 zeigt die Ergebnisse von Trennversuchen, bei denen die schwere Fraktion bei höheren Drücken als die leichte Fraktion abgesaugt wurde. Bei einer Verringerung des Expansionsverhältnisses  $p_0/p_s$  der schweren Fraktion steigt

---

6) Bei Umlenkung der Strömung an einer festen Wand fällt das Uranabschälverhältnis mit steigendem Expansionsverhältnis ab /1/.

das Uranabschälverhältnis  $\vartheta_u$  aufgrund des stärkeren Rückstaus der Strömung erwartungsgemäß an. Mit zunehmendem  $\vartheta_u$  bleibt der Trenneffekt  $\epsilon_A$  bei einer nicht zu starken Absenkung von  $p_o/p_s$  annähernd konstant. Die Trennleistung<sup>7)</sup> steigt also beim Rückstau deutlich an, was auf eine Erhöhung des Zentrifugalfeldes durch Verstärkung der Stromlinienkrümmung vor dem Abschäler hinweist. Diese Verbesserung der Trenneigenschaften ist besonders deutlich

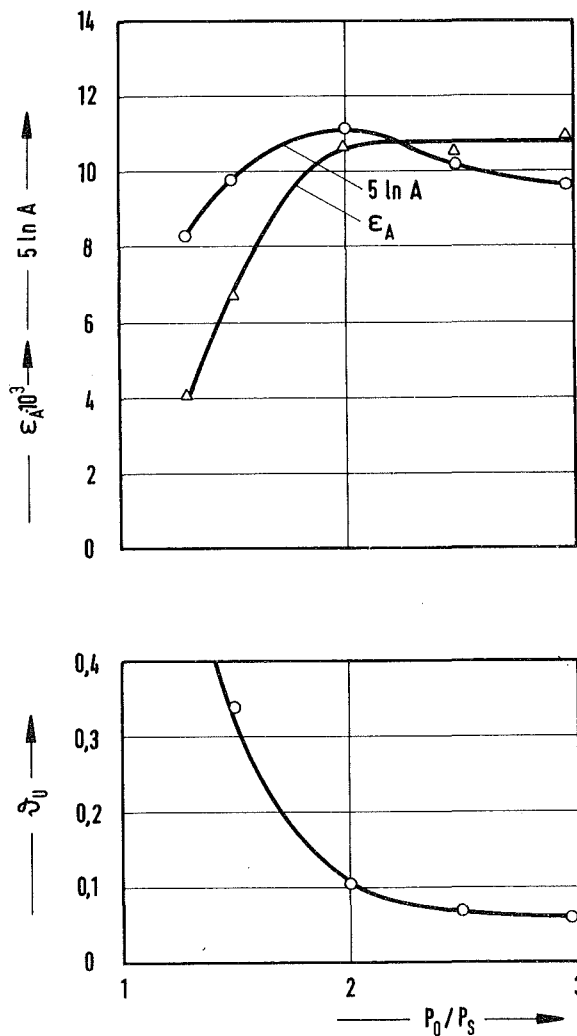


Abb.7:

Einfluß des Expansionsverhältnisses  $p_o/p_s$  der schweren Fraktion auf den Elementareffekt  $\epsilon_A$  der Isotopentrennung, den logarithmischen Gemischtrennfaktor  $\ln A$  und das  $UF_6$ -Abschälverhältnis  $\vartheta_u$ . Die Messungen wurden mit einem  $H_2/UF_6$ -Gemisch mit 10 Mol-%  $UF_6$  bei einem Einlaßdruck  $p_o = 15$  Torr und einem Expansionsverhältnis  $p_o/p_1 = 3$  durchgeführt.

7) Die Trennleistung  $\delta U = \frac{1}{2} n_o L \vartheta_u (1 - \vartheta_u) \epsilon_A^2$  (L=Gasdurchsatz des Gemischs) charakterisiert die Trenneigenschaft eines Trennelements. Vgl. hierzu /12/.



aus dem Verlauf des Gemischtrennfaktors ersichtlich, der mit abnehmendem Expansionsverhältnis der schweren Fraktion sogar zunächst ansteigt. Erst bei relativ niedrigen Werten von  $p_0/p_s$  nehmen der Elementareffekt der Isotopentrennung und der Gemischtrennfaktor bei weiterer Verminderung von  $p_0/p_s$  stark ab, wobei gleichzeitig das Abschälverhältnis  $\vartheta_u$  steil ansteigt.

Abb.8 gibt einen Überblick über den Einfluß des Einlaßdrucks  $p_0$  und des Expansionsverhältnisses  $p_0/p_1$  der leichten Fraktion auf den Elementareffekt  $\epsilon_A$  der Isotopentrennung. Das Expansionsverhältnis  $p_0/p_s$  der schweren Fraktion wurde dabei so eingestellt, daß sich für das Uranabschälverhältnis immer ein Wert von  $\vartheta_u = 0,2$  ergab. Man erkennt, daß sich bei niedrigeren Expansionsverhältnissen  $p_0/p_1$  in einem großen Einlaßdruckbereich  $\epsilon_A$  nur schwach mit  $p_0$  ändert, und daß bei vorgegebenem Expansionsverhältnis die höchsten Werte der Isotopentrennung immer bei einem Einlaßdruck von etwa 15 Torr erreicht werden.

Neben den Untersuchungen an  $H_2/UF_6$ -Gemischen mit 10 Mol-%  $UF_6$  wurden weitere orientierende Versuche an  $H_2/UF_6$ -Gemischen mit 5 bzw. 20 Mol-%  $UF_6$  durchgeführt. Dabei wurden die Einlaßdrücke so gewählt, daß sich bei diesen Gemischen ein  $UF_6$ -Durchsatz einstellte, der dem  $UF_6$ -Durchsatz des Gemisches mit 10 Mol-%  $UF_6$  bei dem für die Isotopentrennung günstigsten Einlaßdruck  $p_0 = 15$  Torr entsprach<sup>8)</sup>. Hierbei zeigte sich, daß die maximal erreichbaren Elementareffekte der Isotopentrennung wie beim Trennelement mit Strahlumlenkung an einer festen Wand mit

---

8) Aus früheren Untersuchungen /1/ ist bekannt, daß bei der Verwendung von Gemischen mit unterschiedlichen  $UF_6$ -Konzentrationen die günstigsten Trenneigenschaften etwa bei gleichem  $UF_6$ -Durchsatz erreicht werden. Dieser Sachverhalt wurde auch beim hier untersuchten Trenndüsen-system bei einer Variation des Einlaßdrucks bei den verschiedenen  $UF_6$ -Konzentrationen bestätigt.

