

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

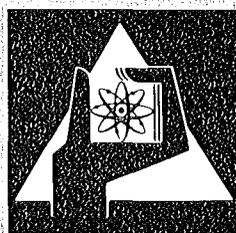
März 1975

KFK 2092

Institut für Kernverfahrenstechnik

**Entwicklung und Erprobung einer Versuchsapparatur
für die Optimierung von Trenndüsen-Systemen zur
Anreicherung von Uran-235**

P. Bley, W. Ehrfeld, F.M. Jäger, 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 2092

Institut für Kernverfahrenstechnik

ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG EINER VERSUCHSAPPARATUR
FÜR DIE OPTIMIERUNG VON TRENNDÜSENSYSTEMEN ZUR AN-
REICHERUNG VON URAN-235

von

P. Bley, W. Ehrfeld, F.M. Jäger⁺⁾ , U. Knapp

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe

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

Zusammenfassung

Die Optimierung von Trenndüsen-Systemen zur Anreicherung von Uran-235 erfordert ausgedehnte systematische Trennversuche mit UF_6 , da eine quantitative theoretische Erfassung der gekoppelten Strömungs- und Diffusionsvorgänge in der Trenndüse gegenwärtig kaum möglich ist. In diesem Bericht wird eine Trennapparatur beschrieben, die es gestattet, das umfangreiche Versuchsprogramm mit erträglichem Zeitaufwand abzuwickeln. Die Trennapparatur besitzt gegenüber den bisher verwendeten Versuchsanordnungen insbesondere den Vorteil, daß das Uranabschälverhältnis der Trenndüsen kontinuierlich registriert und auf vorgegebene Werte einreguliert werden kann. Hierbei werden Trenndüsen-Systeme verwendet, deren Geometrie während des Versuchsbetriebs verändert werden kann. Dadurch lassen sich Versuche bei Abschälverhältnissen, die für eine Kaskadenschaltung von Trenndüsen nicht infrage kommen, grundsätzlich vermeiden. Die Trennapparatur ist über ein automatisches Probenentnahmesystem direkt mit einem Massenspektrometer zur Uranisotopenanalyse verbunden. Alle an der Apparatur anfallenden Meßwerte werden mit einer Meßwertfassungsanlage registriert und anschließend mit einem Großrechner weiterverarbeitet. Bei der Versuchsauswertung werden die spezifischen Trennarbeitskosten berechnet, die sich für eine industrielle Trenndüsenanlage bei entsprechenden Betriebsbedingungen ergeben würden. Die Ergebnisse dieser Kostenanalyse bestimmen unmittelbar das weitere Versuchsprogramm bei der Optimierung eines Trenndüsen-Systems.

Development and Test of an Equipment for Optimization of Separation Nozzle Systems for the Enrichment of Uranium 235

Summary

The optimization of separation nozzle systems must be conducted on the basis of extensive separation experiments with UF_6 , since the coupled flow and diffusion phenomena in the separation nozzle can be assessed theoretically only in a qualitative way. In this report a new equipment for separation experiments is described which allows to run the comprehensive test program within a reasonable period of time. Compared to test assemblies used so far the new equipment offers the advantage that the cut of the separation nozzle is recorded continuously. By using nozzles with variable geometry the cut, which changes markedly in a fixed separation nozzle when the operating conditions are varied, can be adjusted to any given value. By that means experiments, in which the cut does not assume the value required by the cascade circuit, can be avoided and the number of optimization experiments can be reduced considerably. For uranium isotope analysis the separation equipment is connected to a mass spectrometer via an automatic sampling system. All the data produced by the equipment are evaluated in computer programs immediately after the experiment and analysed in the light of economic aspects of industrial-scale separation nozzle plants. The results of this analysis are used to set the conditions for the further experiments in finding the optimum operating conditions of a separation nozzle system.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Die Trennapparatur	4
2.1 Prinzip der Versuchsanordnung	4
2.2 Ausführung der mechanischen Anlagenteile	6
2.3 Trennelement mit einstellbarer Düsen- und Abschälerweite	12
2.4 Instrumentierung und Meßwerterfassung	15
3. Versuchsstrategie bei der Optimierung von Trenndüsen-Systemen	19
3.1 Versuchsablauf	19
3.2 Bewertung der Versuchsergebnisse	20
3.3 Darstellung der Ergebnisse	26
3.4 Eingrenzung des Variationsbereichs der Versuchsparameter	28
4. Optimierung des Uranabschälverhältnisses	31
5. Diskussion	35

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.

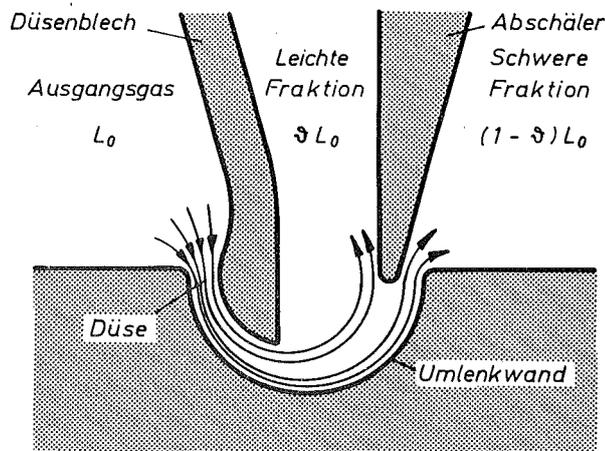


Abb. 1: Schnitt durch eine schlitzförmige Trenndüse mit schematischer Darstellung der Stromlinien

Die bisher günstigsten Ergebnisse für die praktische Anwendung des Trenndüsenverfahrens wurden mit der in Abb. 1 dargestellten Trenndüsenanordnung erzielt. Ein bandförmiger Strahl aus einem H_2/UF_6 -Gemisch strömt aufgrund eines Druckgefälles durch eine schlitzförmige Düse und wird an einer gekrümmten Wand umgelenkt. Am Ende der Umlenkung wird der Gasstrom L_0 von einem Abschäler in zwei Fraktionen $\delta \cdot L_0$ und $(1-\delta) \cdot L_0$ zerlegt. Das schwere Uranisotop

ist in der nahe der Umlenk wand strömenden Fraktion $(1-\mathcal{S}) \cdot L_0$ angereichert, während das leichte Isotop bevorzugt in der Fraktion $\mathcal{S} \cdot L_0$ zu finden ist. Durch das leichte Zusatzgas wird die Isotopentrennung stark verbessert, da die Strömungsgeschwindigkeit erhöht und der Ausbildung steiler Konzentrationsgradienten der Isotope entgegengewirkt wird /3/.

Nachdem bereits früher wichtige Fragen der Kaskadenschaltung von Trenndüsen an einer 10-stufigen Pilot-Anlage geklärt werden konnten /4/, wurde neuerdings durch die erfolgreiche Erprobung zweier Prototyp-Trennstufen die Eignung des Trenndüsenverfahrens für die großtechnische Anreicherung von Uran 235 demonstriert /5/. Wirtschaftlichkeitsrechnungen, die auf dem gegenwärtigen Stand der technischen und physikalischen Entwicklung des Trenndüsenverfahrens basieren, führen bereits zu Trennarbeitskosten, die mit denen der konkurrierenden Anreicherungsverfahren vergleichbar sind /5/.

Für eine weitere Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Trenndüsenverfahrens ist eine Optimierung der Trenndüsenanordnung, die den gegenwärtigen technischen Entwicklungsarbeiten zugrundeliegt, von zentraler Bedeutung. Die Optimierung muß im wesentlichen auf der Grundlage systematischer Trennversuche mit UF_6 erfolgen, da eine quantitative theoretische Erfassung der gekoppelten Strömungs- und Diffusionsvorgänge in der Trenndüse gegenwärtig kaum möglich ist /3/ /6/. Direkt für die Optimierung verwertbar sind nur die Ergebnisse solcher Trennversuche, bei denen das Uranabschälverhältnis \mathcal{S}_u der Trenndüse einen für die Kaskadenschaltung einer Trenndüsenanlage zulässigen Wert annimmt¹⁾. Um die Zahl der Trennversuche bei den einzelnen

1) Das Uranabschälverhältnis \mathcal{S}_u ist als Verhältnis des Uranstroms in der leichten Fraktion zum gesamten Uranstrom im Trennelement definiert. Bei Kaskadenschaltungen erfolgt die Aufteilung des gesamten Uranstroms im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen.

Optimierungsschritten möglichst klein zu halten, müssen die Versuchsergebnisse nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet und unmittelbar bei der Auswahl der nachfolgenden Versuchsbedingungen berücksichtigt werden.

Die bisher verwendeten Trennapparaturen sind für solche systematischen Untersuchungen nur bedingt geeignet, da das Uran-Abschälverhältnis, das sich bei einer Variation der Betriebsbedingungen im allgemeinen stark ändert, erst nach Beendigung des Trennversuchs bestimmt werden kann²⁾. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb eine Trennapparatur entwickelt, bei der das Uran-Abschälverhältnis durch kontinuierliche Messungen der UF_6 -Konzentrationen in den einzelnen Fraktionen während des Trennversuchs ermittelt wird. Durch die Verwendung eines Trenndüsen-systems, bei dem die Position des Abschälers in der Trenndüse während des Betriebs der Apparatur verändert werden kann, ist eine Einregulierung des Uran-Abschälverhältnisses auf jeden vorgegebenen Wert möglich. Die Trennapparatur ist direkt mit einem Massenspektrometer verbunden, um die für die Isotopenanalyse erforderliche Meßzeit möglichst kurz zu halten. Die Versuchsdaten werden mit einer Meßwerterfassungsanlage registriert und unmittelbar nach Abschluß einer Versuchsreihe am Rechner ausgewertet.

Zur Bewertung der Versuchsergebnisse werden spezifische Aufwandsgrößen verwendet, die den technischen Gegebenheiten einer Trenndüsenanlage weitgehend Rechnung tragen.

2) Das Uran-Abschälverhältnis wird bei den bisher verwendeten Trennapparaturen durch Auswiegen der UF_6 -Anteile in leichter und schwerer Fraktion bestimmt. Die UF_6 -Anteile werden dazu auf Kühlfallen gesammelt und anschließend in Wägepipetten umgefroren (vgl. hierzu /7/).

Dabei werden u.a. die Abhängigkeit des Verdichterwirkungsgrades vom Kompressionsverhältnis und der Einfluß der kleinsten charakteristischen Abmessung der Trenndüse auf den Betriebsdruck einer Anlage berücksichtigt. Der für die praktische Anwendung des Trenndüsenverfahrens interessierende Variationsbereich der Betriebsparameter kann mit einer auf diesen Aufwandsgrößen basierenden Kostenfunktion eingegrenzt werden.

Durch die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Optimierungsversuche konnte eine Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs des Trenndüsenverfahrens von etwa 30 % bei gleichzeitiger Absenkung der Trennarbeitskosten um etwa 20 % erzielt werden.

2. Die Trennapparatur

2.1 Prinzip der Versuchsanordnung

Das Funktionsprinzip der Trennapparatur geht aus dem in Abb. 2 dargestellten Blockschaltbild hervor: Die obere Bildhälfte zeigt ein stark vereinfachtes Fließschema des mechanischen Teils der Apparatur; auf der unteren Bildhälfte sind die Einheiten für die Meßwertverarbeitung und die Meßwerterfassung sowie das Massenspektrometer mit den Vorrichtungen für die Probenentnahme dargestellt.

