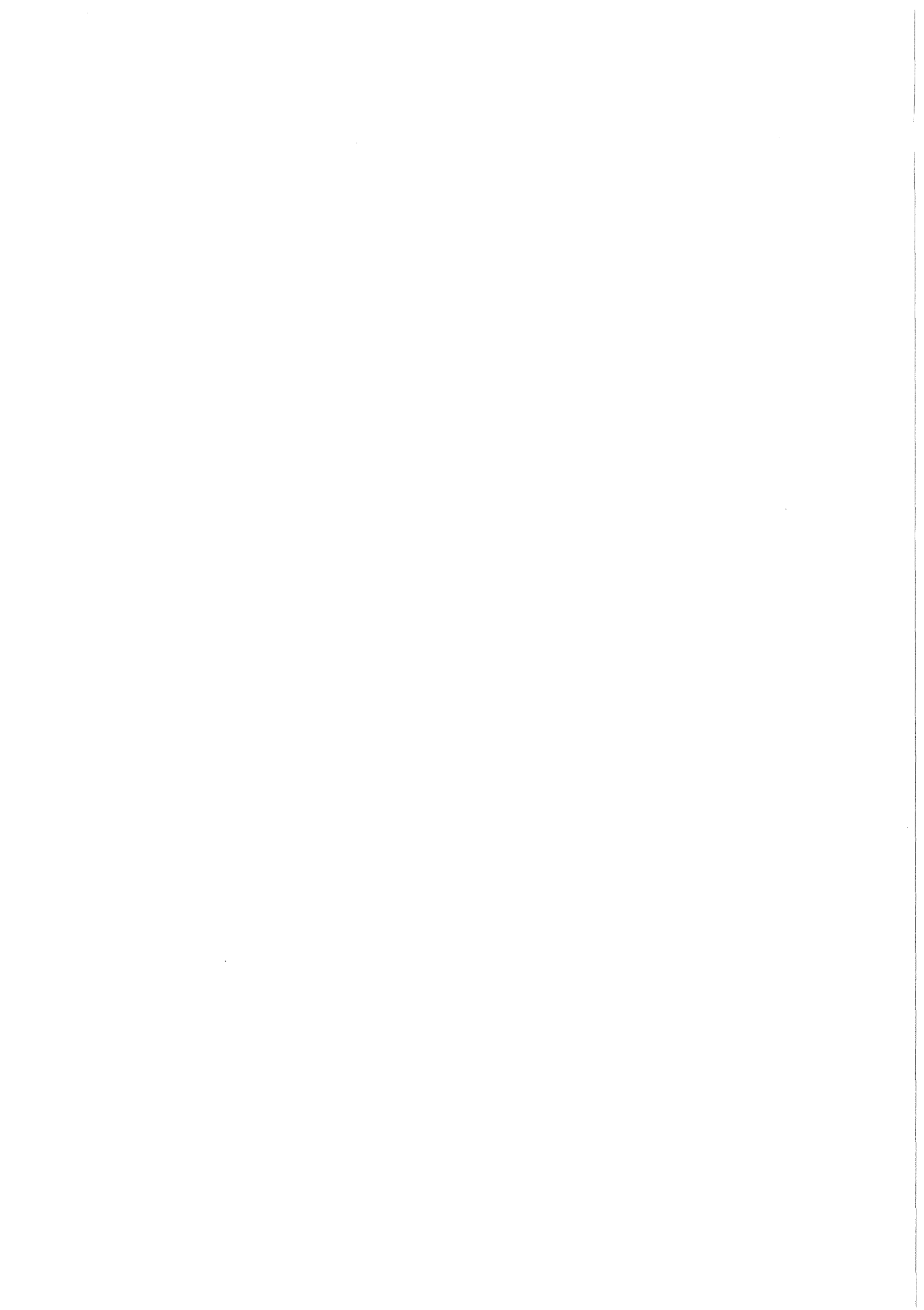


KfK 3991  
März 1986

**Experimentelle und theoretische  
Untersuchungen zur  
gasdynamischen Trennung von  
Uranhexafluorid und Helium in  
Trenndüsenanlagen zur  
Anreicherung von Uran-235**