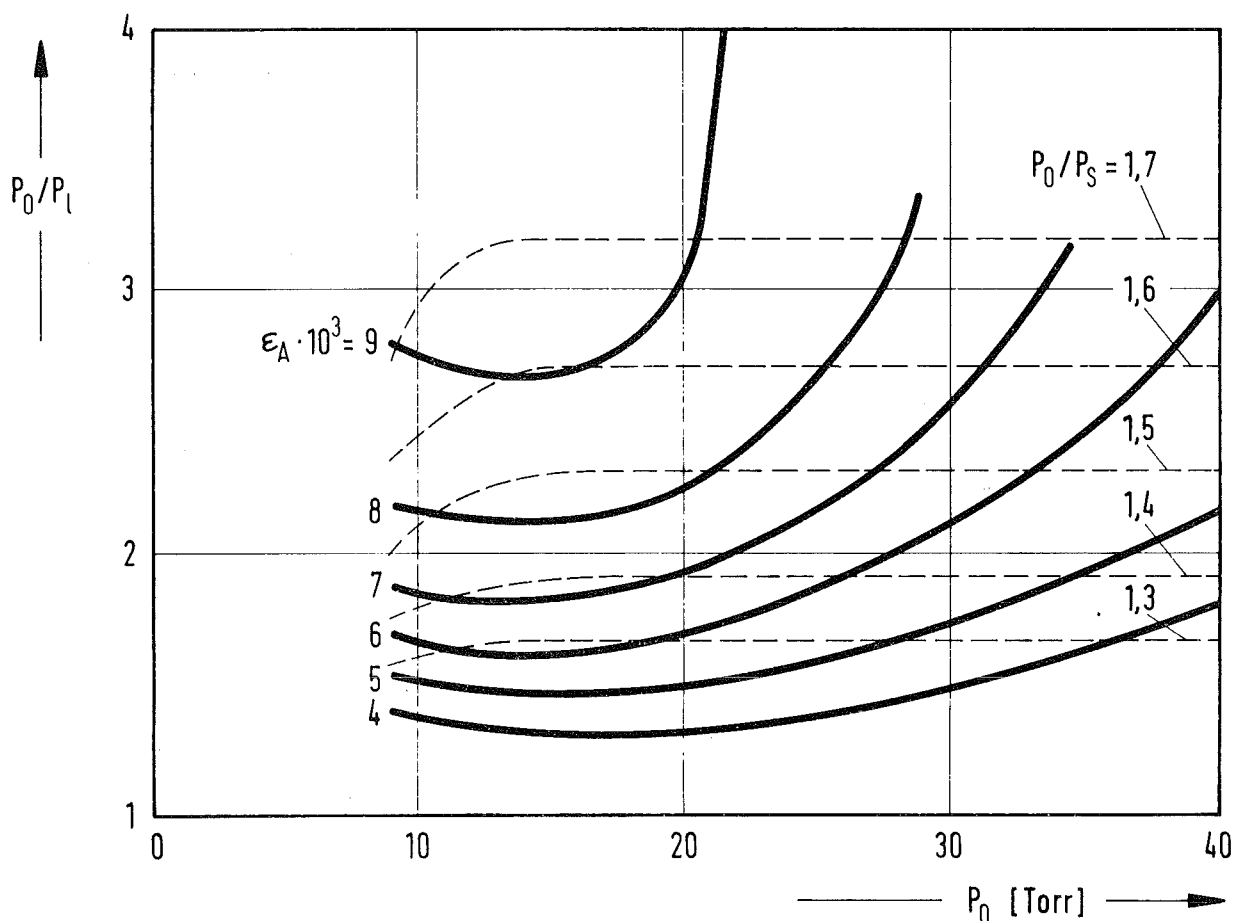


Abb.8: Abhängigkeit des Elementareffektes  $\epsilon_A$  der Uranisotopentrennung vom Einlaßdruck  $p_0$  und dem Expansionsverhältnis  $p_0/p_1$  der leichten Fraktion bei konstantem Uranabschälverhältnis  $\alpha_u = 0,2$ .

abnehmender  $UF_6$ -Konzentration ansteigen. Die Maximalwerte des Trenneffekts werden bei umso kleineren Expansionsverhältnissen erreicht, je niedriger die  $UF_6$ -Konzentration ist.

Es sei noch ergänzend darauf hingewiesen, daß die Strömungskonfiguration im Trennelement bei  $H_2/UF_6$ -Gemischen plötzlich umschlägt, wenn man das Trennelement bei hohen Einlaßdrücken und Expansionsverhältnissen betreibt. Die gegeneinander gerichteten Gasstrahlen gleiten dann unter flachem Winkel aufeinander ab, wobei keine nennenswerte Isotopen- und Gemischtrennung mehr auftritt. Im Anhang

dieser Arbeit wird dieser Sachverhalt ausführlich beschrieben.

### 3.2 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die spezifischen Aufwandsgrößen

In Abb.9 sind die aus den in Abb.7 gezeigten Messungen berechneten Werte für den spezifischen Energieverbrauch  $E_s$ , für das spezifische Ansaugvolumen  $V_s$  und für die spezifische Schlitzlänge  $l_s$  aufgetragen.<sup>9)</sup> Man erkennt, daß bei dem hier untersuchten Trenndüsensystem die spezifischen Aufwandsgrößen durch Verringern des Expansionsverhältnisses der schweren Fraktion um bis zu 50% abgesenkt werden können. Das zu den Minimalwerten von  $E_s$ ,  $V_s$  und  $l_s$  gehörende Abschälverhältnis  $v_u$  beträgt etwa 0,2.

9) Die spezifischen Aufwandsgrößen sind folgendermaßen definiert:

spezifischer Energieaufwand

$$E_s = \frac{2 RT}{n_o v_u (1-v_u) E_A^2} \left[ v_g \ln(p_o/p_1) + (1-v_g) \ln(p_o/p_s) \right]$$

spezifisches Ansaugvolumen

$$V_s = \frac{2 RT}{n_o v_u (1-v_u) E_A^2} \left[ v_g/p_1 + (1-v_g)/p_s \right]$$

spezifische Schlitzlänge

$$l_s = \frac{2}{n_o v_u (1-v_u) E_A^2} \cdot \text{Schlitzlänge/L}$$

(R = allgemeine Gaskonstante, T = absolute Temperatur,  
L = Gasdurchsatz durch das Trennelement,  $v_g$  = Gemisch-  
abschälverhältnis)

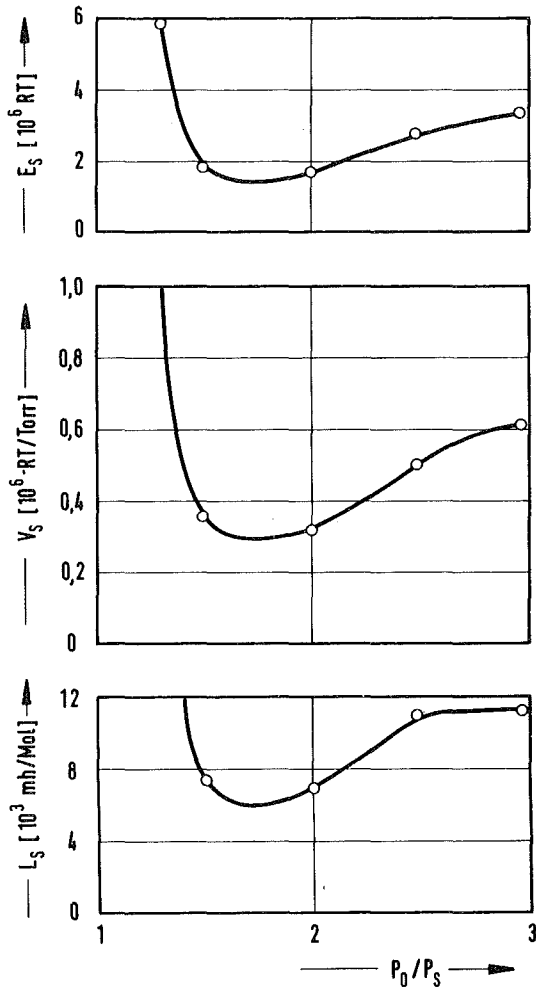


Abb. 9:

Einfluß des Expansionsverhältnisses  $p_0/p_s$  der schweren Fraktion auf den spezifischen Energieverbrauch  $E_s$ , auf das spezifische Ansaugvolumen  $V_s$  und die spezifische Schlitzlänge  $l_s$ . Die Messungen wurden mit einem  $H_2/UF_6$ -Gemisch mit 10 Mol-%  $UF_6$  bei einem Einlaßdruck  $p_0 = 15$  Torr und einem Expansionsverhältnis  $p_0/p_1 = 3$  durchgeführt.

Abb.10 zeigt die Abhängigkeit der spezifischen Aufwandsgrößen vom Einlaßdruck und vom Expansionsverhältnis bei konstantem Uranabschälverhältnis  $\vartheta_u = 0,2$ , wobei die in Abb.8 gezeigten Meßergebnisse zugrundegelegt wurden. Der minimale spezifische Energieverbrauch wird hier bei einem Einlaßdruck von etwa 14 Torr und bei einem Expansionsverhältnis von etwa 2,2 erreicht. Die Minimalwerte des spezifischen Ansaugvolumens und der spezifischen Schlitzlänge liegen erwartungsgemäß bei höheren Einlaßdrücken und Expansionsverhältnissen.