Bei den Trennversuchen wird das Ausgangsgas aus einem Vorratsbehälter über ein Regelventil der Trennelementkammer zugeführt und durch die Trenndüse in leichte und schwere Fraktion aufgeteilt. Die Düsenweite und Abschälerweite können ohne Öffnen der Trennelementkammer von außen eingestellt werden. Stromabwärts von den Regelventilen für die Absaugdrücke p_1 und p_s von leichter und schwerer Fraktion werden bei Fraktionen wieder zusammengeführt. Das Gasgemisch wird mit einem UF_6 -beständigen Verdichter vor-

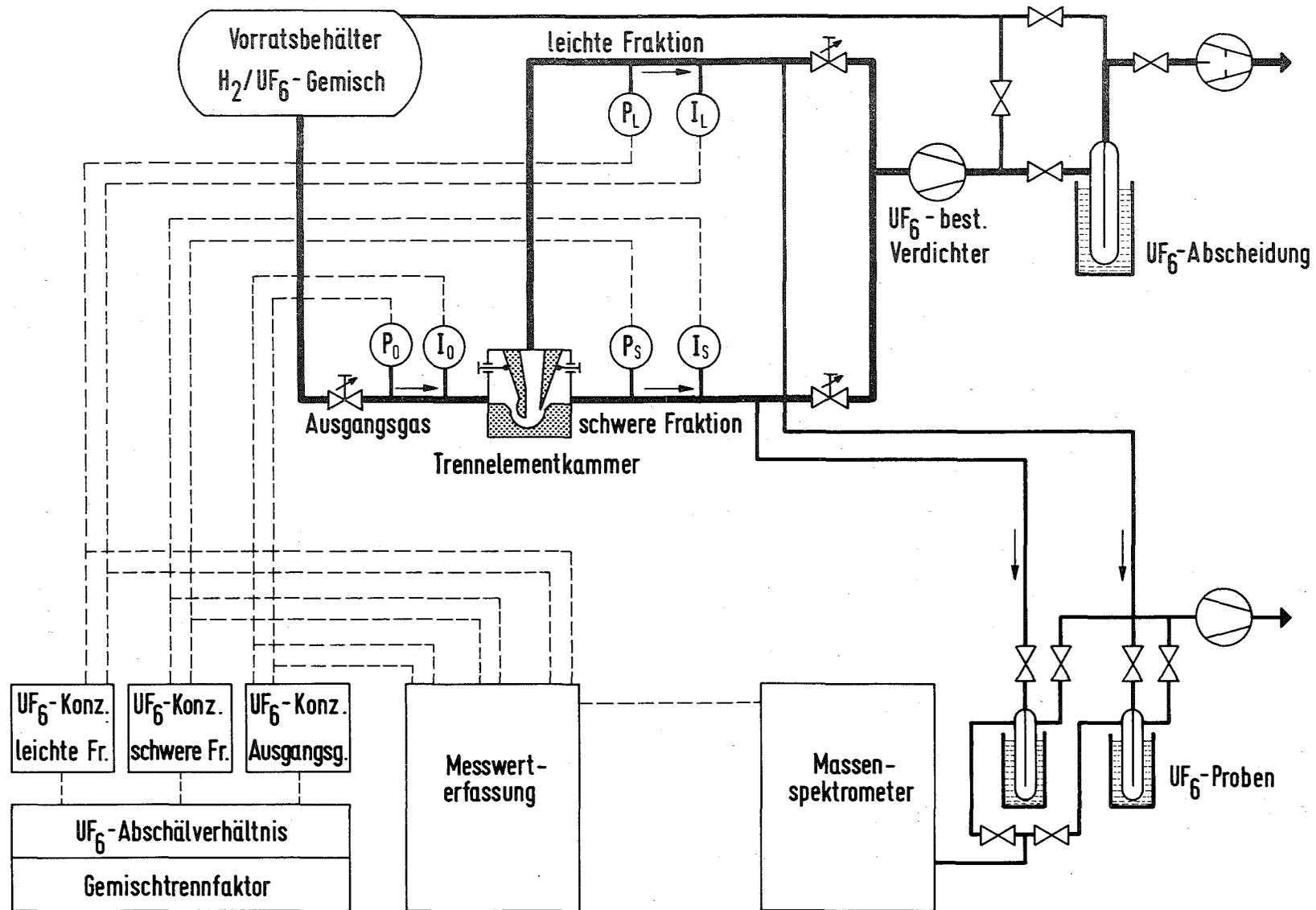


Abb. 2: Blockschaltbild der Trennapparatur

komprimiert, das UF_6 wird in Tiefkühlfallen abgeschieden, und das Zusatzgas wird mit einer Drehschieberpumpe nach außen abgepumpt.

Im Ausgangsgas sowie in leichter und schwerer Fraktion werden zum einen die Drücke p und zum andern mit Ionisationsdetektoren die vom Druck und der Gaszusammensetzung abhängigen Ionenströme I gemessen. Diese Meßgrößen werden in Analog-Rechenstufen unmittelbar weiterverarbeitet, welche dann die UF_6 -Konzentrationen in den einzelnen Gasströmen sowie das UF_6 -Abschälverhältnis und den Gemischtrennfaktor liefern. Diese Größen können bei der Versuchseinstellung direkt abgelesen werden. Die hier beschriebene Versuchstechnik ermöglicht es also, das UF_6 -Abschälverhältnis durch eine Änderung der Abschälerweite oder durch eine Änderung der Betriebsdrücke auf einen vorgegebenen Wert einzuregulieren. Nach der Einstellung des UF_6 -Abschälverhältnisses werden aus leichter und schwerer Fraktion UF_6 -Proben für die Isotopenanalyse am direkt angeschlossenen Massenspektrometer entnommen, und es wird der Elementareffekt der Isotopentrennung ermittelt.

Alle an der Apparatur anfallenden Meßwerte werden durch eine Meßwerterfassungsanlage auf einem Lochstreifen registriert. Die Daten werden über ein Terminal einer Großrechenanlage zugeführt und weiterverarbeitet.

2.2 Ausführung der mechanischen Anlagenteile

Ein ausführliches Fließschema des mechanischen Teils der Trennapparatur³⁾ ist in Abb. 3 dargestellt. Dabei sind die Leitungen, welche bei Trennversuchen an dem in Abb. 1

3) Die mechanischen Anlagenteile der Trennapparatur wurden von der Fa. Leybold-Heraeus, Hanau, hergestellt.

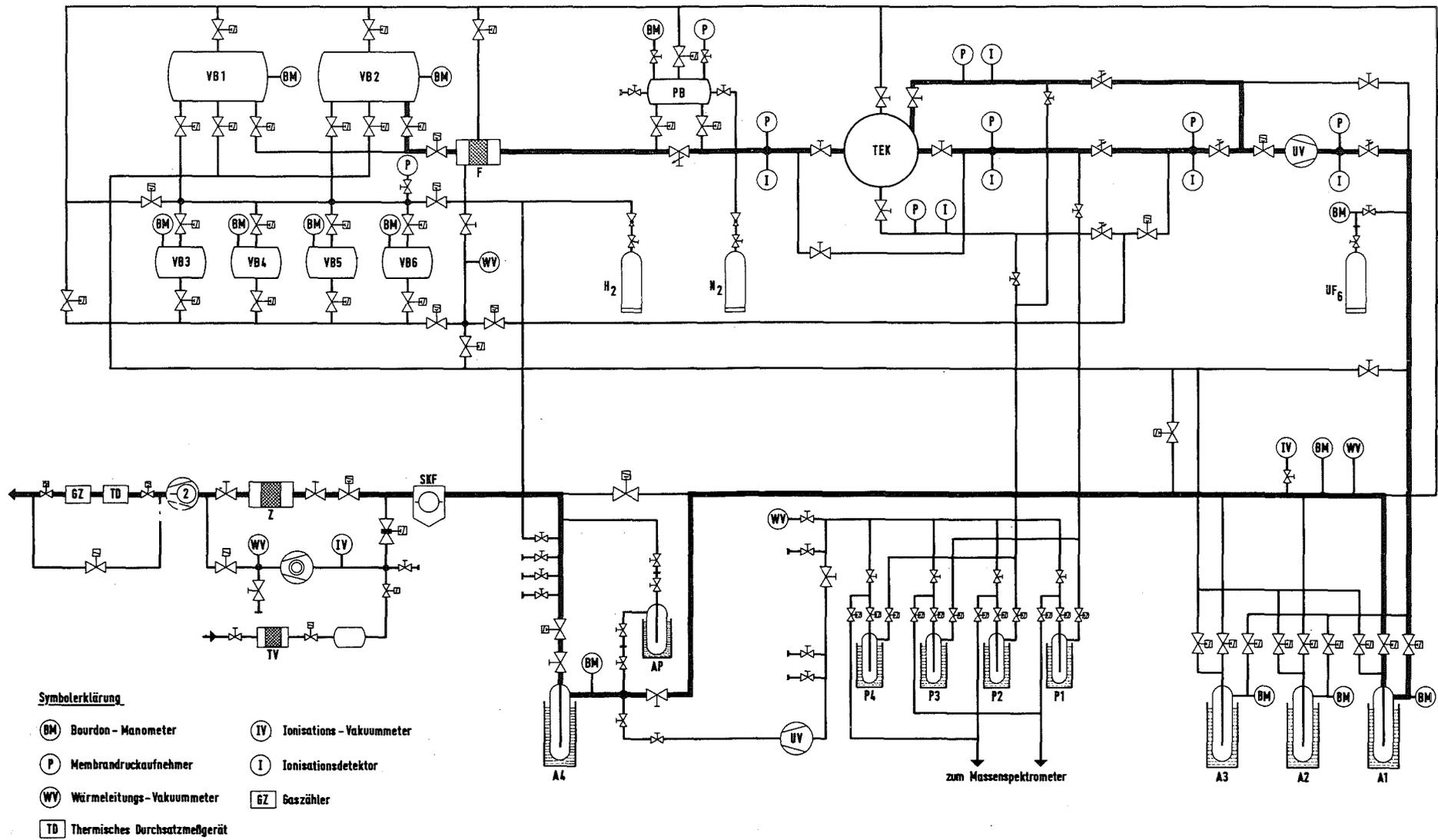


Abb. 3: Fließschema des mechanischen Teils der Trennapparatur

dargestellten Trenndüsensystem normalerweise verwendet werden, durch eine größere Strichstärke hervorgehoben.

Zur Speicherung verschiedener Ausgangsgasgemische stehen sechs Vorratsbehälter, zwei große mit einem Volumen von ca. $1,5 \text{ m}^3$ (VB1 und VB2) und vier kleine mit einem Volumen von ca. $0,1 \text{ m}^3$ (VB3 bis VB6) zur Verfügung. Das aus einem Vorratsbehälter strömende Gas wird durch einen Sintermetall-Filter (F) geleitet, in dem eventuell vorhandene staubförmige Verunreinigungen zurückgehalten werden. Zur Kontrolle der bei den Trennversuchen verwendeten Konzentrationsmeßgeräte ist an die Ausgangsgasleitung (Leitung I) ein Probenbehälter zur Entnahme von Gasproben angeschlossen, an dem zusätzlich Ventile zum Einlassen von Eichgasen angebracht sind⁴⁾. Je ein Regelventil in der Ausgangsgasleitung und den beiden Absaugleitungen (Leitung II und III) dient zur Einregulierung der Betriebsdrücke an dem in der Trennelementkammer (TEK) eingebauten Trenndüsensystem. Die Trennelementkammer läßt sich durch direkt angeflanschte Ventile von den übrigen Leitungen abtrennen, damit beim Ausbau eines Trennelements die daran angrenzenden Leitungen und insbesondere die Meßgeräte nicht belüftet werden. Stromabwärts von den Regelventilen für leichte und schwere Fraktion werden die Absaugleitungen (II und III) zusammengeführt und das Gasgemisch wird von einem UF_6 -beständigen Verdichter (UV)⁵⁾ angesaugt. Zur Abscheidung des UF_6 aus dem vom Verdichter vorkomprimierten

4) Die UF_6 -Konzentration des Verfahrensgases im Probenbehälter⁶ kann beispielsweise durch Ausfrieren und anschließendes Wiegen des UF_6 bestimmt werden.

5) Typ TC 10 der Fa. SRTI, 78-Buc, Frankreich. Der Verdichter besitzt ein maximales Saugvermögen von $80 \text{ m}^3/\text{h}$ und erreicht ein Kompressionsverhältnis von 10 bei einem Ansaugdruck von 1 Torr. Der Schöpfraum des Verdichters ist durch einen Metallfaltenbalg gegen den Antriebsraum hermetisch abgedichtet. Das Verfahrensgas wird durch einen berührungsfrei laufenden Verdrängerkolben gefördert.

Gasstrom sind drei parallelgeschaltete Tiefkühlfallen (A1 bis A3) vorgesehen. Diese sind als Ringspaltwärmeaustauscher ausgeführt, deren Ringraum zur Vergrößerung der wirksamen Oberfläche mit Maschendrahröllchen (Dixon) gefüllt ist. Die Kühlung erfolgt mit einem Kältebad aus flüssigem Stickstoff, der in ein den Wärmetauscher umgebendes Dewar-Gefäß eingelassen wird. Eine vierte Tiefkühlfalle (A4) ist zwischen den mit UF_6 beaufschlagten Anlagenteil und den Vakuumpumpstand geschaltet, um ein Eindringen von UF_6 in die Vakuumpumpen mit Sicherheit auszuschließen. Das Zusatzgas wird mit einer ölgedichteten zweistufigen Drehschieberpumpe mit einem Saugvermögen von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ abgepumpt. Eine Schutzkühlfalle (SKF), welche mit einer automatischen Versorgung für flüssigen Stickstoff versehen ist, verhindert das Rückdiffundieren von Öldämpfen in den Verfahrenskreislauf. Um ein Auskondensieren größerer Öldampfmengen auf der Schutzkühlfalle auszuschließen, ist zwischen der Drehschieberpumpe und der Schutzkühlfalle eine Zeolithfalle (Z) eingebaut. Zum Evakuieren der Trennapparatur bis zu Drücken von ca. 10^{-6} Torr ist eine Turbomolekularpumpe mit einem Saugvermögen von 250 l/sec vorhanden.