P. Bley, W. Ehrfeld, D. Schmidt  
Institut für Kernverfahrenstechnik

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**

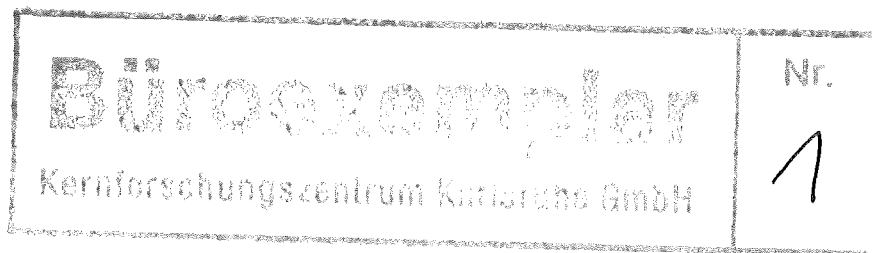


KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 3991

Experimentelle und theoretische Untersuchungen  
zur gasdynamischen Trennung von Uranhexafluorid und Helium  
in Trenndüsenanlagen zur Anreicherung von Uran-235

P. Bley, W. Ehrfeld, D. Schmidt<sup>\*)</sup>



\*) von der Fakultät für Maschinenbau der Universität  
Karlsruhe (T. H.) genehmigte Dissertation

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur gasdynamischen Trennung von Uranhexafluorid und Helium in Trenndüsenanlagen zur Anreicherung von Uran-235

### Zusammenfassung

In zukünftigen Trenndüsenanlagen zur Anreicherung von  $^{235}\text{U}$  soll die Trennung von  $\text{UF}_6$  und Zusatzgas am Kaskadenkopf gasdynamisch mit einer kleinen Trenndüsen-Hilfskaskade erfolgen, welche die bisher verwendeten Tieftemperaturabscheider ersetzt. Die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführte Optimierung des Aufbaus und der Betriebsweise dieser als Gemischtrennkaskade bezeichneten Anlage zeigen, daß die Größe der Umlenkradien der in den Gemischtrennstufen eingesetzten Doppelumlenksysteme der Größe der Umlenkradien der Trennelemente der Isotopentrennkaskade entspricht. In den Gemischtrennstufen können Verdichter gleicher Bauart wie in der Isotopentrennkaskade eingesetzt werden, wobei jedoch jeweils zwei Verdichter in Serie geschaltet werden müssen, um an den Trenndüsen ein für die Gemischtrennung ausreichend hohes Expansionsverhältnis zur Verfügung zu stellen. Die Untersuchungen zur Betriebsweise von Gemischtrennkaskaden zeigen, daß es trotz der gewählten symmetrischen Kaskadenschaltung günstig ist, in den oberen Gemischtrennstufen die Anreicherungsfaktoren für das leichte Zusatzgas größer als die Abreicherungsfaktoren zu wählen und somit die Gemischtrennung in einer "nicht idealen Kaskade" durchzuführen. Hierdurch werden innerhalb der Gemischtrennkaskade Zirkulationsströme erzeugt, die zwar den Durchsatz durch die Verdichter vergrößern, andererseits aber eine bessere Ausnutzung der Gemischtrennung für die Zusatzgasanreicherung gestatten, so daß die Anzahl der Gemischtrennstufen bzw. die spezifischen Investitionskosten reduziert werden. Für Rechteck-Isotopentrennkaskaden, die in einem Schritt auf den für Leichtwasserreaktoren erforderlichen  $^{235}\text{U}$ -Gehalt von ca. 3 % anreichern, werden vier, für Rechteck-Isotopentrennkaskaden, die Reaktorbrennstoff im Recycling-Betrieb herstellen, drei Gemischtrennstufen benötigt. Bei Rechteck-Isotopentrennkaskaden liegt der Kostenanteil der Gemischtrennkaskade an den Trennarbeitskosten zwischen 3 % und 6 %.