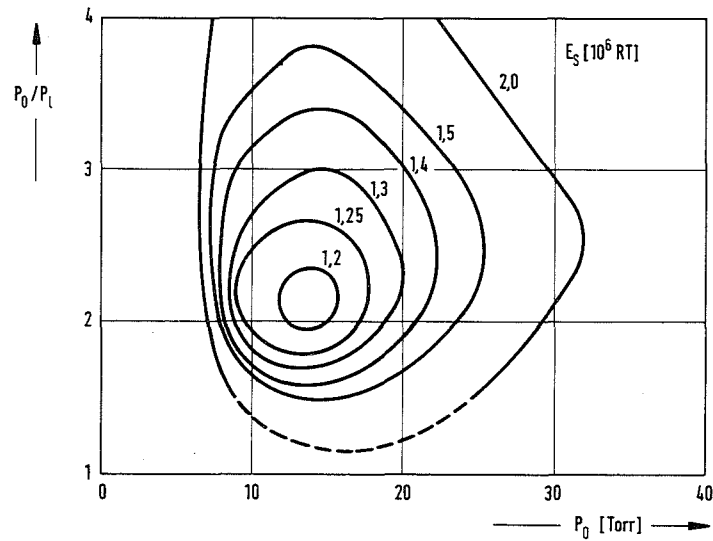
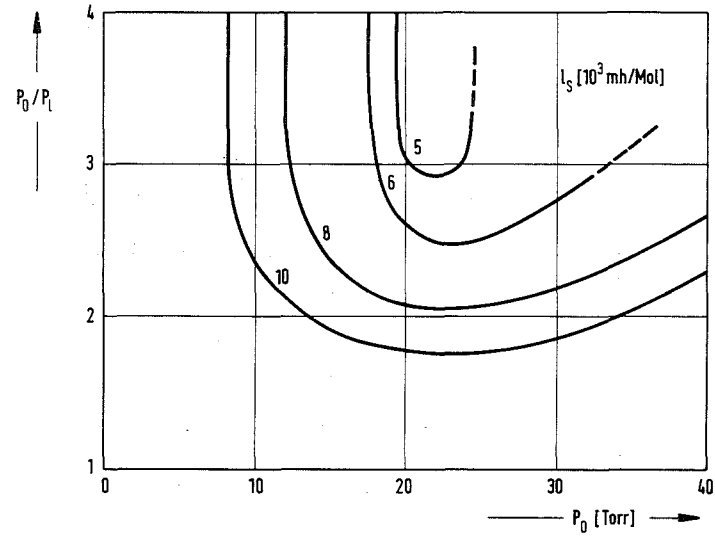
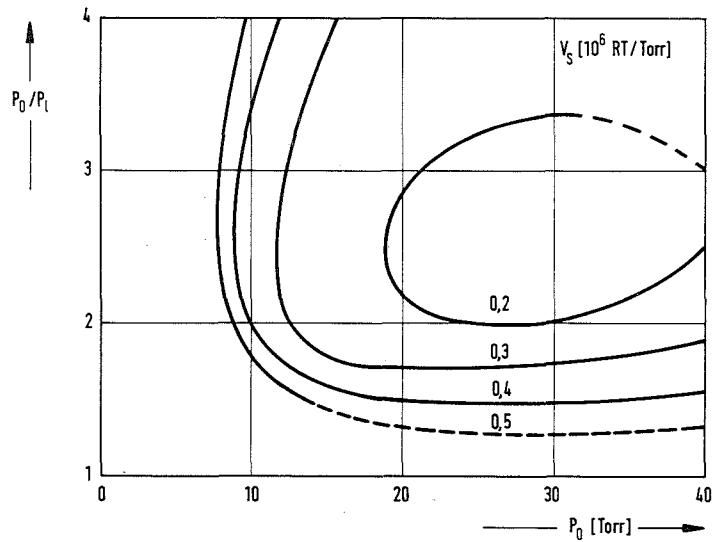


Abb. 10: Abhängigkeit des spezifischen Energieverbrauchs  $E_s$ , des spezifischen Ansaugvolumens  $V_s$  und der spezifischen Schlitzlänge  $l_s$  vom Einlaßdruck  $p_0$  und vom Expansionsverhältnis  $p_0/p_1$  bei konstantem  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnis  $\mathfrak{J}_u = 0,2$ .

Die orientierenden Versuche mit 5 bzw. 20 Mol-%  $\text{UF}_6$  ergaben bei  $\vartheta_u = 0,2$  spezifische Aufwandsgrößen, die sich nur wenig von den mit 10 Mol-%  $\text{UF}_6$  erreichten Werten unterscheiden.

4. Trennversuche mit reinem UF<sub>6</sub> als Verfahrensgas

4.1 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Isotopentrennung

Die orientierenden Messungen mit H<sub>2</sub>/UF<sub>6</sub>-Gemischen unterschiedlicher UF<sub>6</sub>-Konzentration führten zu dem Ergebnis, daß die spezifischen Aufwandsgrößen beim Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung deutlich schwächer von der UF<sub>6</sub>-Konzentration abhängen als beim Trennelement mit

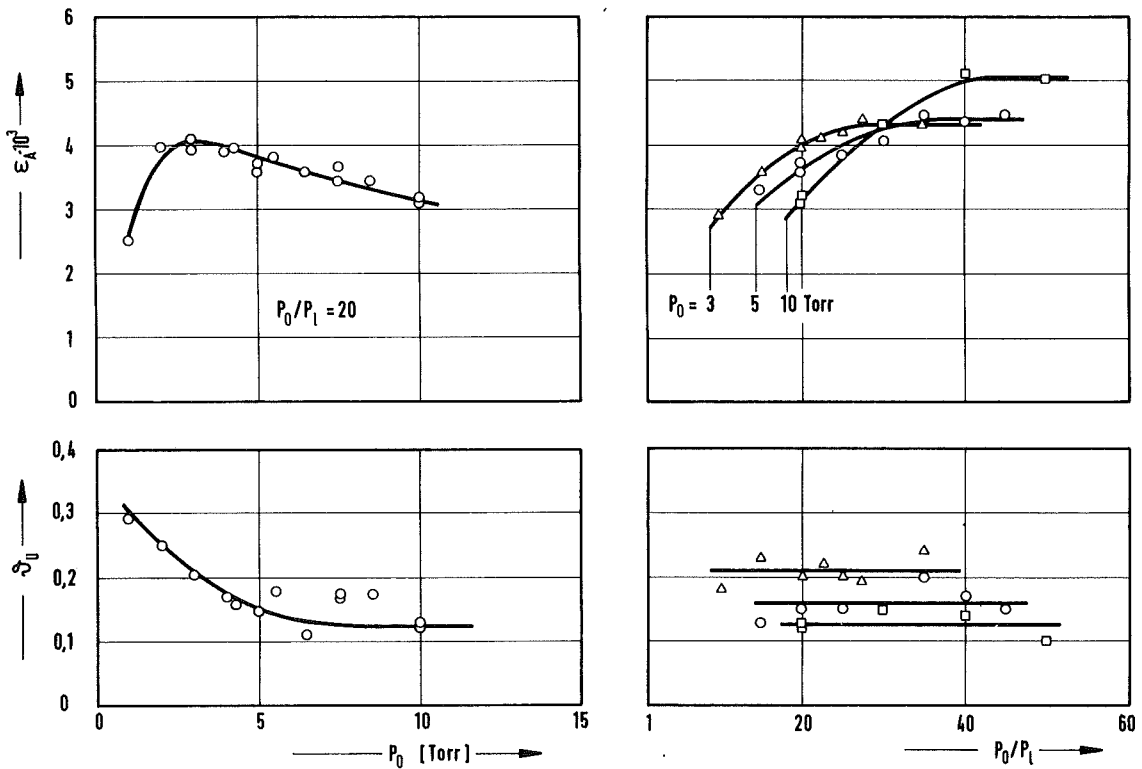


Abb.11: Einfluß des Einlaßdrucks  $p_0$  und des Expansionsverhältnisses  $p_0/p_1$  der leichten Fraktion auf den Elementareffekt  $\epsilon_A$  der Uranisotopentrennung und auf das Uranabschälverhältnis  $v_u$  bei reinem UF<sub>6</sub> als Verfahrensgas. Die Messungen wurden bei gleichem Absaugdruck von leichter und schwerer Fraktion durchgeführt.

fester Umlenkwand<sup>10)</sup>. Es wurden deshalb zusätzliche Messungen mit reinem UF<sub>6</sub> als Verfahrensgas durchgeführt, wobei die Trennelementjustierung B (vgl. Tab.1) verwendet wurde, mit der bei Vorversuchen die günstigsten Ergebnisse für reines UF<sub>6</sub> erzielt wurden.