Die Trennapparatur kann außerdem auch zum Test fortgeschrittener Trenndüsensysteme /2/ eingesetzt werden, bei denen mehr als ein Ausgangsgasstrom einem Trenndüsensystem zugeführt wird oder eine Aufteilung in mehr als zwei Fraktionen erfolgt. Für solche Untersuchungen ist eine zusätzliche Leitung IV an der Trennelementkammer angeschlossen, die entweder mit der Absaugleitung II oder mit den kleinen Vorratsbehältern verbunden werden kann.

Zur Bestimmung der Isotopenverhältnisse in den einzelnen Fraktionen wird je ein Teilstrom mit einer Probenentnahmevorrichtung abgezogen. Hierbei wird das Gemisch durch mit flüssigem Stickstoff gekühlte Pipetten (P1 bis P4) geleitet, wobei das UF_6 ausgefroren und das Zusatzgas mit einem

UF₆-beständigen Verdichter (UV)⁶⁾ abgepumpt wird. Nach der Probenentnahme werden die Pipetten über einen aufgelöteten Heizleiter nach einem vorgegebenen Steuer-Programm zunächst automatisch auf eine Temperatur von ca. -40°C gebracht, wobei durch Abpumpen das UF₆ von gasförmigen Verunreinigungen befreit wird. Im Anschluß an diesen Reinigungsvorgang werden die Pipetten auf Zimmertemperatur erwärmt. Das UF₆ wird dann in das direkt angeschlossene Massenspektrometer⁷⁾ eingelassen. Nach der Isotopenanalyse werden die Pipetten bei einer Temperatur von ca. 100°C ausgeheizt und evakuiert. Die vom UF₆-Verdichter geförderten Gase werden über die Tiefkühlfalle (A4), in der alle korrosiven Gaskomponenten ausgefroren werden, abgepumpt. Die Probenentnahmevorrichtung ist mit je zwei Pipettenpaaren für leichte und schwere Fraktion ausgerüstet, so daß bereits während der Analyse der im einen Pipettenpaar enthaltenen Proben am Massenspektrometer neue Proben in das andere Pipettenpaar gezogen werden können.

Zum Ansetzen eines neuen Verfahrensgasgemisches in einem der Vorratsbehälter kann ohne Unterbrechung des Versuchsbetriebs UF₆ über die Leitung V aus einer nicht eingekühlten Tiefkühlfalle (A1, A2 oder A3) zurückgespeist werden, so daß das UF₆ nie den Verfahrenskreislauf verläßt. Ist eine Reinigung des UF₆ vor dem Ansetzen eines neuen Gemisches notwendig, so wird die entsprechende Tiefkühlfalle mit Eiswasser eingekühlt, und die gasförmigen Verunreini-

6) Prototyp der Fa. Normetex S.A., 27 Pont-Audemer, Frankreich. Der Verdichter besitzt ein maximales Saugvermögen von 10 m³/h und erreicht ein Endvakuum von ca. 5·10⁻³ Torr bei den im Versuchsbetrieb üblichen Gegendrücken von maximal 5-10 Torr. Der Schöpfraum des Verdichters ist durch einen Metallfaltenbalg hermetisch gegen den Antriebsraum abgedichtet. Das Verfahrensgas wird durch zwei berührungsfrei ineinanderlaufende Spiralen komprimiert.

7) Typ UF5 der Fa. Varian MAT, Bremen.

gungen werden durch Abpumpen weitgehend entfernt⁸⁾. Diese kondensieren in der Tiefkühlfalle (A4) aus, die von Zeit zu Zeit über eine von der Apparatur abflanschbare Abfallpipette (AP) entleert werden kann. Das Zusatzgas wird über eine Druckgasflasche in die Vorratsbehälter eingespeist, und die gewünschte Gemischkonzentration wird über die Messung des Behälterdruckes eingestellt.

Die mechanischen Anlagenteile der Trennapparatur sind aus den in der UF_6 -Technologie üblichen Werkstoffen gefertigt. Die Vorrats-Behälter bestehen aus AlMg3, alle übrigen Behälter und Rohrleitungen aus den Edelstählen 1.4571 oder 1.4541, die Federbälge aus 1.4404, die Flansche aus 1.4429. Um eine möglichst glatte Oberfläche aller medienberührten Teile zu erhalten, wurden alle Rohrleitungen und Edelstahlbehälter elektrolytisch poliert. Die Verrohrung, die Nennweiten von NW 16 bis NW 150 aufweist, ist weitgehend mit einem einheitlichen Flanschsystem ausgerüstet, welches aus Edelstahlflanschen mit Schneidendichtung auf Kupferflachring (Conflat-Flansch) besteht. Alle Vorratsbehälter sind mit Klammerflanschen der Nennweite 400 versehen und mit Doppel-O-Ring-Dichtungen⁹⁾ aus dem Werkstoff Butyl 609 mit einvulkanisiertem Distanzring gedichtet. Alle Ventile haben eine Faltenbalgabdichtung der Ventilspindel. Als Dichtungswerkstoff für den Ventilsitz wird PTFE verwendet¹⁰⁾. Alle Anlagenteile weisen eine extrem niedrige Leckrate von $<10^{-9}$ Torr l/sec auf. Die Apparatur besitzt eine Gesamtleckrate von ca. 10^{-6} Torr l/sec.

8) Der Reinheitsgrad des UF_6 ist dann ausreichend, wenn auch über längere Zeit der Druck in der mit Eiswasser eingekühlten Tiefkühlfalle nicht nennenswert über den Dampfdruck des UF_6 bei $0^\circ C$ von $p = 18$ Torr ansteigt.

9) DTO Dichtung der Fa. Le Joint Francaise, 95 Bezons, Frankreich.

10) Ursprünglich waren alle Ventile im Sitz mit Vitondichtungen ausgerüstet, die sich jedoch im Langzeitbetrieb als nicht funktionstüchtig erwiesen.

2.3 Trennelement mit einstellbarer Düsen- und Abschälerweite

Abb. 4 zeigt den hier verwendeten Trennelementeinsatz mit verstellbarer Düsen- und Abschälerweite. Dieser Trennelementeinsatz besteht aus einer gabelförmigen Halterung, welche die drei wichtigen Grundelemente des Trenndüsen-systems enthält. Auf dem mittleren Steg ist die Umlenkrolle eingeschliffen, an den beiden äußeren Stegen sind das Düsenblech und der Abschäler befestigt. Die beiden äußeren Stege sind über je zwei Federn elastisch gehalten und können durch Druck auf die oberen freien Enden infolge einer Verformung im Bereich der Biege-zonen B zur Einstellung der Düsen- bzw. Abschälerweite bewegt werden.

Die gabelförmige Halterung wurde mit einer numerisch gesteuerten Funkenerosionsmaschine aus einer 10 mm starken, beidseitig geschliffenen Edelstahlplatte (1.4112) herausgearbeitet. Die Umlenkrolle wurde anschließend mit einer Profilschleifmaschine eingeschliffen. An derselben Maschine wurden auch das Düsen- und Abschälerblech hergestellt.

Die Trennelementkammer ist zusammen mit dem Trennelementeinsatz und den Vorrichtungen zur Düsenverstellung in Abb. 5 dargestellt. Der Trennelementeinsatz (1) ist in einer Trägerplatte (2) montiert, welche im Innern der Kammer zentriert gehalten ist. Zur Abdichtung der Stirnflächen des Trenndüsen-systems werden Metallplatten mit Vitonauf-lage (3) und (4) verwendet, die zum Verstellen von Düsen- und Abschälerweite über faltenbalggedichtete Spindelantriebe (5) und (6) abgehoben werden können. Die Verstellvorrichtungen für das Düsenblech und den Abschäler bestehen im wesentlichen je aus einer Schubstange (7), die über eine Balgabdichtung (8) aus der Kammer herausgeführt und durch eine mit Feingewinde versehene Stell-schraube (9) horizontal verschoben werden kann. An einer Feinmeßuhr (10) (Unterteilung in 1/1000 mm) kann dann die

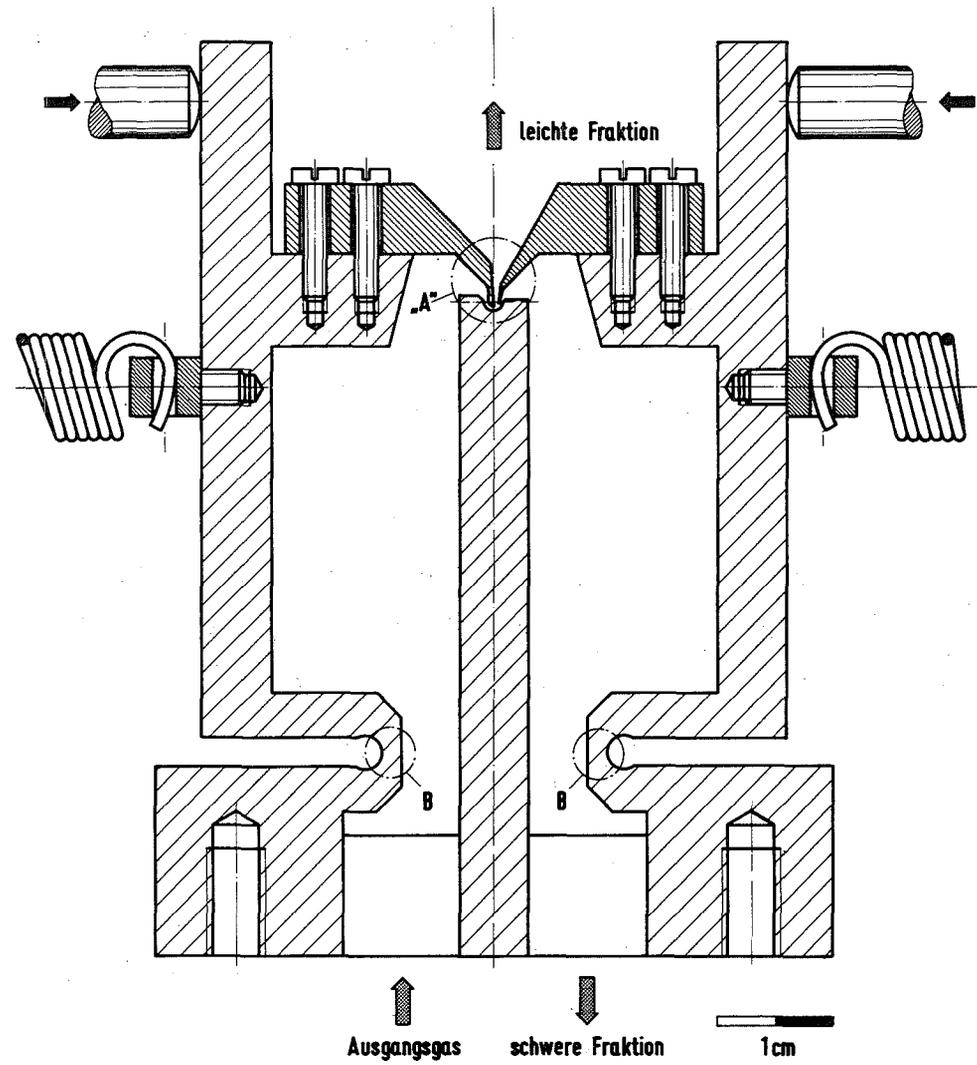
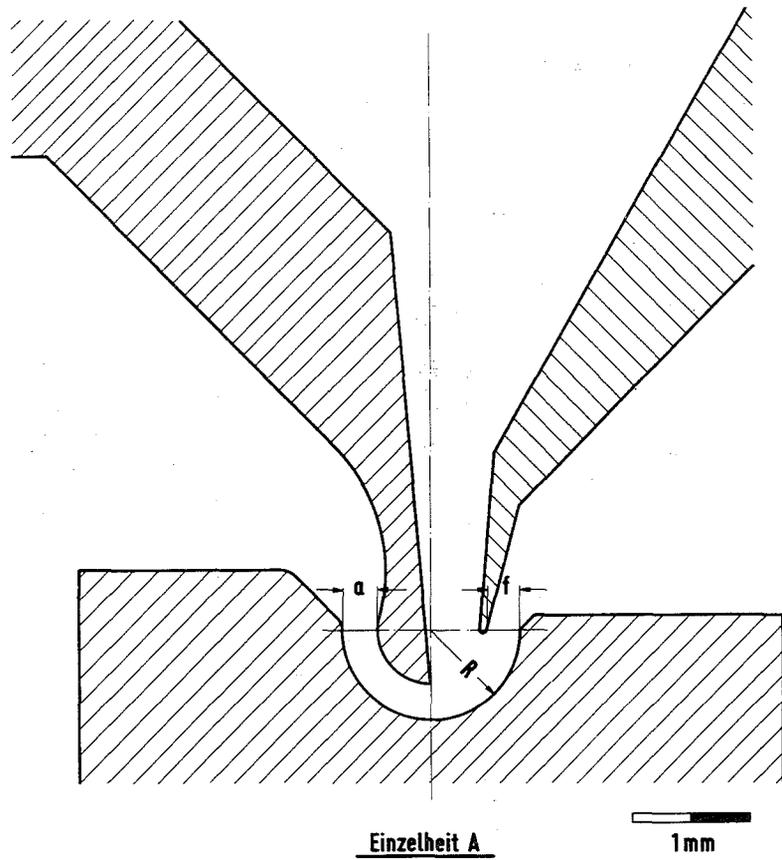