## Experimental and Theoretical Investigations into the Aerodynamic Separation of Uranium Hexafluoride and Helium in Separation Nozzle Plants for Uranium-235 Enrichment

### Abstract

It is planned that in future separation nozzle plants for U-235 enrichment the separation of  $UF_6$  and light auxiliary gas at the top of the cascade will be performed by a small cascade of separation nozzle stages with double deflection systems. This auxiliary cascade called gas separation cascade will replace the previously used cryoseparator. The configuration and mode of operation of the gas separation cascade have been optimized under aspects of economy. It has become evident that the length of the deflection radii of the double deflection systems used in the gas separation stages corresponds to the length of the deflection radii of the separation elements of the isotope separation cascade. The same type of compressors as are used in the isotope separation cascade can be used in the gas separation stages as well, though two compressors have to be connected in series in order to provide an expansion ratio at the separation nozzle which is sufficiently high for efficient gas separation. Investigations into the mode of operation of gas separation cascades have shown that despite the symmetrical cascade connection chosen, it is favourable to specify the enrichment factors for the light auxiliary gas in the upper gas separation stages to be higher than the depletion factors, which means that gas separation is performed in a "non-ideal cascade". This gives rise to circulating streams within the gas separation cascade which, though raising the flow through the compressors, will allow, on the other hand, to better exploit gas separation for enrichment of the auxiliary gas so that the number of gas separation stages and the specific investment costs, respectively, will be reduced. For square isotope separation cascades, which provide enrichment in one step to about 3 % U-235 content required for light water reactors, four gas separation stages are necessary, whereas for square isotope separation cascades producing the reactor fuel in the recycling mode of operation three gas separation stages are needed. For square isotope separation cascades the cost percentage of the gas separation cascade in the costs of separative work varies between 3 % and 6 %.

INHALTSVERZEICHNIS	Seite
<b>1. Einleitung und Überblick</b>	1
<b>2. Beschreibung des Trennelementes und der Versuchsanordnung</b>	9
2.1 Kenngrößen eines Doppelumlenksystems	9
2.2 Beschreibung der Versuchsanordnung	13
2.3 Messung der $UF_6$ -Konzentrationen	16
<b>3. Theoretische Grundlagen einer Gemischtrennkaskade</b>	20
3.1 Aufbau einer Gemischtrennkaskade	20
3.2 Notwendige Zusatzgasabschälverhältnisse der Stufen	23
3.3 Bilanzgleichungen für eine Gemischtrennkaskade	30
3.4 Notwendige Gemischtrennfaktoren der Stufen	31
3.4.1 Ideale Kaskade	32
3.4.2 Nicht ideale Kaskade mit identischen Zusatzgasabschäl- verhältnissen der Stufen	34
3.4.3 Nicht ideale Kaskade mit unterschiedlichen Zusatzgasab- schälverhältnissen der Stufen	37
<b>4. Experimentelle Bestimmung der Gemischtrennung in einem Doppelumlenksystem</b>	40
4.1 Einfluß des stufeninternen Zirkulationsstromes von Doppel- umlenksystemen auf die Gemischtrennung	40
4.2 Einfluß der Düsengaskonzentration auf die Gemischtrennung	43
4.3 Einfluß des Expansionsverhältnisses und des Düsenvordrucks auf die Gemischtrennung und die Trennelementgröße	46
4.4 Einfluß des kaskadeninternen Zirkulationsstromes auf die Gemischtrennung	53
4.5 Einfluß der Gemischtrennung in der Isotopentrennkaskade und des Zusatzgasabschälverhältnisses der oberen Gemischtrenn- stufe auf die Gemischtrennung der ersten Gemischtrennstufe	59

<b>5. Bewertungskriterien für die Optimierung der Auslegung und der Betriebsweise von Gemischtrennkaskaden</b>	<b>63</b>
5.1 Normierte Investitionskosten und normierter Energieverbrauch	63
5.2 Trennleistungsverluste durch UF <sub>6</sub> -Restmengen im Zusatzgasrückstrom	64
5.3 Normierte spezifische Aufwandsgrößen	66
<b>6. Ergebnisse der Untersuchungen zur Auslegung von Gemischtrennkaskaden</b>	<b>70</b>
6.1 Beispiel für die Optimierung der Betriebsweise einer Gemischtrennkaskade	70
6.2 Gemischtrennkaskaden für im Recycling-Betrieb arbeitende Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlenksystemen	78
6.3 Optimale Gemischtrennkaskade für Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlenksystemen, die in einem Schritt auf einen <sup>235</sup> U-Gehalt von 3,2 Mol-% anreichern	82
6.4 Vergleich der Ergebnisse der Untersuchungen zur Auslegung von Gemischtrennkaskaden für Isotopentrennkaskaden mit Doppel- und Einzelumlenksystemen	84
6.5 Beitrag der Gemischtrennkaskade zur Isotopentrennung	86
<b>7. Diskussion</b>	<b>90</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>95</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>98</b>