In den Abbn. 11 und 12 sind typische Meßergebnisse zum Einfluß des Einlaßdrucks und der Expansionsverhältnisse

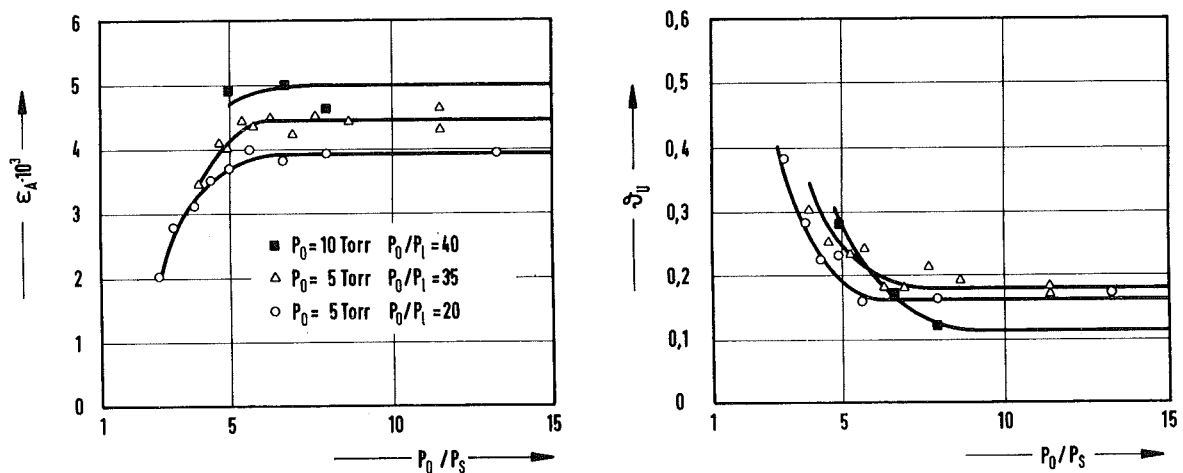


Abb.12: Abhängigkeit des Elementareffekts  $\epsilon_A$  der Uranisotopentrennung und des Uranabschälverhältnisses  $\delta_U$  vom Expansionsverhältnis  $p_0/p_s$  der schweren Fraktion bei reinem UF<sub>6</sub> als Verfahrensgas. Die Meßpunkte für  $p_0/p_s > 15$  sind nicht aufgetragen.

10) Beim Trennelement mit fester Umlenkwand steigen die spezifischen Aufwandsgrößen bei der Verwendung von H<sub>2</sub>/UF<sub>6</sub>-Gemischen als Verfahrensgas bereits für UF<sub>6</sub>-Konzentrationen  $n_0 \gtrsim 3 \text{ Mol-\%}$  deutlich mit zunehmender UF<sub>6</sub>-Konzentration an /13/.



von leichter und schwerer Fraktion auf die Isotopentrennung dargestellt. Der Elementareffekt  $\epsilon_A$  der Isotopentrennung steigt mit zunehmendem Einlaßdruck zunächst steil an (Abb.11), wobei gleichzeitig das Abschälverhältnis  $\vartheta_u$  stark abnimmt. Für Einlaßdrücke  $p_0 \gtrsim 3$  Torr fällt  $\epsilon_A$  mit zunehmendem  $p_0$  langsam ab. Das Abschälverhältnis  $\vartheta_u$  ändert sich dabei nur noch geringfügig mit dem Einlaßdruck, d.h. die Stromlinienkonfiguration der inneren Strömungsbereiche, die mit der schweren Fraktion abgeführt werden, wird für  $p_0 \gtrsim 7$  Torr weder durch die Reibungsvorgänge am Strahlrand noch durch die Reibungseinflüsse in der Stauzone der gegeneinander gerichteten Strahlen wesentlich beeinflusst.

Mit zunehmendem Expansionsverhältnis strebt der Trenneffekt einem Sättigungswert zu, der bei den hier untersuchten Einlaßdrücken von 3,5 und 10 Torr bei  $p_0 = 10$  Torr mit  $\epsilon_A = 5^{\circ}/\infty$  am höchsten ist. Die Annäherung an den Sättigungswert erfolgt bei niedrigeren Einlaßdrücken schneller, und es ergeben sich im Bereich kleiner Expansionsverhältnisse bei den niedrigeren Einlaßdrücken höhere  $\epsilon_A$ -Werte. Im Gegensatz zu den Messungen mit  $H_2/UF_6$ -Gemischen wird also hier ein Anstieg des für die Isotopentrennung optimalen Einlaßdrucks mit dem Expansionsverhältnis beobachtet. Im untersuchten Expansionsverhältnis-Bereich hängt das Abschälverhältnis  $\vartheta_u$  innerhalb der Meßgenauigkeit nicht vom Expansionsverhältnis ab.

Wie Abb.12 zeigt, kann die schwere Fraktion wie im Fall des  $H_2/UF_6$ -Gemischs bei wesentlich höherem Druck als die leichte Fraktion abgesaugt werden, ohne daß dadurch der Trenneffekt verringert wird. Erst bei vergleichsweise kleinen Expansionsverhältnissen  $p_0/p_s$  der schweren Fraktion

beobachtet man bei weiterem Rückstau der schweren Fraktion eine Abnahme des Trenneffekts und eine Zunahme des Abschälverhältnisses. Der Rückstau der schweren Fraktion bewirkt ähnlich wie beim  $H_2/UF_6$ -Gemisch eine Steigerung der Trennleistung, was bei den Messungen mit Einlaßdruck  $p_0 = 10$  Torr und Expansionsverhältnis  $p_0/p_1 = 40$  besonders deutlich wird.

#### 4.2 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die spezifischen Aufwandsgrößen

In Abb.13 sind die spezifischen Aufwandsgrößen für das Trenndüsensystem mit gegenseitiger Strahlumlenkung aufgetragen, die aus den in Abb.12 gezeigten Meßergebnissen für reines  $UF_6$  berechnet wurden. Die niedrigsten Werte für alle spezifischen Aufwandsgrößen werden bei einem Einlaßdruck  $p_0 = 10$  Torr, einem Expansionsverhältnis der leichten Fraktion  $p_0/p_1 = 40$  und einem Expansionsverhältnis der schweren Fraktion  $p_0/p_s = 5$  erreicht. Da die Messungen mit reinem  $UF_6$  einen höheren Zeitaufwand für die Isotopenanalyse erforderten und insbesondere keine kontinuierliche Messung des  $UF_6$ -Abschälverhältnisses wie beim Gemisch möglich war, wurde auf eine Optimierung der Betriebsdrücke durch Aufnahme von Höhenliniendiagrammen für die spezifischen Aufwandsgrößen bei konstantem Uranabschälverhältnis verzichtet. Der bei diesen orientierenden Versuchen ermittelte Minimalwert des spezifischen Energieaufwands ist für reines  $UF_6$  um 25 bis 30% niedriger als bei den  $H_2/UF_6$ -Gemischen. Das spezifische Ansaugvolumen ist hingegen um etwa einen Faktor 5 höher als beim Gemisch, wenn man die kleinere Düsenweite der Trennelementeinstellung B mitberück-

sichtigt<sup>11)</sup>. Die spezifische Schlitzlänge ist bei reinem  $\text{UF}_6$  etwa um einen Faktor 2 größer als beim  $\text{H}_2/\text{UF}_6$ -Gemisch.

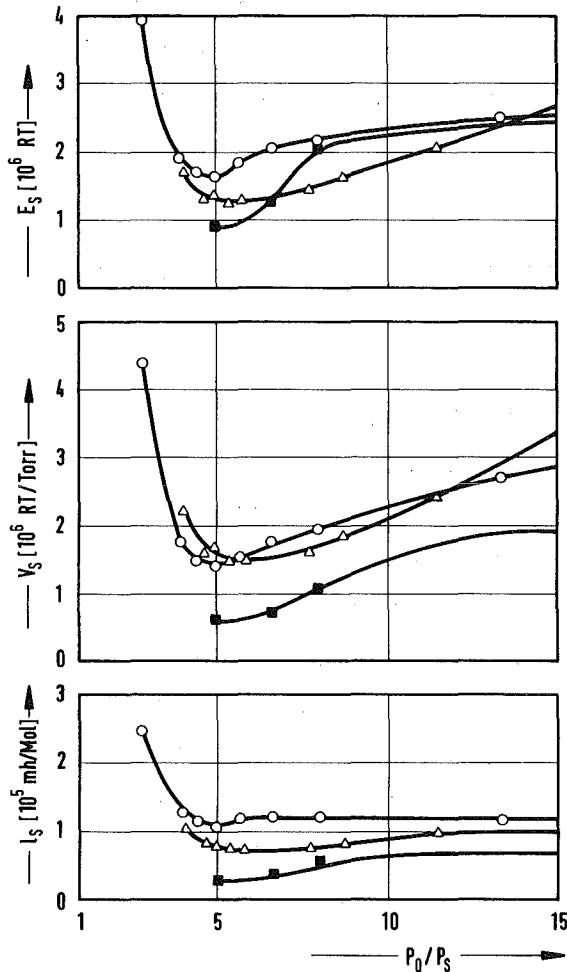


Abb.13: Der spezifische Energieverbrauch  $E_s$ , das spezifische Ansaugvolumen  $V_s$  und die spezifische Schlitzlänge  $l_s$  berechnet aus den in Abb.12 dargestellten Meßwerten für reines  $\text{UF}_6$  als Verfahrensgas. Versuchsbedingungen: Einlaßdruck  $p_0 = 5$  Torr, Expansionsverhältnis  $p_0/p_1 = 20$  (Kreise),  $p_0 = 5$  Torr,  $p_0/p_1 = 35$  (Dreiecke) und  $p_0 = 10$  Torr,  $p_0/p_1 = 40$  (Vierecke). Alle Messungen wurden mit reinem  $\text{UF}_6$  als Verfahrensgas durchgeführt. Die Meßpunkte für  $p_0/p_s > 15$  sind nicht aufgeführt.