Abb. 4: Trennelementeinsatz mit variabler Düsen- und Abschälerweite

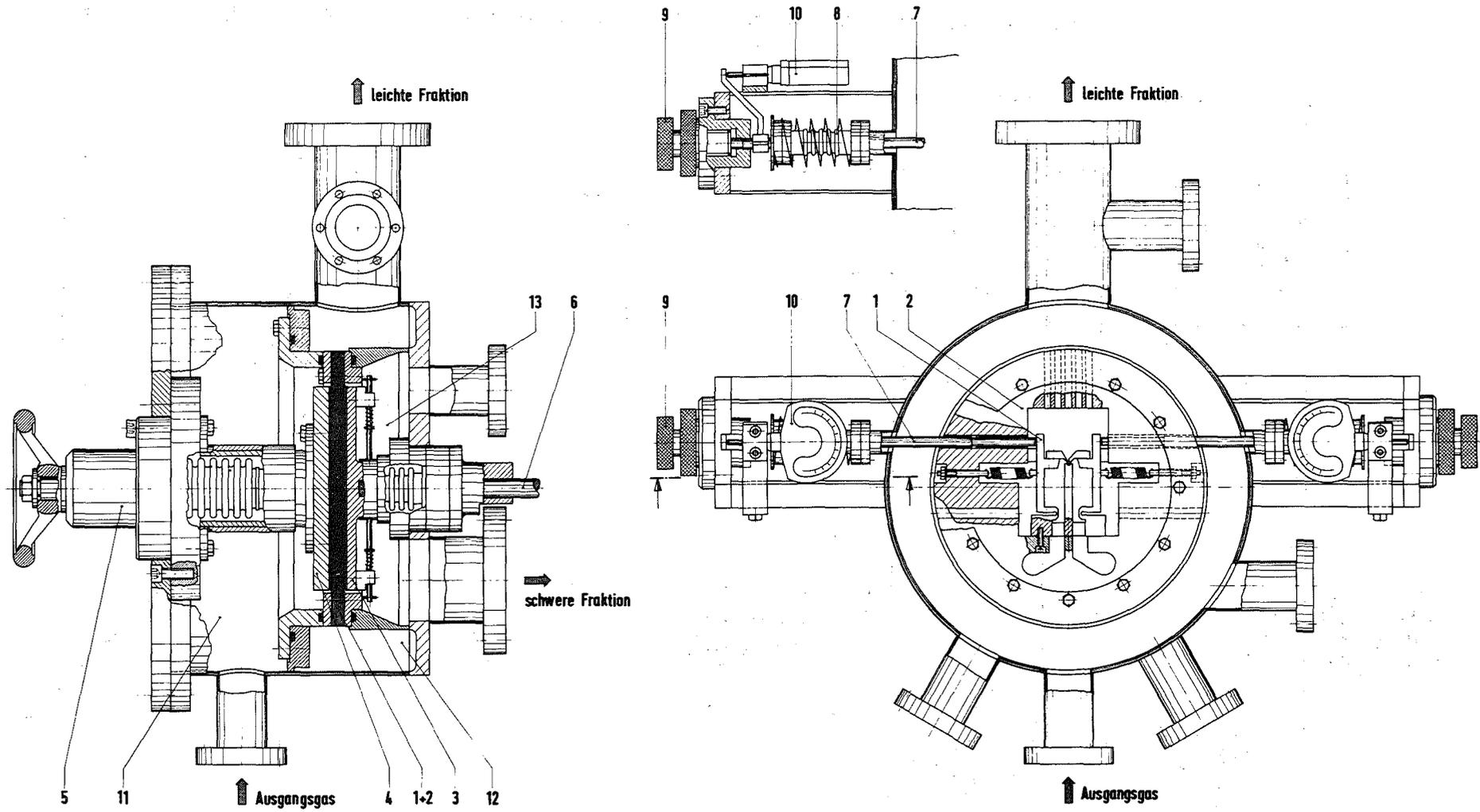


Abb. 5: Trennelementkammer mit verstellbarem Trenndüsensystem

jeweilige Verschiebung abgelsen werden. Die Parallelität von Düsen- und Abschälerblech ist auf der gesamten Schlitzlänge des Trenndüsen-systems von 10 mm innerhalb der Meßgenauigkeit von $\pm 2 \mu\text{m}$ gewährleistet. Bei der Einstellung der Düsenweite a und der Abschälerweite f wird eine Reproduzierbarkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ erreicht.

Die Führung der einzelnen Gasströme innerhalb der Trennelementkammer läßt sich anhand von Abb. 5 verfolgen. Das Ausgangsgas gelangt aus dem Kammerraum (11) durch eine Bohrung in der Abdichtplatte (4) über Gaskanäle in der Trägerplatte (2) und im Trennelementeinsatz (1) in die Düse. Die leichte Fraktion wird radial aus der Trägerplatte (2) in einen äußeren Ringraum (12) der Trennelementkammer abgesaugt. Die schwere Fraktion wird ähnlich wie das Ausgangsgas durch den Trennelementeinsatz (1) und die Trägerplatte (2) geführt und gelangt über eine Bohrung in der anderen Abdichtplatte (3) in den Kammerraum (13).

2.4 Instrumentierung und Meßwerterfassung

Die Drücke in den Verfahrensgasleitungen werden mit Membrandruckaufnehmern¹¹⁾ gemessen. Zur Überwachung des Vakuums in der Anlage werden UF_6 -beständige Wärmeleitungs-Vakuummeter sowie Ionisations-Vakuummeter verwendet. Der Druck in den Behältern und den UF_6 -Tiefkühlfallen wird durch Bourdon-Manometer angezeigt.

Der Gasdurchsatz durch das Trennelement wird durch die Messung des Zusatzgasstroms L_z in der Auspuffleitung der Trennapparatur mit einem thermischen Strömungsmesser¹²⁾

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

12) Typ EALL der Fa. Hastings, Hampton, Virginia, USA.

bestimmt (vgl. Abb. 3). Zusätzlich kann der Gasstrom auch über einen in Serie geschalteten Drehkolbengaszähler abgelesen werden.

Zur Bestimmung der UF_6 -Konzentration in den einzelnen Gasströmen werden Alpha-Ionisationsdetektoren verwendet /8/. Dabei wird durch ein Alpha-Präparat (Am 241) das zu analysierende Gas teilweise ionisiert. Der zwischen zwei Elektroden fließende Ionenstrom I hängt dabei von den Teilchendichten und den Ionisierungsquerschnitten der beiden Gasbestandteile ab. Durch gleichzeitige Bestimmung des Gesamtdruckes p kann nach Eichung der Meßanordnung die UF_6 -Konzentration im Verfahrensgas aus dem Verhältnis I/p ermittelt werden. Dabei können noch UF_6 -Konzentrationsänderungen von $\pm 0,03$ Mol-% UF_6 nachgewiesen werden.

Die Meßwerterfassung und Meßwertverarbeitung an der Trennapparatur wird durch das in Abb. 6 dargestellte Blockschaltbild veranschaulicht. Aus den einzelnen Druck- und Ionenstromsignalen werden über Analogrechenstufen die UF_6 -Konzentrationen (n_i), der logarithmische Gemischtrennfaktor ($\ln A$) und das Uranabschälverhältnis (\mathcal{S}_u) berechnet¹³⁾.

-
- 13) Der Gemischtrennfaktor A und das Uranabschälverhältnis \mathcal{S}_u werden aus den UF_6 -Konzentrationen im Ausgangsgas (n_o) und in der leichten und schweren Fraktion (n_1, n_s) bestimmt.

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

$$\mathcal{S}_u = \frac{n_1}{n_o} \cdot \frac{n_s - n_o}{n_s - n_1}$$

Die UF_6 -Konzentrationen (n_i) werden dabei nach der Beziehung

$$n = a \cdot I/p - b$$

ermittelt (a, b = Eichkonstanten).