## 1. Einleitung und Überblick

Zur Anreicherung des als Brennstoff für Kernreaktoren benutzten leichten Uranisotops  $^{235}\text{U}$  wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe das Trenndüsenverfahren entwickelt /1-8/. Beim Trenndüsenverfahren beruht die Entmischung der Uranisotope auf der Massenabhängigkeit der Zentrifugalkraft in einer schnellen, gekrümmten Strömung aus gasförmigem Uranhexafluorid ( $\text{UF}_6$ ) und einem leichten Zusatzgas, das in hohem molarem Überschuß beigemischt ist. Die starke Verbesserung der Isotopentrennung durch das leichte Zusatzgas beruht wesentlich darauf, daß durch das Zusatzgas die Strahlgeschwindigkeit und damit die Zentrifugalbeschleunigung erhöht wird /1/.

Das Verfahren findet eine erste technische Anwendung in Brasilien, wo derzeit eine aus 24 Trennstufen bestehende Trenndüsenkaskade, die sogenannte "First Cascade" in Betrieb genommen wird /5-8/. Abb. 1 zeigt einen Schnitt durch eine schlitzförmige Trenndüse, wie sie gegenwärtig in der First Cascade eingesetzt wird.

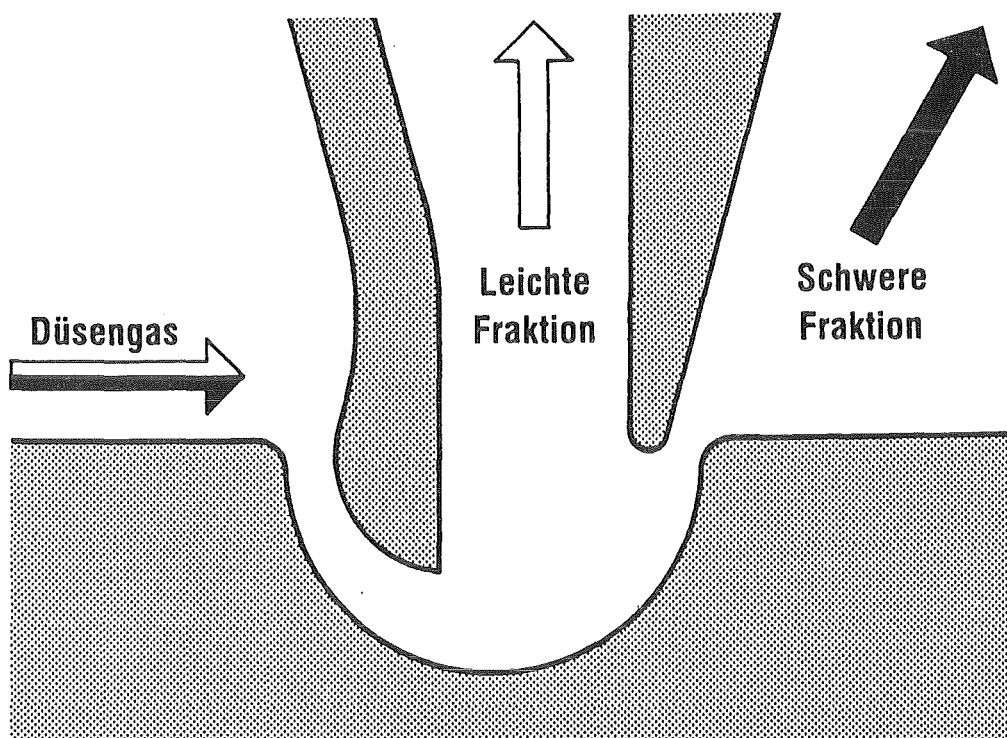


Abb. 1: Prinzip des Trenndüsenverfahrens mit einfacher Strahlumlenkung

Die für die Isotopenentmischung erforderlichen Zentrifugalkräfte werden durch Umlenkung des  $\text{UF}_6$ /Zusatzgas-Gemisches an einer gekrümmten Wand erzeugt. Am Ende der Umlenkung wird der Gasstrom durch einen keilförmigen Abschäler in eine leichte, an  $^{235}\text{UF}_6$  und Zusatzgas angereicherte Fraktion und eine schwere, an  $^{235}\text{UF}_6$  und Zusatzgas abgereicherte Fraktion aufgeteilt.