11) Nach den Ähnlichkeitsgesetzen der Gaskinetik ist der optimale Betriebsdruck beim Trenndüsenverfahren umgekehrt proportional zu den charakteristischen Abmessungen des Trennelements. Da die Größe eines Trennelements aus Fertigungsgründen durch seine kleinste charakteristische Abmessung bestimmt wird, werden bei einem Vergleich der spezifischen Ansaugvolumina zweier Trennelemente die Betriebsdrücke zugrundegelegt, die bei gleichen Werten für die kleinsten Abmessungen einzustellen wären. Beim gegenwärtigen Stand der Technik beherrscht man die Fertigung von Trennelementen mit kleinsten charakteristischen Abmessungen bis zu  $10\ \mu$ .

## 5. Vergleich von Trenndüsensystemen mit Strahlumlenkung an einer festen Wand und gegenseitiger Strahlumlenkung

### 5.1 Isotopen- und Gemischtrennung

Im folgenden werden die Trenneigenschaften des hier untersuchten Trenndüsensystems mit gegenseitiger Strahlumlenkung mit den Trenneigenschaften des in Abb.1 dargestellten Systems verglichen, bei dem die Strömung an einer gekrümmten Wand um  $180^\circ$  umgelenkt wird<sup>12)</sup>. Die Vergleichsmessungen wurden mit einem  $H_2/UF_6$ -Gemisch mit 10 Mol-%  $UF_6$  beim Abschälverhältnis  $\vartheta_u = 0,2$  durchgeführt. Die Einstellung des Abschälverhältnisses erfolgte beim Trennelement mit gekrümmter Wand durch Ändern der Abschälerweite und beim Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung durch Rückstau der schweren Fraktion.

Aus den in Abb.14 gezeigten Messungen geht hervor, daß die Kurven für die Einlaßdruckabhängigkeit des Elementareffekts der Isotopentrennung für beide Trennelemente annähernd parallel verlaufen; der für die Isotopentrennung optimale Einlaßdruck liegt zwischen 10 und 15 Torr. Beim niedrigsten hier untersuchten Expansionsverhältnis von  $p_0/p_1 = 1,5$  werden bei gegenseitiger Strahlumlenkung um 10 bis 20% höhere Trenneffekte erzielt, während bei höheren Expansionsverhältnissen beim Trennelement mit Umlenkwand eine zunehmend stärkere Isotopenentmischung erreicht wird. Die  $E_A$ -Werte sind für  $p_0/p_1 = 4$  um 25 bis 30% höher als bei gegenseitiger Strahlumlenkung.

---

12) Der Krümmungsradius der Umlenkwand des hierbei verwendeten Trenndüsensystems betrug 0,75 mm, der durch Düsenblech und Umlenkwand gebildete Düsenkanal besaß eine konstante Breite von 0,3 mm. Mit dieser Trenndüsengeometrie wurden bei ausführlichen Optimierungsuntersuchungen die bisher günstigsten Werte für die spezifischen Aufwandsgrößen erzielt /2/,/11/.

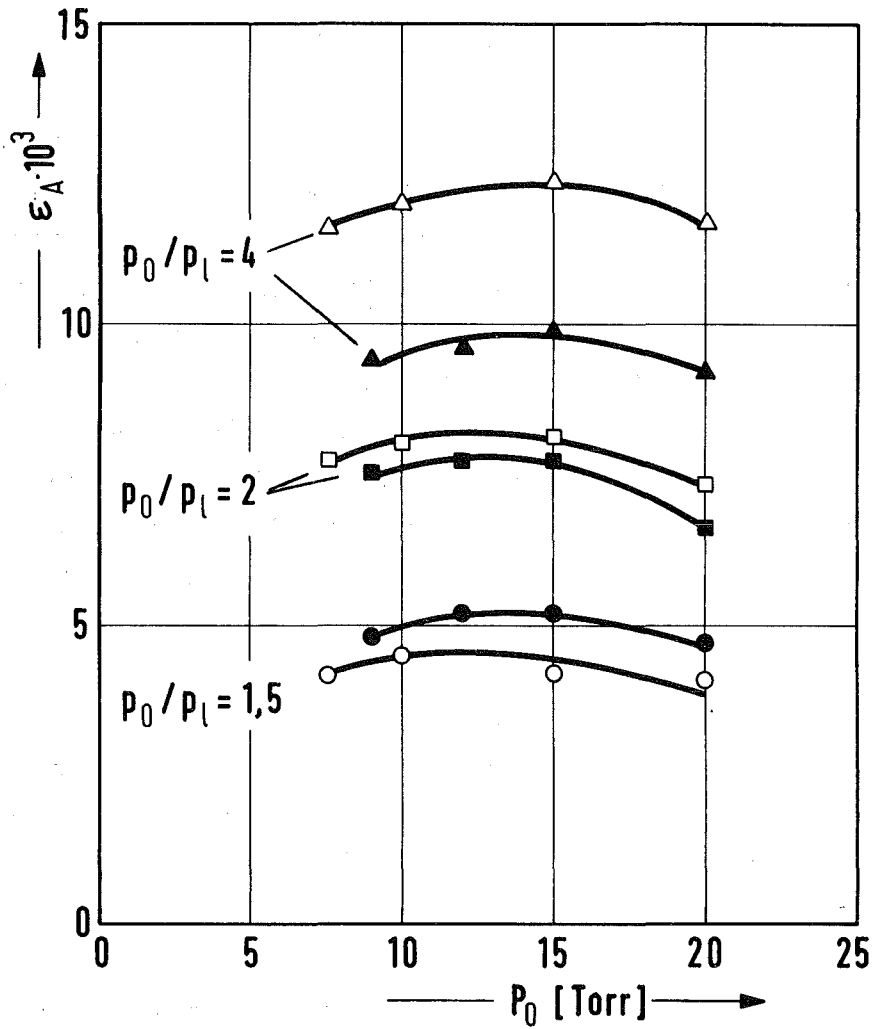


Abb. 14: Abhängigkeit des Elementareffekts  $\epsilon_A$  der Uranisotopentrennung vom Einlaßdruck  $p_0$  für ein Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung (gefüllte Symbole) und ein Trennelement mit Umlenkwand (leere Symbole). Die Messungen wurden mit einem  $H_2/UF_6$ -Gemisch mit 10 Mol-%  $UF_6$  bei einem Uranabschälverhältnis  $\alpha_u = 0,2$  durchgeführt.

## 5.2 Spezifische Aufwandsgrößen

In Tabelle 2 sind die bisher erzielten Minimalwerte des spezifischen Energieaufwands  $E_s$  des Trennelements mit gegenseitiger Strahlumlenkung und des Trennelements mit Strahlumlenkung an einer festen Wand für verschiedene  $UF_6$ -Konzentrationen  $n_0$  zusammengestellt. Neben den  $E_s$ -Werten sind die zugehörigen Einlaßdrücke  $p_0$  und Expansionsverhältnisse  $p_0/p_1$  sowie die hierbei erreichten Werte für die spezifische Schlitzlänge  $l_s$  und das spezifische Ansaugvolumen  $V_s$  aufgeführt<sup>13)</sup>. Die  $V_s$ -Werte wurden zur Vereinheitlichung für alle Versuche auf eine kleinste charakteristische Trennelementabmessung von  $10\mu$  umgerechnet<sup>11)</sup>.