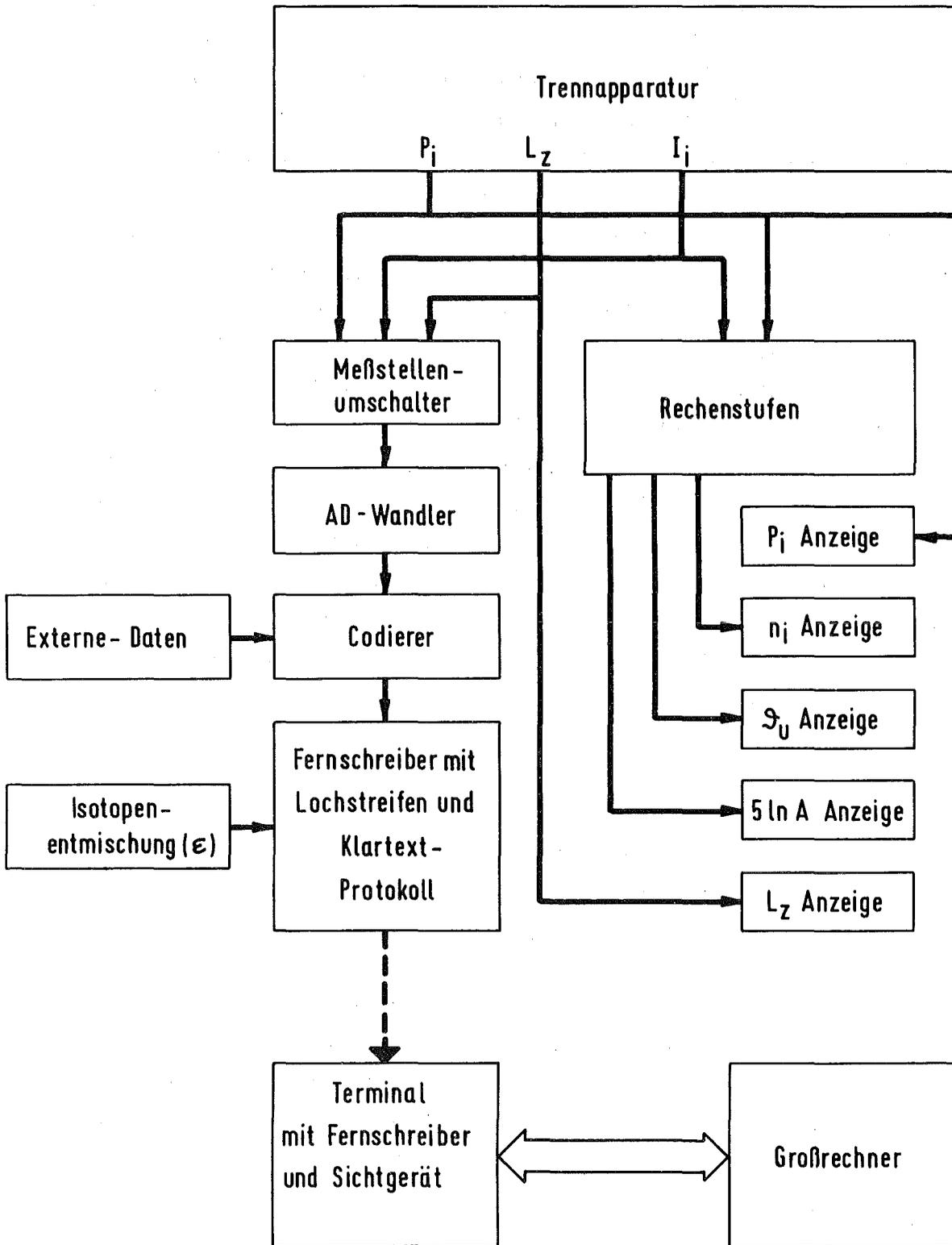


Abb. 6: Blockschaltbild der Meßwernerfassung und Meßwertverarbeitung

Die Betriebsdrücke (p_i) und die sich darauf bei einer bestimmten Trennelementeinstellung ergebenden Größen wie die UF_6 -Konzentrationen (n_i), der logarithmische Gemischtrennfaktor ($\ln A$), das Uranabschälverhältnis (\mathcal{S}_u) sowie der Gasdurchsatz (L_Z) werden digital angezeigt. Die Einstellzeiten für die Konzentrationsanzeige sowie für die Anzeigen des Uranabschälverhältnisses und des Gemischtrennfaktors, die im wesentlichen von der Geschwindigkeit des Gasaustausches an den Konzentrationsmeßstellen bestimmt werden, liegen bei den üblichen Versuchsbedingungen bei wenigen Sekunden. Ist ein Trennversuch fertig eingestellt, so werden die einzelnen Meßwerte (p_i , I_i , L_Z) nacheinander von einer Meßwerterfassungsanlage¹⁴⁾ registriert, die aus einem Meßstellenumschalter, einem Analog-Digital-Wandler, einem Codierer und einem Fernschreiber besteht. Dieser erstellt einen Lochstreifen sowie ein Klartextprotokoll. Zu jedem Versuch werden ebenfalls externe Daten, wie z.B. die Art des Zusatzgases, die Geometrieparameter des Trennelementes, Versuchsnummer etc. erfaßt, die an einer gesonderten Eingabeeinheit über Digitalschalter einstellbar sind. Die Eingabe der Isotopenentmischung erfolgt nachträglich am Fernschreiber.

Der Lochstreifen wird anschließend über ein Terminal in einen Großrechner eingelesen. Mit einem Rechenprogramm werden dann die zur Beurteilung der Versuche wichtigen Größen, beispielsweise die spezifischen Aufwandsgrößen, ermittelt. Außerdem werden die Daten zum späteren Einlesen in eine Datenbank aufbereitet. Auf einem Sichtgerät des Terminals können die zur sofortigen Beurteilung wesentlichen Kenngrößen unmittelbar anschließend abgelesen werden. Über ein ausführliches Ergebnisprotokoll kann bereits wenig später verfügt werden.

14) Typ Andimat 3 der Fa. Wandel & Goltermann, Reutlingen.

3. Versuchsstrategie bei der Optimierung von Trenndüsen- systemen

3.1 Versuchsablauf

Um den mittleren Zeitaufwand für einen Trennversuch möglichst klein zu halten, muß der Versuchsablauf so an die technischen Eigenschaften der Trennapparatur angepaßt werden, daß neben der reinen Meßzeit auch der für die Einregelung bestimmter Parameter erforderliche Zeitaufwand minimal wird.

Den geringsten Zeitaufwand erfordert die Einstellung des Düsenvordruckes p_0 und der Absaugdrücke p_1 und p_s . Die Drücke können mit Hilfe der Regelventile kontinuierlich verändert werden und die Auswirkungen auf das Uranabschälverhältnis \mathcal{D}_u sowie auf die Gemischtrennung können dabei direkt verfolgt werden. Die beiden Geometrieparameter Düsenweite a und Abschälerweite f lassen sich fast genauso schnell und ebenfalls kontinuierlich verstellen. Da jedoch während des Verstellvorgangs die Abdichtplatten vom Trennelement abgehoben werden müssen, kann beispielsweise der Einfluß der Abschälerweite auf das Uranabschälverhältnis während des Verstellvorganges nicht beobachtet werden. Eine Veränderung der Ausgangsgaskonzentration n_0 erfolgt diskontinuierlich durch Anschluß der Trennelementkammer an einen anderen Vorratsbehälter. Dieser Vorgang erfordert einen Zeitaufwand von einigen Minuten, in denen die Verbindungsleitungen zwischen der Trennelementkammer und den Vorratsbehältern evakuiert werden müssen. Ein Zeitaufwand von mehreren Stunden ergibt sich beim Austausch eines Trenndüsen-systems, der beim Übergang zu anderen Geometrieparametern (z.B. bei einer Änderung der Umlenkrolle oder des Düsenblechs) erforderlich ist.

Bei Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte erweist sich folgende Vorgehensweise bei der Durchführung von Trennversuchen als besonders zweckmäßig:

Bei vorgegebener Abschälerweite wird der Einlaßdruck p_0 variiert. Über das Expansionsverhältnis p_0/p_1 wird dabei jeweils das gewünschte Uranabschälverhältnis S_u einreguliert¹⁵⁾. Dies wird solange bei unterschiedlichen Abschälerweiten f wiederholt, bis der für eine technische und wirtschaftliche Anwendung interessierende Einlaßdruck- bzw. Expansionsverhältnisbereich (vgl. Abschnitt 3.4) ausreichend mit Meßpunkten belegt ist. Abb. 7 zeigt als Beispiel die Zuordnung bestimmter Abschälerweiten zu verschiedenen Einlaßdrücken und Expansionsverhältnissen bei vorgegebenem Uranabschälverhältnis S_u .

Im Anschluß an einen solchen Meßzyklus wird ein weiterer Betriebsparameter, z.B. die Düsenweite a oder die Ausgangsgaskonzentration n_0 geändert, und es werden erneut der Einlaßdruck und das Expansionsverhältnis bei verschiedenen Abschälerweiten variiert.

3.2 Bewertung der Versuchsergebnisse

Die Wirtschaftlichkeit eines Trennverfahrens läßt sich in allgemeiner Weise durch "spezifische Aufwandsgrößen" charakterisieren /9/. Beim Trenndüsenverfahren unterscheidet man dabei den spezifischen Energieverbrauch, das spezifische Ansaugvolumen und die spezifische Schlitzlänge. Der

15) Das Uranabschälverhältnis S_u sinkt mit zunehmendem Expansionsverhältnis p_0/p_1 , da das UF_6 aufgrund der anwachsenden Zentrifugalkräfte immer stärker an der Umlenk wand konzentriert wird /1/, /8/.

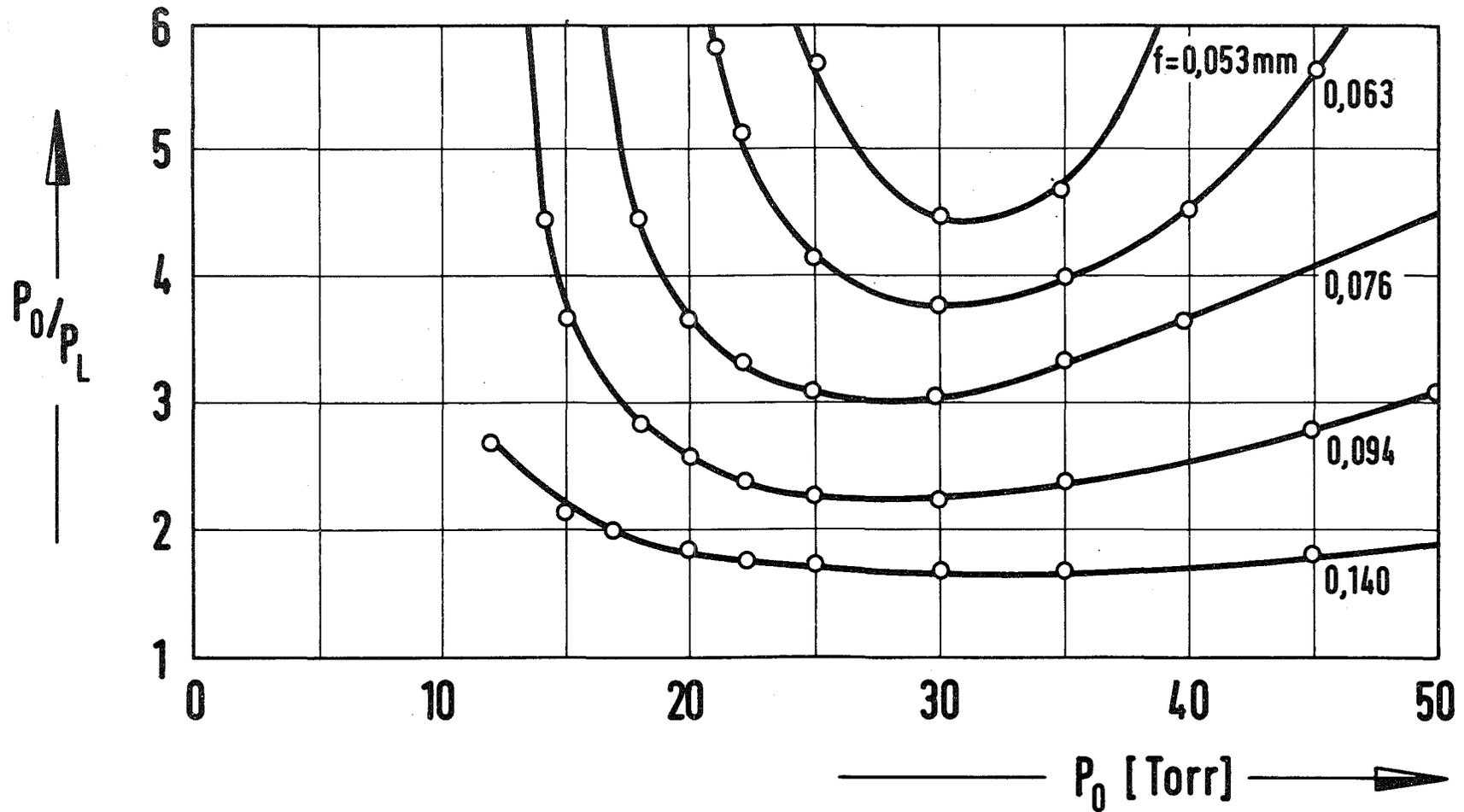


Abb. 7: Zuordnung der Einlaßdrücke und Expansionsverhältnisse bei vorgegebenem Uranabschälverhältnis $\mathcal{S}_u = 1/3$ für verschiedene Abschälerweiten f . Die Messungen wurden an dem in Abb. 4 gezeigten Trenndüsensystem durchgeführt, dessen Düsenweite a auf 0,3 mm eingestellt war. Als Verfahrensgas wurde ein H_2/UF_6 -Gemisch mit 5 Mol-% UF_6 verwendet.

spezifische Energieverbrauch ist ein Maß für die vom Stromverbrauch abhängigen Betriebskosten sowie für die Investitionskosten der elektrischen Komponenten einer Trenndüsenanlage. Das spezifische Ansaugvolumen bestimmt vorrangig die Investitionskosten für Kompressoren, Apparatebau, Rohrleitungen, Kühler, Gebäude etc.. Die spezifische Schlitzlänge erfaßt die Investitionskosten für die Trennelemente. Für die Optimierung der Betriebsbedingungen werden gegenüber den früher verwendeten spezifischen Aufwandsgrößen /10/ in dieser Arbeit modifizierte spezifische Aufwandsgrößen E_s^{real} , v_s^{real} und L_s^{real} eingeführt, die den inzwischen näher bekannten Gegebenheiten einer industriellen Trenndüsenanlage besser gerecht werden.

Beim spezifischen Energieverbrauch E_s^{real} wird entsprechend dem gegenwärtigen technischen Entwicklungsstand des Verfahrens von einer zweistufigen adiabaten Kompression mit Radialverdichtern ausgegangen. Dabei wird auch der Einfluß der Beschau felung auf den Verdichterwirkungsgrad berücksichtigt¹⁶⁾. Um einen direkten Vergleich mit anderen Isotopentrennverfahren zu ermöglichen, wird zusätzlich ein elektrischer Wirkungsgrad von $\eta_{el} = 95 \%$ und ein Kaskadenwirkungsgrad von $\eta_{kask} = 91 \%$ mitberücksichtigt¹⁷⁾.

-
- 16) Für den Einfluß der Beschau felung auf den Verdichterwirkungsgrad η_v wurde folgende Abhängigkeit vom Kompressionsverhältnis p_o/p_1 angenommen:

$$\eta_v (p_o/p_1) = \eta_{vo} \cdot [1 + 0,025 (4 - p_o/p_1)].$$

Der Wirkungsgrad η_{vo} ist dabei der adiabate Verdichterwirkungsgrad beim Kompressionsverhältnis $p_o/p_1 = 4$; für η_{vo} wird ein Wert von 76 % zugrundegelegt.