In künftigen kommerziellen Trenndüsenanlagen soll anstelle des in Abb. 1 gezeigten "Einfachumlenksystems" das sogenannte "Doppelumlenksystem" eingesetzt werden /5-8/. Wie aus Abb. 2 hervorgeht, wird beim Doppelumlenksystem die schwere Fraktion einer ersten Trenndüse in einer direkt angeschlossenen zweiten Trenndüse einer weiteren Trennung unterzogen, so daß insgesamt drei Fraktionen entstehen, die als leichte, mittlere und schwere Fraktion bezeichnet werden. Die mittlere Fraktion, deren Isotopenverhältnis etwa dem des in die erste Düse eingespeisten Gases entspricht, wird innerhalb der Trennstufe auf die Ansaugseite des Verdichters zurückgeleitet. Durch die Erzeugung und Rückführung der mittleren Fraktion wird sowohl die Isotopen- als auch die Gemischtrennung erhöht /2,9/.

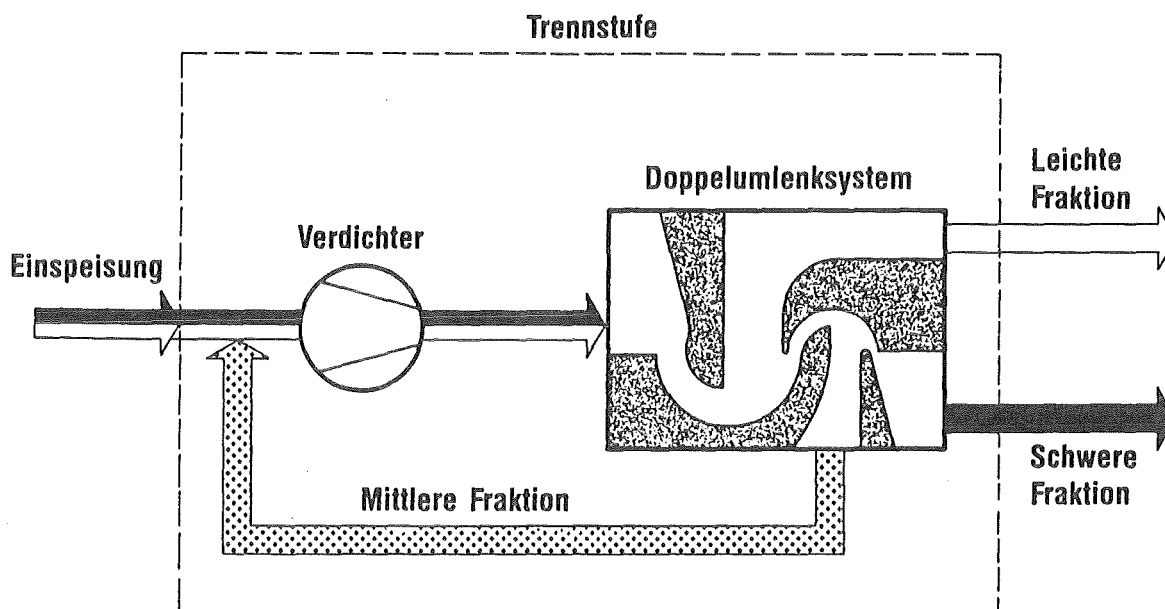


Abb. 2: Prinzip des Trenndüsenystems mit doppelter Strahlumlenkung und Schema der zugehörigen Trennstufe.

Die relative Isotopenverschiebung zwischen leichter und schwerer Fraktion beträgt etwa 2%. Der elementare Trennvorgang muß deshalb, wie bei den anderen technischen Verfahren zur Urananreicherung, in einer Kaskade vielfach wiederholt werden, um aus Natururan mit 0,72 Mol-%  $^{235}\text{U}$  Brennstoff mit dem für Leichtwasserreaktoren erforderlichen  $^{235}\text{U}$ -Gehalt von etwa 3 Mol-% zu erzeugen. Neben der gewünschten Isotopentrennung findet in der Trenndüse eine um Größenordnungen stärkere Entmischung zwischen  $\text{UF}_6$  und Zusatzgas statt, wodurch in der Kaskade ein Aufwärtstransport des Zusatzgases entsteht. Eine Anreicherung des Zusatzgases in den Kopfstufen wird verhindert, indem aus den leichten Fraktionen der Kopfstufen dieser Aufwärtstransport an Zusatzgas in einer Gemischtrennanlage entnommen und an den Kaskadenfuß zurückgespeist wird, während das abgetrennte  $\text{UF}_6$  und das restliche Zusatzgas wieder in die oberste Kaskadenstufe zurückgeführt werden.