Bei der Verwendung von  $H_2/UF_6$ -Gemischen werden beim Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung für  $UF_6$ -Konzentrationen zwischen 5 und 20 Mol-%  $UF_6$  etwa gleiche Werte für den spezifischen Energieverbrauch erzielt, während bei der Strahlumlenkung an einer festen Wand der spezifische Energieverbrauch bis zu  $UF_6$ -Konzentrationen von etwa 3 Mol-%  $UF_6$  noch abfällt. Das spezifische Ansaugvolumen und die spezifische Schlitzlänge nehmen bei beiden Trennelementen mit kleiner werdender  $UF_6$ -Konzentration ab. Die jeweils günstigsten Werte der spezifischen Aufwandsgrößen sind beim Trennelement mit Umlenk wand noch deutlich niedriger als die bisher erzielten Werte des Trennelements mit gegenseitiger Strahlumlenkung, wenn  $H_2/UF_6$ -Gemische als Verfahrensgas verwendet werden.

---

13) Die für das Trennelement mit Umlenk wand angegebenen spezifischen Aufwandsgrößen wurden im Rahmen ausführlicher Optimierungsuntersuchungen ermittelt: vgl. hierzu /10/, /11/.

Trennelement	$n_0$	$P_0$ (Torr)	$P_0/P_1$	$E_s$ ( $10^6 RT$ )	$V_s(10\mu)$ ( $10^4 RT/Torr$ )	$l_s$ ( $10^4$ mh/Mol)
gegenseitige Strahlumlenkung	100	10.0	40.0	0.91	6.1	2.5
	20	10.7	3.9	1.24	1.7	1.6
	10	15.0	2.3	1.18	1.2	1.2
	5	19.2	1.8	1.27	1.1	1.0
Umlenkung mit fester Wand	100	7.5	20.0	5.20	15.0	10.0
	10	12.4	2.9	1.03	1.3	1.2
	5	20.0	2.3	0.90	1.0	0.53
	3	30.0	2.0	0.85	0.7	0.42

Tabelle 2: Ergebnisse von Trennversuchen mit den günstigsten Werten des spezifischen Energieverbrauchs bei verschiedenen  $UF_6$ -Konzentrationen  $n_0$  für das Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung und das Trennelement mit Umlenkung an einer festen Wand. Die  $V_s(10\mu)$ -Werte sind für eine kleinste charakteristische Abmessung von  $10\mu$  berechnet. Siehe hierzu auch die Anmerkung (11).

Im Fall des reinen  $\text{UF}_6$  werden bei gegenseitiger Strahlumlenkung wesentlich günstigere spezifische Aufwandsgrößen als bei der Strahlumlenkung an einer festen Wand erreicht. Der spezifische Energieaufwand stimmt annähernd mit den niedrigen  $E_s$ -Werten überein, die beim Trennelement mit Umlenkwand für  $\text{H}_2/\text{UF}_6$ -Gemische mit niedriger  $\text{UF}_6$ -Konzentration erzielt werden. Die spezifische Schlitzlänge und das spezifische Ansaugvolumen sind bei reinem  $\text{UF}_6$  allerdings wesentlich größer als bei  $\text{H}_2/\text{UF}_6$ -Gemischen.



## 6. Diskussion der Ergebnisse

Aus den Versuchen geht hervor, daß das Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung dem mit fester Umlenkwand dann wirtschaftlich überlegen ist, wenn beide Anordnungen mit  $H_2/UF_6$ -Gemisch als Verfahrensgas bei kleinen Expansionsverhältnissen ( $p_0/p_1 \lesssim 1,8$ ) betrieben werden. Bemerkenswert ist, daß bei Verwendung von reinem  $UF_6$ , d.h. unter Verzicht auf das leichte Zusatzgas die gegenseitige Strahlumlenkung zu wesentlich günstigeren Resultaten führt als die Umlenkung durch eine Wand. Dagegen wird die mit der Umlenkwand unter optimalen Betriebsbedingungen, d.h. mit Zusatzgas erzielte Wirtschaftlichkeit mit der gegenseitigen Strahlumlenkung im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erreicht.

Dieses Ergebnis läßt sich anhand des diffusionstheoretischen Modells der Trenndüsenentmischung /4/ folgendermaßen erklären: Im Bereich niedriger Geschwindigkeitsverhältnisse<sup>14)</sup> des  $UF_6$ , wie sie bei kleinen Expansionsverhältnissen oder bei Verwendung von reinem  $UF_6$  vorliegen, nimmt der Elementareffekt der Isotopentrennung stark mit dem  $UF_6$ -Geschwindigkeitsverhältnis zu. Eine Verminderung der Reibungsverluste, die zu einer Erhöhung des Geschwindigkeitsverhältnisses bei vorgegebenem Expansionsverhältnis der Strömung führt, kann also in diesem Fall eine merkliche Steigerung des Trenneffekts bewirken. Die günstigeren Trenneigenschaften des Trenndüsen systems mit gegenseitiger Strahlumlenkung, die sich

---

14) Das Geschwindigkeitsverhältnis, das als Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit zu wahrscheinlichster thermischer Geschwindigkeit im Schwerpunktssystem der Strömung definiert ist, bestimmt den entmischenden Druckdiffusionsstrom und damit den Elementareffekt der Isotopentrennung.

für  $H_2/UF_6$ -Gemische bei kleinen Expansionsverhältnissen sowie für reines  $UF_6$  ergeben, dürften hiernach im wesentlichen auf die für die gegenseitige Strahlumlenkung erwarteten geringeren Reibungsverluste zurückzuführen sein.

Für hohe  $UF_6$ -Geschwindigkeitsverhältnisse ändert sich der Elementareffekt der Isotopentrennung hingegen nur wenig mit dem Geschwindigkeitsverhältnis /4/, so daß eine Verminderung der Reibungsverluste kaum mehr zum Tragen kommt /14/. Die ungünstigeren Trenneigenschaften, die bei  $H_2/UF_6$ -Gemischen im Fall höherer Expansionsverhältnisse für die gegenseitige Strahlumlenkung beobachtet werden, dürften u.a. darauf zurückzuführen sein, daß die Stromlinien im Bereich vor dem Abschäler nur noch eine schwache Krümmung aufweisen. Die damit verbundene Abnahme der Zentrifugalkräfte führt dann zu einer verstärkten Rückmischung in diesem Strömungsbereich. Diese Annahme wird dadurch unterstützt, daß die Trenneigenschaften des Systems mit gegenseitiger Strahlumlenkung durch einen Rückstau der schweren Fraktion, durch den die Stromlinienkrümmung im Bereich vor dem Abschäler verstärkt wird, deutlich verbessert werden.

Eine Verbesserung der Trenneigenschaften des Trennelements mit gegenseitiger Strahlumlenkung kann nach dem Diffusionsmodell /4/ möglicherweise durch die Verwendung von He oder  $D_2$  als Zusatzgas anstelle von  $H_2$  erreicht werden. Bei  $D_2/UF_6$ - bzw.  $He/UF_6$ -Gemischen sind zwar einerseits die Reynolds-Zahlen für maximale Isotopentrennung niedriger als bei  $H_2/UF_6$ -Gemischen, so daß Reibungseinflüsse stärker zum Tragen kommen. Andererseits weisen jedoch  $D_2$  und He, die sich weniger stark vom  $UF_6$  abtrennen als  $H_2$ , günstigere Eigenschaf-

ten für die Isotopentrennung auf<sup>15)</sup>. Da bei gegenseitiger Strahlumlenkung geringere Reibungsverluste auftreten als bei der Umlenkung an einer festen Wand, wäre demnach zu erwarten, daß die günstigeren Diffusionseigenschaften der Zusatzgase  $D_2$  und He beim Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung besser ausgenützt werden können.

Herrn Prof. Dr. E.W. Becker danken wir für die Anregung zu dieser Arbeit und für ihre stete Förderung. Frau Dr. U. Ehrfeld und Herrn Dr. P. Bley danken wir für wertvolle Diskussionen.

---

15) Dieser Sachverhalt wird in /14/ ausführlich diskutiert. Dabei wird u.a. gezeigt, daß bei hohen  $UF_6$ -Geschwindigkeitsverhältnissen mit  $D_2$  als Zusatzgas höhere Elementareffekte der Uranisotopentrennung als mit  $H_2$  erreicht werden.