- 17) Durch Toleranzschwankungen bedingte Minderleistungen werden bei E_s^{real} , v_s^{real} und L_s^{real} nicht berücksichtigt, da sich die Entwicklung der Herstellungsverfahren für technische Trennelemente noch im Fluß befindet. Es wurden bereits technische Trennelemente serienmäßig gefertigt, bei denen die Verminderung der Trennleistung durch Toleranzschwankungen nur noch etwa 5 bis 10 % beträgt.

Entsprechend den Auslegungsdaten einer technischen Trenndüsenanlage wird eine Ansaugtemperatur des Verfahrensgases von 40°C zugrundegelegt. Unter diesen Annahmen ergibt sich der spezifische Energieverbrauch E_s^{real} zu¹⁸⁾

$$E_s^{\text{real}} = \frac{L_o \cdot R \cdot T_t \frac{2 \cdot \chi}{\chi - 1} \left[(p_o/p_1)^{\frac{\chi-1}{2\chi}} - 1 \right]}{\delta U} \cdot \frac{1}{\eta_v} \cdot \frac{1}{\eta_{el}} \cdot \frac{1}{\eta_{kask}},$$

mit der Trennleistung

$$\delta U = \frac{L_u}{2} \cdot \epsilon_A^2 \cdot \mathcal{J}_u (1 - \mathcal{J}_u)$$

(L_o = Moldurchsatz des Gemisches, R = allgem. Gaskonstante, T_t = Ansaugtemperatur des Verdichters (313 K), χ = Verhältnis der spezifischen Wärmen, L_u = Uran-Moldurchsatz, ϵ_A = Elementareffekt der Isotopentrennung).

Beim spezifischen Ansaugvolumen v_s^{real} wird die Abhängigkeit des Betriebsdruckes von den fertigungstechnisch kritischen Abmessungen der Trenndüse berücksichtigt¹⁹⁾. Diese Abmessungen werden im wesentlichen durch die Abschälerweite f_t des technischen Trennelementes festgelegt. Gegenwärtig wird bei der Serienfertigung von Trennelementen ein Maß von $f_t = 10 \mu$ beherrscht, ohne daß hierbei die Trenn-

18) Der spezifische Energieverbrauch E_s wurde früher /10/ mit der idealen isothermen Kompressionsarbeit gebildet:

$$E_s = \frac{L_o \cdot R \cdot T_t \cdot \ln(p_o/p_1)}{\delta U}$$

19) Aus den Ähnlichkeitsgesetzen der Gaskinetik folgt, daß bei einer ähnlichen Größenveränderung der Trennelementgeometrie dann gleiche Trenneigenschaften erreicht werden, wenn der Betriebsdruck umgekehrt proportional zu den charakteristischen Abmessungen des Trennelementes geändert wird /1/.

leistung durch Toleranzschwankungen unzulässig reduziert wird¹⁷⁾. Das Verhältnis aus der im Trennversuch eingestellten Abschälerweite f zu der technischen Abschälerweite $f_t = 10 \mu$ bestimmt demnach den zulässigen Verkleinerungsfaktor und damit den Betriebsdruck des technischen Trennelementes. Bei der Berechnung von V_s^{real} muß demzufolge der das spezifische Ansaugvolumen bestimmende Absaugdruck p_1 der leichten Fraktion mit dem Faktor f/f_t multipliziert werden. Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Betriebsdruckes²⁰⁾ sowie des Kaskadenwirkungsgrades ergibt sich das spezifische Ansaugvolumen V_s^{real} zu²¹⁾

$$V_s^{real} = \frac{L_o \cdot R \cdot T_t}{\delta U \cdot p_1 \cdot (T_t/T)^2 (f/f_t)} \cdot \frac{1}{\eta_{kask}}$$

(T = Temperatur des Ausgangsgases im Trennversuch)

Bei der spezifischen Schlitzlänge L_s^{real} wird berücksichtigt, daß der Gasdurchsatz proportional zur absoluten Temperatur des Verfahrensgases zu erhöhen ist²²⁾.

20) Bei unterschiedlichen Temperaturen werden dann gleiche Trenneigenschaften erreicht, wenn das gesamte Druckniveau und damit auch der Absaugdruck der leichten Fraktion p_1 quadratisch mit der absoluten Temperatur T erhöht wird /11/.

21) Das spezifische Ansaugvolumen V_s wurde bisher /10/ nach der Beziehung

$$V_s = \frac{L_o \cdot R \cdot T_t}{p_1 \cdot \delta U}$$

berechnet.

22) Der Moldurchsatz bei den hier untersuchten Trenndüsen-systemen verhält sich bei konstantem Einlaßdruck umgekehrt proportional zur absoluten Temperatur und er nimmt bei konstanter Temperatur annähernd proportional mit dem Einlaßdruck zu. Da zur Erreichung gleicher Trenneigenschaften das Druckniveau quadratisch mit der absoluten Temperatur angehoben werden muß, ergibt sich eine Zunahme des Moldurchsatzes proportional zur absoluten Temperatur /11/.

L_s^{real} ergibt sich damit zu²³⁾

$$L_s^{\text{real}} = \frac{l}{\delta U \cdot (T_t/T)} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{kask}}}$$

(l = Schlitzlänge des Trennelementes).

Mit Hilfe der hier beschriebenen spezifischen Aufwandsgrößen E_s^{real} , v_s^{real} und L_s^{real} kann zur Beurteilung der Trennversuche bereits eine einfache Kostenfunktion zur Berechnung normierter Trennarbeitskosten K aufgestellt werden²⁴⁾.

$$K = c_E \cdot \frac{E_s^{\text{real}}}{E_{so}^{\text{real}}} + c_V \cdot \frac{v_s^{\text{real}}}{v_{so}^{\text{real}}} + c_L \cdot \frac{L_s^{\text{real}}}{L_{so}^{\text{real}}}$$

Die spezifischen Aufwandsgrößen werden darin auf die mit "o" indizierten Werte normiert, welche zu den der bisherigen Planung einer großtechnischen Trenndüsenanlage zugrundeliegenden Betriebsbedingungen gehören²⁵⁾. Die Bewichtungsg-

23) Die spezifische Schlitzlänge L_s wurde bisher /10/ nach der Beziehung $L_s = l/\delta U$ berechnet.

24) Für genauere Kostenanalysen und für die Optimalisierung der Betriebsbedingungen werden zusammen mit der Industrie (STEAG AG, Essen, Linde AG, München) ausführliche Rechenprogramme entwickelt. Die hier angegebene Kostenfunktion dient lediglich einer raschen und abschätzenden Beurteilung von Trennversuchen.

25) Bei der bisherigen technischen Planung wurde folgender Trennversuch an einem Labortrennelement (TE XIII, /1/) zugrundegelegt:

$p_o = 34$ Torr, $p_o/p_1 = 4$, $n_o = 5$ Mol-% UF_6 (UF_6/H_2 -Gemisch), $\epsilon_A = 1,5$ %, $\beta_u = 1/3$, Düsenweite = 0,3 mm, Abschälerweite = 0,075 mm, Umlenkradius = 0,75 mm.

Für die spezifischen Aufwandsgrößen ergeben sich hieraus folgende Werte:

$E_{so}^{\text{real}} = 5572$ kWh/kg UTA; $v_{so}^{\text{real}} = 10,1 \cdot 10^5$ m³/kg UTA;
 $L_{so}^{\text{real}} = 1,12$ ma/kg UTA.

faktoren c_E , c_V und c_L für die verschiedenen Aufwandsgrößen sind u.a. von der Anlagengröße, den Finanzierungsbedingungen und dem Strompreis abhängig. Ausführliche Kostenanalysen verschiedener Trenndüsenanlagen zeigten²⁴⁾, daß c_E etwa zwischen 0,65 und 0,8²⁶⁾, c_V etwa zwischen 0,15 und 0,25 und c_L zwischen 0,05 und 0,10 liegt.

3.3 Darstellung der Ergebnisse

Entsprechend der Versuchsdurchführung bei einem Meßzyklus werden die spezifischen Aufwandsgrößen als Linien konstanten Aufwands (Höhenlinien) in der $(p_0 - p_0/p_1)$ -Ebene dargestellt. Abb. 8 zeigt als Beispiel Höhenliniendiagramme für E_s^{real} , V_s^{real} , L_s^{real} sowie für die normierten Trennarbeitskosten K . Bei der hier verwendeten Kostenfunktion wurden die Bewichtungsfaktoren zu $c_E = 0,725$, $c_V = 0,2$ und $c_L = 0,075$ angenommen.

Bei dieser Auftragung der spezifischen Aufwandsgrößen lassen sich die Einlaßdrücke und Expansionsverhältnisse, bei denen die Minimalwerte für den spezifischen Energieverbrauch E_s^{real} und das spezifische Ansaugvolumen V_s^{real} erreicht werden, eindeutig festlegen. Für die spezifische Schlitzlänge L_s^{real} kann dagegen keine eindeutige Lage für das Minimum definiert werden, da die Trennleistung δU und damit die spezifische Schlitzlänge mit zunehmendem Expansionsverhältnis einem Grenzwert zustrebt. Für eine vorgegebene Kostenfunktion, in der die verschiedenen Beiträge der spezifischen Aufwandsgrößen an den Trennarbeitskosten festgelegt sind, lassen sich eindeutig die optimalen Werte für den Einlaßdruck p_0 und das Expansionsverhältnis p_0/p_1 ablesen.

26) Da der spezifische Energieverbrauch nicht nur für die vom Stromverbrauch abhängigen Betriebskosten, sondern auch für die Investitionskosten der elektrischen Anlagenkomponenten maßgebend ist, ist c_E vergleichsweise groß gegenüber c_V bzw. c_L .

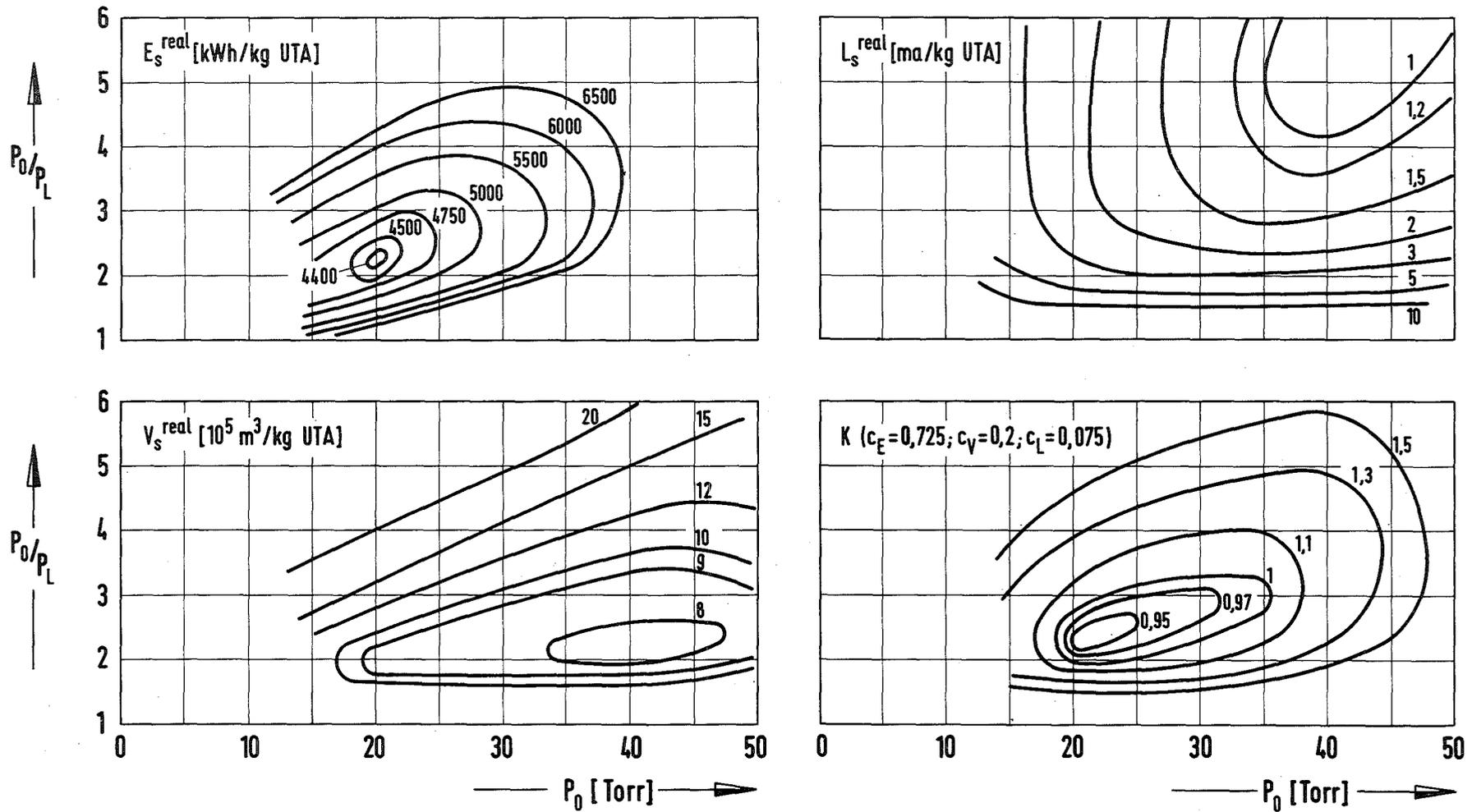


Abb. 8: Linien konstanten spezifischen Energieverbrauchs E_s^{real} , konstanten spezifischen Ansaugvolumens V_s^{real} , konstanter spezifischer Schlitzlänge L_s^{real} und konstanter normierter Trennarbeitskosten K im Einlaßdruck-Expansionsverhältnis-Diagramm. (Versuchsbedingungen s. Abb. 7).