7. Anhang: Änderung der Strömungskonfiguration im Trenndüsensystem mit gegenseitiger Strahlumlenkung bei hohen Einlaßdrücken und Expansionsverhältnissen

In Kapitel 3.1 wurde darauf hingewiesen, daß beim Trennelement mit gegenseitiger Strahlumlenkung zwei völlig verschiedene Strömungskonfigurationen auftreten können: Bei einer Steigerung des Einlaßdruckes bei höheren Expansionsverhältnissen stellt man fest, daß oberhalb eines bestimmten "kritischen" Druckes die Gemisch- und Isotopentrennung plötzlich sehr stark absinken, wobei gleichzeitig das Uranabschälverhältnis ansteigt (vgl. Abb.15)<sup>16)</sup>. Entsprechend beobachtet man bei einer Absenkung des Druckes einen plötzlichen Anstieg der Trennung bei gleichzeitiger Abnahme des Abschälverhältnisses. Der kritische Druckwert für eine Änderung der Trennung bzw. des Abschälverhältnisses hängt von der Richtung der Druckänderung ab. Der kritische Druck ist höher, wenn die Kurve in Richtung zunehmender Einlaßdrücke durchlaufen wird und niedriger, wenn man von hohen zu niedrigen Einlaßdrücken übergeht; d.h. die Einlaßdruckabhängigkeit der Trennung und des Abschälverhältnisses weist einen hysteresisähnlichen Verlauf auf.

Das Umschlagen der Trennung erfolgt bei umso kleineren Einlaßdrücken, je höher das Expansionsverhältnis ist. Weiter verschiebt sich der kritische Druck zu höheren Werten, wenn die  $UF_6$ -Konzentration verringert wird. Die orientierenden Messungen bei verschiedenen Justierungen des Trennelements zeigten, daß das Umschlagen

---

16) Die den Abbn.15 und 17 zugrundeliegenden Trennelementjustierungen unterscheiden sich von den Justierungen A und B.

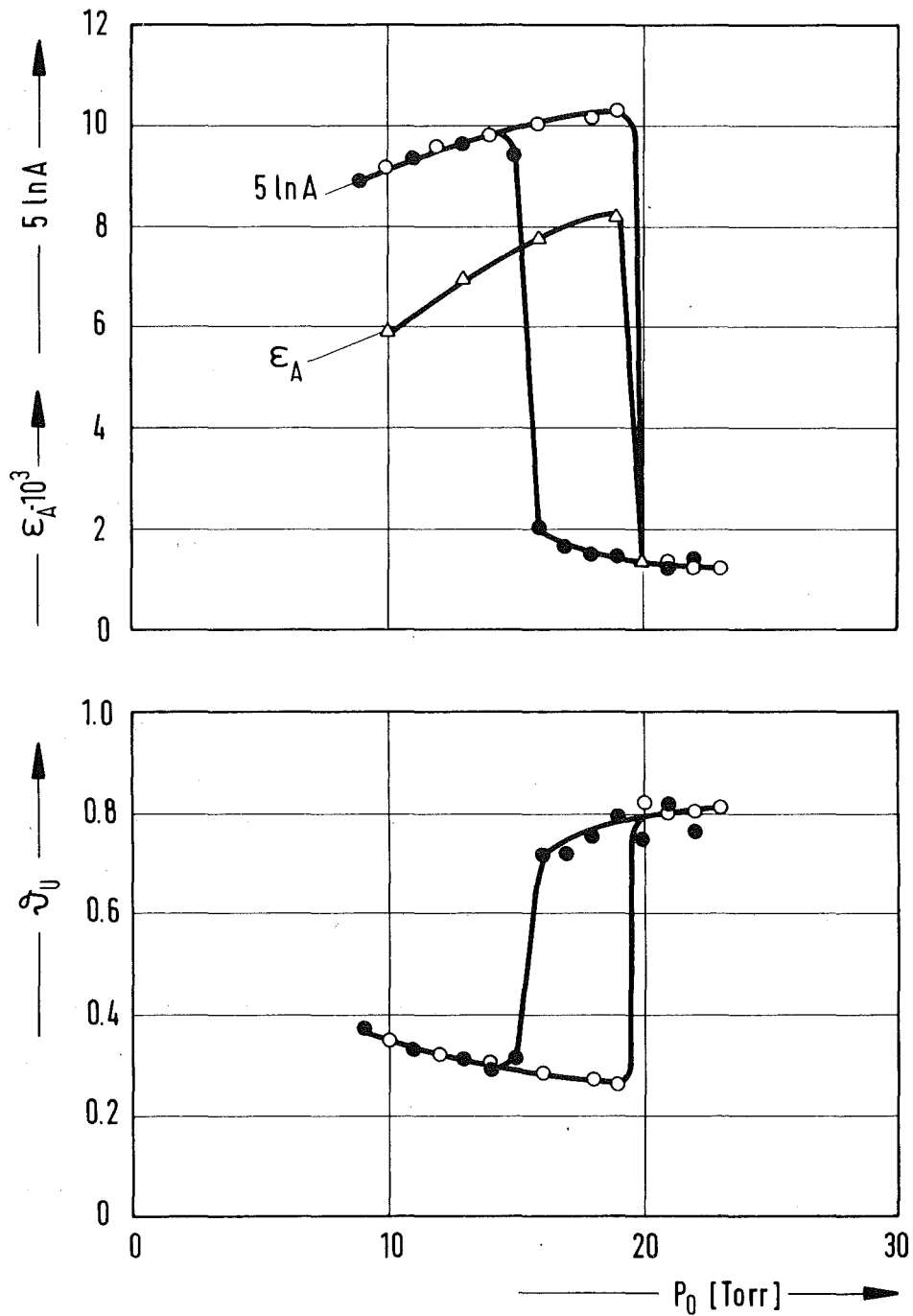


Abb.15: Abhängigkeit des Elementareffekts  $\epsilon_A$  der Isotopentrennung, der Gemischtrennung  $\ln A$  und des Uranabschälverhältnisses  $v_u$  vom Einlaßdruck  $p_0$  beim Umschlagen der Strömungskonfiguration. Die Kurven werden in Richtung zunehmenden Einlaßdrucks (leere Symbole) bzw. in Richtung abnehmenden Einlaßdrucks (gefüllte Symbole) durchlaufen. Betriebsbedingungen:  $n_0 = 5 \text{ Mol-\% UF}_6$ ,  $p_0/p_1 = 4$ .

der Gemischtrennung bei umso kleineren Expansionsverhältnissen und umso kleineren Einlaßdrücken einsetzt, je größer das Verhältnis von Düsenweite  $a^+$  zu Düsenabstand  $d_a$  ist. Das Verhältnis  $a^+/d_a$  bewegte sich bei den untersuchten Justierungen zwischen  $1/5$  und  $1/2$ .

Das hier beschriebene Verhalten beruht auf einer Änderung der Strömungskonfiguration: Anstelle einer spiegelsymmetrischen Umlenkung der gegeneinandergerichteten Strahlen bildet sich ein Strömungszustand aus, bei dem beide Strahlen unter einem flachen Winkel aufeinander abgleiten (vgl. Abb.16). Diese Änderung der Strömungskonfiguration konnte durch die in Abb.16 gezeigte Meßanordnung direkt

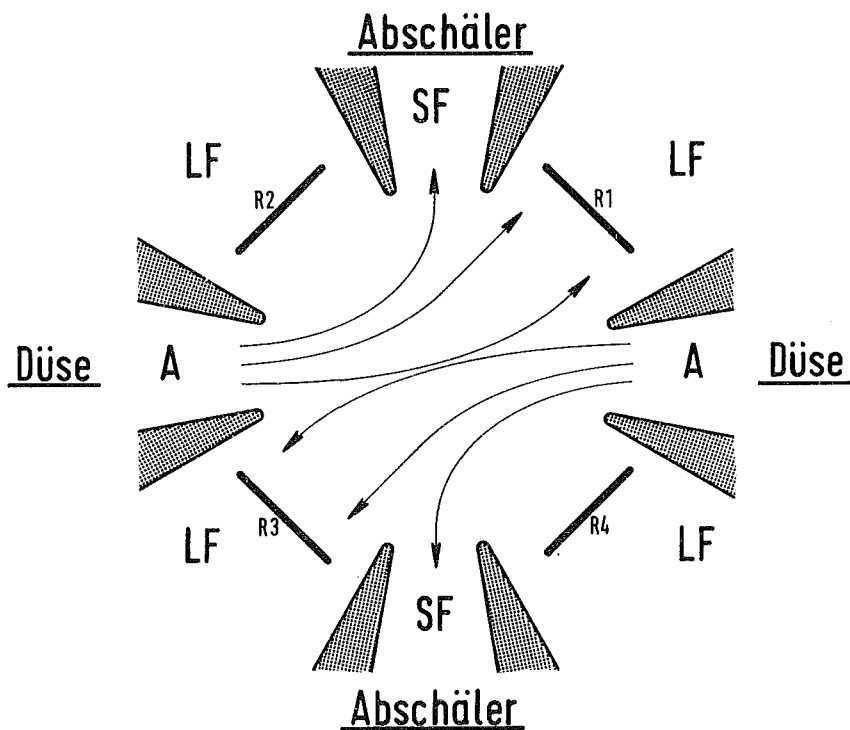


Abb.16: Schematische Darstellung der Meßanordnung zum Nachweis der Strömungskonfiguration mit flach aufeinander abgleitenden Gasstrahlen. Die Pfeile geben den qualitativen Verlauf der Stromlinien an. Die in den Absaugkanälen der leichten Fraktion angebrachten Hitzdrähte R sind in einer Wheatstone-Brücke zusammengeschaltet.