3.4 Eingrenzung des Variationsbereiches der Versuchsparameter

Der Variationsbereich der Versuchsparameter sollte bei der Optimierung möglichst auf den für eine technische Anwendung interessierenden Bereich eingegrenzt werden, damit die Zahl der erforderlichen Trennversuche in einem angemessenen Rahmen gehalten werden kann. Dieser Bereich muß soweit ausgedehnt sein, daß die günstigsten Betriebsbedingungen, d.h. die Lage des Kostenminimums für Trenndüsenanlagen unterschiedlichster Kostenstruktur in jedem Fall erfaßt werden.

Um den Einfluß der Kostenstruktur auf die Lage der optimalen Betriebsbedingungen zu demonstrieren, wurden für die in Abb. 8 gezeigten Aufwandsgrößen die normierten Trennarbeitskosten mit der in Abschnitt 3.2 eingeführten Kostenfunktion K für drei Anlagen mit stark unterschiedlicher Kostenstruktur berechnet. Die dabei verwendeten Bewichtungsfaktoren c_E , c_V und c_L der Kostenfunktion sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

	c_E	c_V	c_L
Fall A	0,8	0,15	0,05
Fall B	0,725	0,20	0,075
Fall C	0,65	0,25	0,10

Tabelle 1: Bewichtungsfaktoren der Kostenfunktion

Nach den bisher vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zum Trenndüsenverfahren entspricht Fall A etwa dem Grenzfall eines besonders hohen Stromkostenanteils bei niedrigem Investitionskostenanteil bei den Trennarbeitskosten, was beispielsweise für eine Großanlage mit niedri-

ger spezifischer Investition kennzeichnend wäre. Fall C beschreibt etwa den entgegengesetzten Grenzfall, bei dem von einem vergleichsweise niedrigen Stromkostenanteil und einem hohen Investitionskostenanteil bei den Trennarbeitskosten ausgegangen wird.

Die für diese drei Fälle erhaltenen Kostendiagramme sind in Abb. 9 aufgezeichnet. Ein Vergleich mit den in Abb. 8 dargestellten spezifischen Aufwandsgrößen zeigt, daß die Lage des Kostenminimums im Fall A weitgehend mit dem Minimum des spezifischen Energieverbrauchs E_s^{real} zusammenfällt. Mit zunehmender Bewichtung des Investitionsaufwandes (Fall B und C) verschiebt sich der optimale Betriebspunkt zu höheren Einlaßdrücken und Expansionsverhältnissen, also erwartungsgemäß in Richtung sinkender V_s^{real} -Werte und in geringerem Maße auch in Richtung sinkender L_s^{real} -Werte. Man sieht, daß im vorliegenden Fall die Lage des Kostenminimums deutlich von der Kostenstruktur abhängt. Der optimale Einlaßdruck liegt zwischen $p_o = 20$ und 30 Torr und das optimale Expansionsverhältnis liegt zwischen $p_o/p_1 = 2,2$ und $3,0$.

Bei den Trennversuchen muß dieser Betriebsbereich, der für die Auslegung einer Trenndüsenanlage in Frage kommen kann, vollständig erfaßt werden. Hierfür sind i.a. etwa 40 Trennversuche ausreichend. Der Zeitaufwand pro Trennversuch, der im wesentlichen durch die Meßzeit für die Isotopenanalyse am Massenspektrometer bestimmt wird, beträgt im Mittel etwa 30 Minuten²⁷⁾. Berücksichtigt man neben der reinen

27) Bei Versuchen, bei denen beispielsweise nur die Abhängigkeit des Abschälverhältnisses oder der Gemischtrennung von den Betriebsbedingungen ermittelt werden soll, ist ein Zeitaufwand von etwa 3 Minuten pro Versuchseinstellung erforderlich.

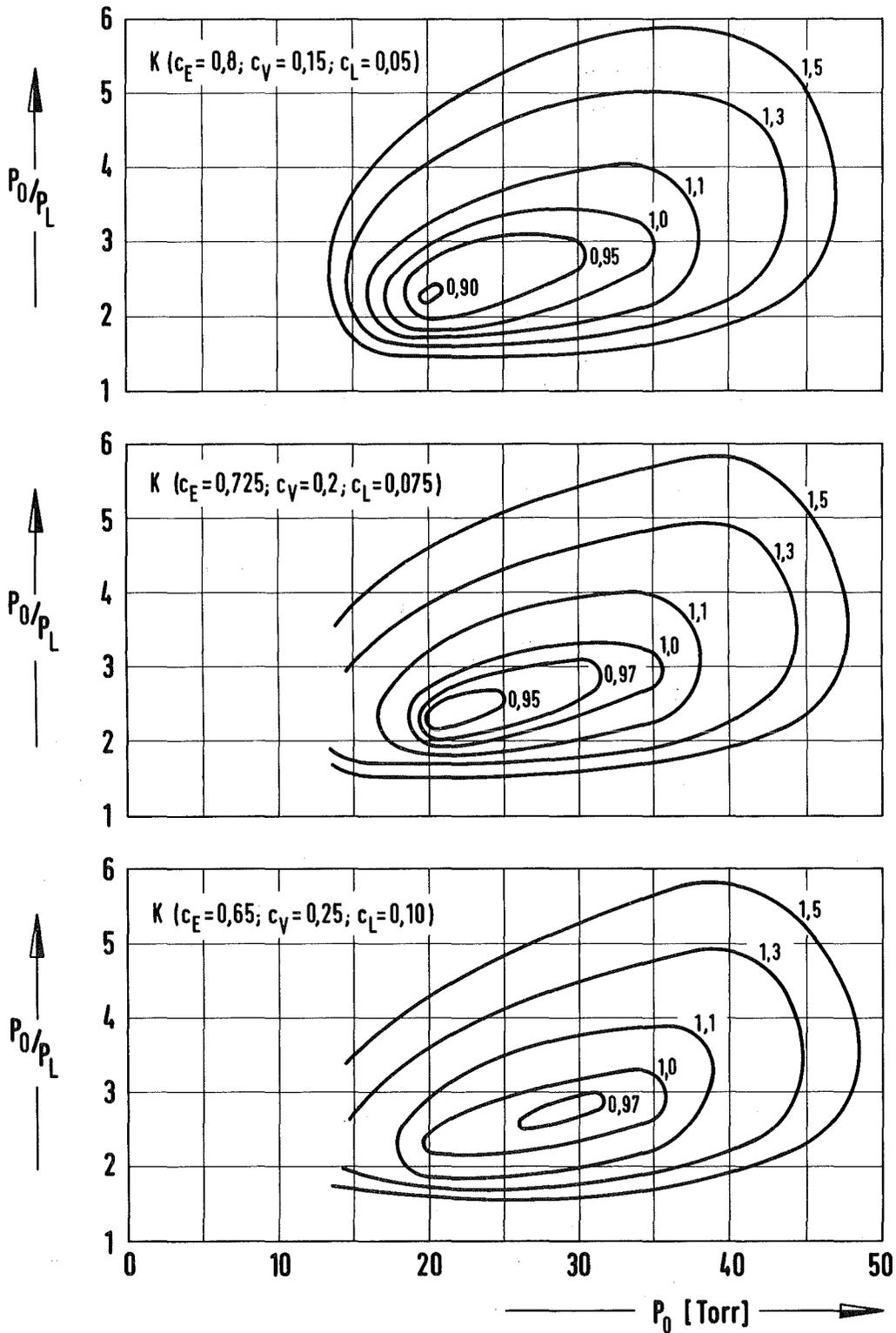


Abb. 9: Einfluß der Bewichtungsfaktoren für die Energie- und Investitionskosten auf die normierten Trennarbeitskosten K , dargestellt im Einlaßdruck-Expansionsverhältnis-Diagramm. Den Kostendiagrammen liegen die in Abb. 8 gezeigten Diagramme der spezifischen Aufwandsgrößen sowie die in Tab. 1 aufgeführten Bewichtungsfaktoren c_E , c_V und c_L zugrunde.

Meßzeit den Zeitbedarf für die tägliche Inbetriebnahme der Trennapparatur sowie für eventuelle Wartungs- und Umbauarbeiten, so ergibt sich insgesamt ein Zeitaufwand von etwa 60 Stunden zur Durchführung eines Meßzyklus.

Eine weitere Verringerung der Zahl der Trennversuche, beispielsweise durch Anwendung eines Gradientenverfahrens ist nicht möglich, da aufgrund der nicht eindeutig definierbaren Kostenstruktur die Versuchsparameter zwangsläufig in einem größeren Bereich variiert werden müssen. Eine Einschränkung des Variationsbereichs wird dadurch erreicht, daß ein Versuchsparameter nur solange verändert wird, bis die Minima der durch die Grenzfälle A und C gekennzeichneten Kostenfunktion erfaßt sind.

4. Optimierung des Uranabschälverhältnisses

Im folgenden wird am Beispiel des Uranabschälverhältnisses gezeigt, in welcher Weise, neben dem Einlaßdruck und dem Expansionsverhältnis, weitere Versuchsparameter optimiert werden. Die Versuche wurden mit einem H_2/UF_6 -Gemisch mit 5 Mol-% UF_6 an der in Abb. 4 dargestellten Trenndüse durchgeführt. Dabei wurde die Abhängigkeit der spezifischen Aufwandsgrößen und der normierten Kosten vom Einlaßdruck und vom Expansionsverhältnis für die Abschälverhältnisse $\mathcal{S}_u = 1/3, 1/4$ und $1/5$ aufgenommen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb. 10 dargestellt.

Aus Abb. 10 folgt, daß der minimal erreichbare spezifische Energieverbrauch E_s^{real} beim Übergang von $\mathcal{S}_u = 1/3$ auf $\mathcal{S}_u = 1/4$ von 4400 auf 4100 kWh/kg UTA abnimmt, während beim Übergang zu $\mathcal{S}_u = 1/5$ keine weitere Senkung des spezifischen Energieverbrauchs erreicht wird.

Bei einer genaueren Analyse der Versuchsergebnisse zeigt sich, daß die beim Übergang zu kleineren Uranabschälver-

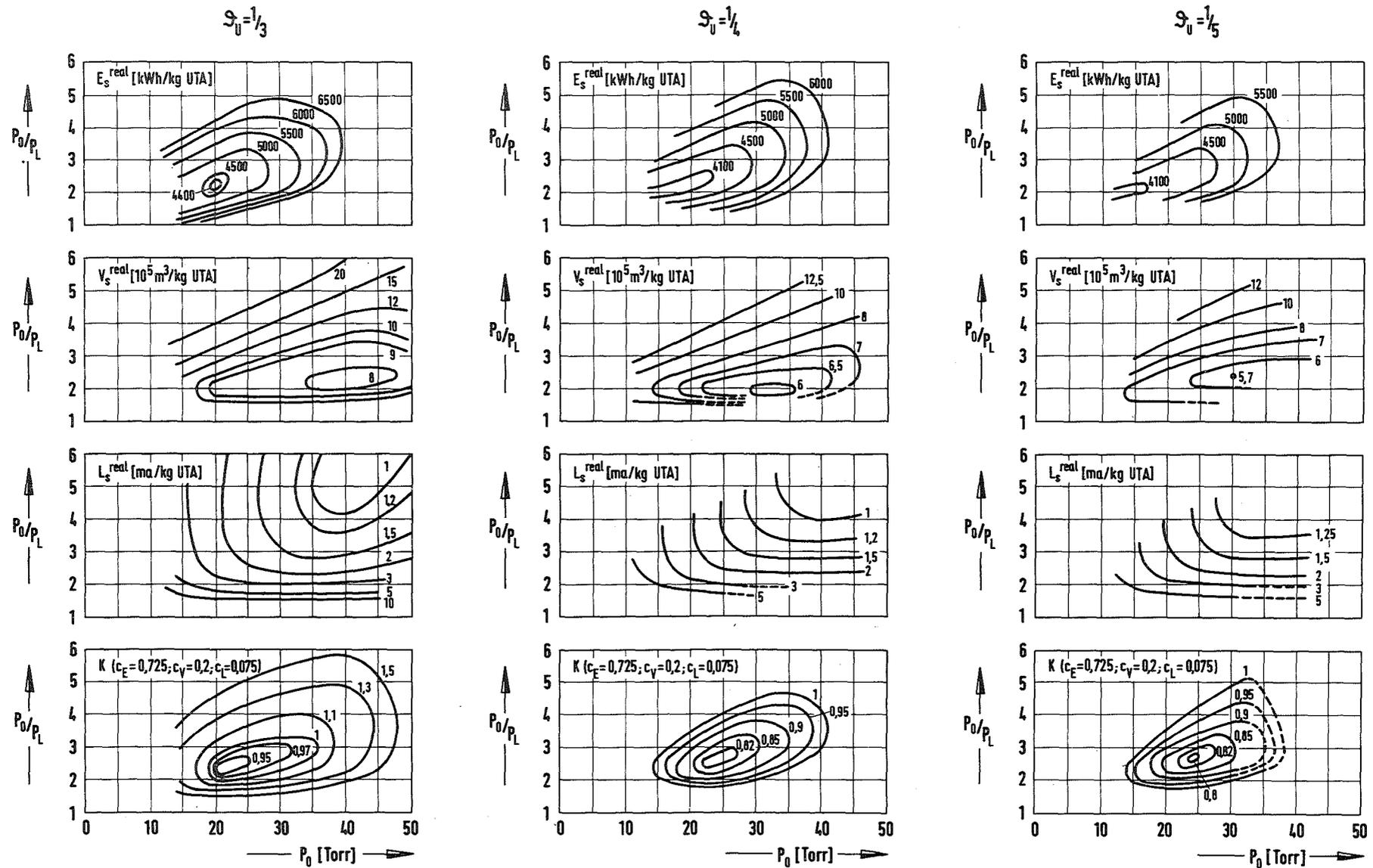


Abb. 10: Linien konstanten spezifischen Energieverbrauchs E_s^{real} , konstanten spezifischen Ansaugvolumens V_s^{real} , konstanter spezifischer Schlitzlänge L_s^{real} und konstanter normierter Trennarbeitskosten K für die Uranabschälverhältnisse $S_U = 1/3, 1/4$ und $1/5$. (Versuchsbedingungen s. Abb. 7).

hältnissen beobachtete Abnahme des spezifischen Energieverbrauchs im wesentlichen auf eine Zunahme der Trennleistung zurückzuführen ist²⁸⁾. Für den Minimalwert des spezifischen Ansaugvolumens V_s^{real} ergibt sich beim Übergang von $\mathcal{D}_u = 1/3$ auf $\mathcal{D}_u = 1/4$ bzw. $1/5$ eine deutliche Absenkung von $V_s^{\text{real}} = 8,0 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{kg UTA}$ auf $6,0$ bzw. $5,7 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{kg UTA}$. Diese Abnahme des spezifischen Ansaugvolumens ist nicht nur auf eine Steigerung der Trennleistung, sondern insbesondere auch auf eine Zunahme der Abschälerweite zurückzuführen, die eine Erhöhung des möglichen Betriebsdruckes zur Folge hat (vgl. Abschnitt 3.2).

Bei der spezifischen Schlitzlänge L_s^{real} wird aufgrund der Steigerung der Trennleistung δU mit sinkendem Uranabschälverhältnis etwa dieselbe Abnahme wie bei dem spezifischen Energieverbrauch E_s^{real} erzielt. Im Bereich minimaler E_s^{real} und V_s^{real} -Werte ergeben sich für die spezifische Schlitzlänge Werte von etwa 3 ma/kg UTA .

Beim Übergang zu kleineren Abschälverhältnissen \mathcal{D}_u nehmen die normierten Trennarbeitskosten K , die in Abb. 10 zur Vereinfachung nur für eine Bewichtung entsprechend der Kostenstruktur B (vgl. Tab. 1) aufgezeichnet sind, entsprechend der Absenkung der spezifischen Aufwandsgrößen deutlich ab. Während sich für $\mathcal{D}_u = 1/3$ ein Minimalwert von

28) Bei konstanten Betriebsbedingungen läßt sich die Zunahme des Elementareffektes ϵ_A der Isotopentrennung mit kleiner werdendem Uranabschälverhältnis \mathcal{D}_u für $\mathcal{D}_u \geq 0.2$ mit relativ guter Genauigkeit analog zu der für den Fall der Gleichgewichtsentmischung /3/ bekannten Beziehung

$$\epsilon_A = \text{const.} \cdot \frac{|\ln \mathcal{D}_u|}{1 - \mathcal{D}_u}$$

darstellen, nach der die Trennleistung beim Übergang von $\mathcal{D}_u = 1/3$ auf $\mathcal{D}_u = 1/4$ bzw. $1/5$ um $6,2$ bzw. $6,8$ % ansteigt und bei $\mathcal{D}_u = 0.1986$ ein Maximum erreicht. Für $\mathcal{D}_u < 0.2$ ergibt sich im Experiment eine schwächere Zunahme als im Fall der Gleichgewichtsentmischung bzw. sogar ein Abfall von ϵ_A mit kleiner werdendem \mathcal{D}_u .

K = 0,95 ergibt, werden für $\mathcal{S}_u = 1/4$ bzw. $1/5$ Minimalwerte von K = 0,82 bzw. 0,80 erreicht. Die Lage des Kostenminimums verschiebt sich mit kleiner werdendem Uranabschälverhältnis dabei geringfügig zu höheren Einlaßdrücken und Expansionsverhältnissen. Ein qualitativ ähnliches Bild ergibt sich auch bei stärkerer Bewichtung des Energieverbrauchs (vgl. Tab. 1, Fall A) oder der Investitionskosten (Fall C). Dies geht aus Tab. 2 hervor, in der die Minimalwerte von K mit den zugehörigen Betriebsbedingungen zusammengestellt sind.

		Fall A	Fall B	Fall C
$\mathcal{S}_u = 1/3$	K	,90	,95	,97
	P_o (Torr)	20,5	22,5	28,0
	P_o/P_1	2,3	2,45	2,75
$\mathcal{S}_u = 1/4$	K	,79	,82	,83
	P_o (Torr)	22,0	24,0	26,0
	P_o/P_1	2,4	2,6	2,8
$\mathcal{S}_u = 1/5$	K	,78	,80	,82
	P_o (Torr)	23,5	24,5	26,5
	P_o/P_1	2,65	2,7	2,85

Tabelle 2: Minimalwerte der normierten Trennarbeitskosten K und zugehörige Betriebsdrücke für verschiedene Abschälverhältnisse \mathcal{S}_u und verschiedene Bewichtungsfaktoren der Kostenfunktion.

Für die praktische Auslegung einer Trenndüsenanlage dürfte sich ein Uranabschälverhältnis von $\mathcal{S}_u = 1/4$ als besonders günstig erweisen, da die normierten Trennarbeitskosten bei $\mathcal{S}_u = 1/4$ deutlich niedriger als bei $\mathcal{S}_u = 1/3$ sind. Die geringfügig niedrigeren Kosten bei $\mathcal{S}_u = 1/5$ dürften in der Praxis durch die Nachteile des komplizierteren Kaskadenaufbaus bei kleineren Uranabschälverhältnissen, der in der hier verwendeten Kostenfunktion nicht berücksichtigt wird, aufgewogen werden.

Diskussion

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Trennapparatur besitzt gegenüber den bisher verwendeten Versuchsanordnungen den Vorteil, daß das Abschälverhältnis eines Trenndüsen-systems kontinuierlich registriert und auf vorgegebene Werte einreguliert werden kann. Dadurch kann die Optimierung eines Trenndüsen-systems systematische Trennversuche mit erheblich geringerem Zeitaufwand als bisher durchgeführt werden, da Versuche bei Abschälverhältnissen, die für eine Kaskadenschaltung von Trenndüsen nicht in Frage kommen, vermieden werden²⁹⁾. Die hiermit verbundene Zeitersparnis kann voll zum Tragen kommen, da der Zeitaufwand für die Einregulierung des Abschälverhältnisses gegenüber der Meßzeit für die massenspektrometrische Isotopenanalyse vernachlässigt werden kann. Eine weitere Verringerung des Zeitaufwandes wird durch zusätzliche Verbesserungen in der Versuchstechnik erreicht. Dies betrifft insbesondere die automatische Registrierung der Meßwerte, die Möglichkeit zur Verstellung der Düsenweite ohne Ausbau des Trenndüsen-systems und die automatische Probenentnahme für das direkt an die Apparatur angeschlossene Massenspektrometer.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Optimierungsuntersuchungen zeigen, daß die Versuchsergebnisse in einfacher Weise durch eine Kostenfunktion im Hinblick auf die prak-

29) Bei einer Trenndüse mit fest eingestellter Abschälweite ändert sich das Abschälverhältnis in dem für die Optimierung interessenden Variationsbereich des Einlaßdruckes und des Expansionsverhältnisses etwa um einen Faktor 2 (vgl. Abb. 7). Dies hat zur Folge, daß mindestens 3 bis 5 Trennversuche durchgeführt werden müssen, wenn der Elementareffekt der Isotopentrennung durch Interpolation zwischen den Meßwerten mit ausreichender Genauigkeit für ein vorgegebenes Abschälverhältnis ermittelt werden soll.

tische Anwendung des Trenndüsenverfahrens bewertet werden können. Dadurch kann nicht nur der Variationsbereich der Versuchsparameter stark eingeschränkt werden; durch die unmittelbare Bewertung der Versuche ist vielmehr auch ein gezieltes Vorgehen bei der Optimierung gewährleistet, da bereits vorliegende Ergebnisse unmittelbar bei der Festlegung des laufenden Versuchsprogramms direkt berücksichtigt werden können.

Die Verbesserungen in der Versuchstechnik der Trennapparatur einerseits und die hier entwickelte Optimierungsmethode andererseits sollten insbesondere auch Untersuchungen an fortgeschrittenen Trennelementen /2/ erleichtern, bei denen zusätzliche Versuchsparameter zu variieren sind.

Herrn Prof. Dr. E.W. Becker danken wir für die Anregung dieser Arbeit und für ihre stete Förderung.

Literaturverzeichnis

- /1/ E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte und D. Seidel;
Angew. Chemie, Intern. Edition 6, 507 (1967).
Diese Arbeit enthält eine Zusammenstellung der früheren Veröffentlichungen über das Trenndüsenverfahren.
- /2/ E.W. Becker;
Das Trenndüsenverfahren zur Anreicherung von Uran-235
Schriftenreihe des Deutschen Atomforums, Heft 20 (1974).
- /3/ E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld und G. Eisenbeiß;
Z. Naturforsch. 26a, 1377 (1971).
- /4/ E.W. Becker, G. Frey, R. Schütte und D. Seidel;
atomwirtschaft 13, 359 (1968).
- /5/ E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte und D. Seidel;
KFK-Bericht 2067, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1974).
- /6/ P. Bley, R. Dürr, W. Ehrfeld und G. Eisenbeiß;
Z. Naturforsch. 28a, 1273 (1973).
- /7/ W. Bier, F. Weis;
Kerntechnik 14, 105 (1972).
- /8/ P. Bley, W. Ehrfeld;
KFK-Bericht 1562, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1972).
- /9/ E.W. Becker;
Chemie-Ing.-Technik 29, 365 (1957).
- /10/ E.W. Becker, W. Beyrich, K. Bier, H. Burghoff, F. Zigan;
Z. Naturforsch. 12a, 609 (1957).
- /11/ K. Schubert;
KFK-Bericht 1439, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1971).