nachgewiesen werden. Hierbei sind in den Absaugkanälen der leichten Fraktion Hitzdrähte angebracht, die zu einer Wheatstone-Brücke zusammengeschaltet sind. Die Änderung des Hitzdrahtwiderstandes stellt ein Maß für den Gasstrom im entsprechenden Absaugkanal dar, so daß unterschiedliche Gasdurchsätze in den verschiedenen Absaugkanälen unmittelbar durch eine Verstimmung der Brücke nachgewiesen werden können.

Es zeigt sich, daß einander diagonal gegenüberliegende Hitzdrähte beim Überschreiten des kritischen Druckes eine Widerstandsänderung in jeweils gleicher Richtung erfahren. Hieraus folgt, daß auch die Gasströme in den einander diagonal gegenüberliegenden Kanälen annähernd gleich sind. Die Verstimmung der Brücke ist eindeutig mit dem Umschlagen der Strömung korreliert. Das Ergebnis einer solchen Messung zur Änderung der Strömungskonfiguration mit dem Einlaßdruck ist in Abb.17 aufgetragen.

Bei entsprechenden Experimenten mit einheitlichen Gasen ( $H_2$ ,  $N_2$  und  $UF_6$ ) sowie mit He/Ar-Gemischen mit 4 bzw. 12 Mol-% Ar wurde in sehr weiten Bereichen von Einlaßdruck und Expansionsverhältnis kein Umschlagen der Strömungskonfiguration beobachtet<sup>17)</sup>. Hieraus kann man schließen, daß die Strömungskonfiguration mit flach aufeinander abgleitenden Gasstrahlen mit der starken Trennung von  $H_2$  und  $UF_6$  nach dem Austritt des Gemischs aus den Düsenmündungen in ursächlichem Zusammenhang steht. Es ist unmittelbar anschaulich, daß das vom leichten Zusatzgas beschleunigte  $UF_6$  aufgrund seiner hohen Trägheit seine ursprüngliche Strömungsrichtung annähernd beibehält, d.h. die  $UF_6$ -Stromlinien laufen auch nach der Mündung der konvergenten Düse noch weiter strahlenförmig zusammen,

17) Der Reynolds-Zahl-Bereich, in dem mit  $H_2/UF_6$ -Gemischen das Umschlagen der Strömungskonfiguration auftrat, wurde bei allen Messungen erfaßt.

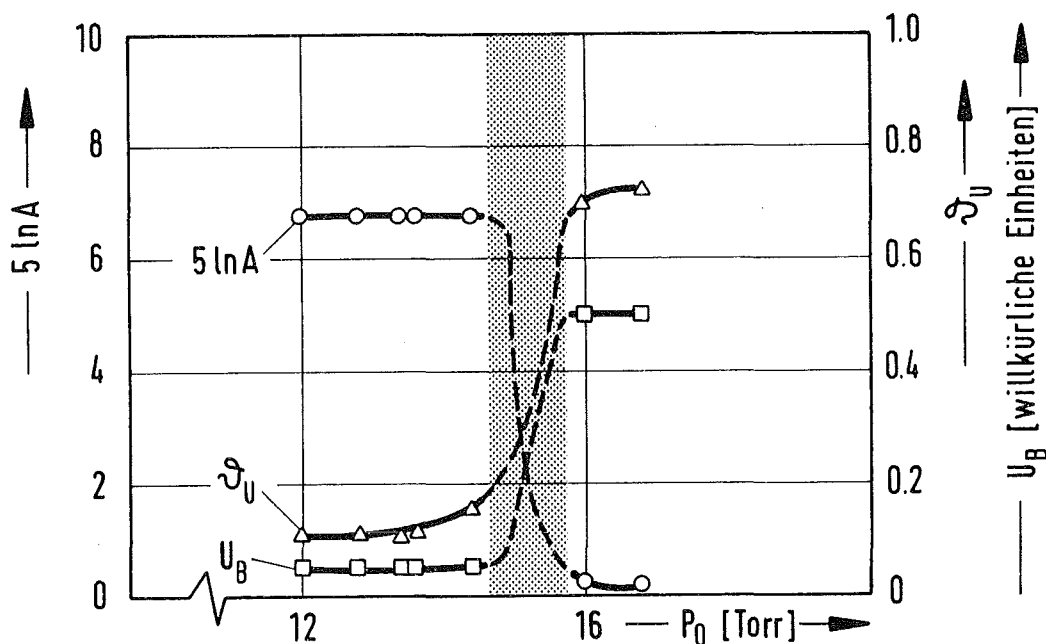


Abb.17: Nachweis der Strömungskonfiguration zweier flach aufeinander abgleitender Gasstrahlen (vgl. Abb.16). Im schraffierten Übergangsgebiet zwischen den beiden Strömungskonfigurationen können keine stabilen Werte für die Gemischtrennung  $5 \ln A$ , das Abschälverhältnis  $S_u$  und die Spannung  $U_B$  in der Brückendiagonale gemessen werden. Versuchsbedingungen:  $n_O = 5 \text{ Mol-\%}$ ,  $p_O/p_1 = 4$ .

so daß ein scharf gebündelter  $UF_6$ -Strahl erzeugt wird. Da eine solche Bündelung nur bei ausreichend großem Abstand der Düsenmündungen möglich ist, wird verständlich, daß auch eine Verkleinerung des Verhältnisses von Düsenabstand zu Düsenweite die Ausbildung der Strömungskonfiguration mit flach aufeinander abgleitenden Gasstrahlen erschwert bzw. sogar verhindern kann.



Literaturverzeichnis

- /1/ E.W. Becker, K. Bier, R. Schütte und D. Seidel, Angew. Chemie, Intern. Edit. 6, 507 (1967)
- /2/ E.W. Becker, Das Trenndüsenverfahren zur Anreicherung von U-235, Schriftenreihe des Deutschen Atomforums, Heft 20 (1974)
- /3/ E.W. Becker, W. Bien, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte und D. Seidel, KFK-Bericht 2067, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe (1974)
- /4/ E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld und G. Eisenbeiß, Z. Naturforsch. 26a, 1377 (1971)
- /5/ P. Bley und W. Ehrfeld, KFK-Bericht 1562, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe (1972)
- /6/ K. Bier, H. Brandtstädter, U. Ehrfeld und W. Ehrfeld, KFK-Bericht 1440, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe (1971)
- /7/ P. Bley, R. Dürr, W. Ehrfeld und G. Eisenbeiß, Z. Naturforsch. 28a, 1273 (1973)
- /8/ E.W. Becker, DBP 1 096 875 (1961)
- /9/ E.W. Becker, W. Bier, P. Bley, U. Ehrfeld, W. Ehrfeld und G. Eisenbeiß, Atomwirtschaft 18, 524 (1973)
- /10/ F.M. Jäger, Dissertation, Karlsruhe (1975)
- /11/ P. Bley, W. Ehrfeld, F.M. Jäger und U. Knapp, KFK-Bericht 2092, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe (1975)
- /12/ K. Cohen, Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of U-235, Mc Graw Hill, New York (1951)
- /13/ W. Ehrfeld und F.M. Jäger, interner Bericht des Instituts für Kernverfahrenstechnik KVT 49/31 (1974)
- /14/ W. Bier, G. Eisenbeiß und G. Heeschen, Z. Naturforsch. 28a, 1267 (1973)