Zu Beginn der Planungsarbeiten für Trenndüsenanlagen wurden mehrere technische Verfahren zur Trennung von  $\text{UF}_6$  und Zusatzgas verglichen /10/, wobei zwei Verfahren näher untersucht wurden

- Vorabtrennung des  $\text{UF}_6$  in einer besonderen Trenndüsenstufe und  
Feinabscheidung des  $\text{UF}_6$  in nachgeschalteten Tieftemperaturabscheidern
- Kontinuierliche Trennung von  $\text{UF}_6$  und Zusatzgas in der Gasphase  
durch eine ideale Gemischtrennkaskade /11/.

Der Vergleich beruhte auf der Verwendung damals zur Verfügung stehender Einzelumlenksysteme, sowohl bei der Vorabtrennung des  $\text{UF}_6$  als auch in der Gemischtrennkaskade. Die Untersuchungen zeigten, daß für die Gemischtrennkaskade 10 Trennstufen benötigt werden, so daß aus Kostengründen einer Gemischtrennanlage mit  $\text{UF}_6$ -Vorabtrennung und nachgeschalteter Tieftemperaturfeinabscheidung des  $\text{UF}_6$  der Vorzug gegeben wurde. Eine solche Gemischtrennanlage wird in der First Cascade eingesetzt.

Die gewählte Lösung hat jedoch den Nachteil, daß trotz der Vorabtrennung des  $\text{UF}_6$  ein Vielfaches des der Kaskade zu entnehmenden  $\text{UF}_6$ -Produktstromes in die Tieftemperaturabscheider gelangt, so daß das in den zyklisch arbeitenden Abscheidern zuviel ausgefrorene  $\text{UF}_6$  in einem "Pufferbehälter" gesammelt und kontinuierlich in die Kaskade zurückgespeist werden muß.

Durch die Zwischenpufferung werden das  $UF_6$ -Inventar und die Einstellzeiten einer Trenndüsenkaskade erhöht. Neuere Untersuchungen /12/ haben auch gezeigt, daß zur Vermeidung von Störungen der Kaskade ein hoher Aufwand für die Meß- und Regelungstechnik der aus dem Pufferbehälter zurückgespeisten  $UF_6$ -Ströme notwendig ist.

Da der auf die Produktionsleistung bezogene Investitionsaufwand bei der industriellen Realisierung des Trenndüsenverfahrens mit steigendem Verfahrensgasdruck stark abnimmt, strebt man für kommerzielle Anlagen einen möglichst hohen Verfahrensgasdruck an. Mit steigendem Verfahrensgasdruck müssen die  $UF_6$ -Abscheider entsprechend vergrößert werden. Bei einer kommerziellen Trenndüsenanlage würde dadurch bei Verwendung einer Gemischtrennanlage mit Tieftemperaturabscheidung der Kostenanteil der  $UF_6$ /Zusatzgas-Trennung stark erhöht. Im Gegensatz dazu ist der Kostenanteil einer Gemischtrennkaskade unabhängig vom Verfahrensgasdruck, da für die Gemisch- und Isotopentrennung die gleiche Technologie eingesetzt und somit die gleiche Kostenstruktur erreicht wird.

Untersuchungen zum Einsatz von Doppelumlenksystemen in einer Gemischtrennanlage zeigten, daß durch eine Erhöhung des Gasstromes der mittleren Fraktion auf die Ansaugseite des Verdichters die Trennung zwischen  $UF_6$  und Zusatzgas wesentlich verbessert wird. Bei gleichen Betriebsbedingungen kann, im Vergleich zu einem Einzelumlenksystem, die Gemischtrennung um eine Größenordnung verbessert werden, während das Verdichteransaugvolumen nur um 50% erhöht werden muß. Beim Einsatz von Doppelumlenksystemen in einer Gemischtrennanlage scheint deshalb das Verfahren einer gasdynamischen  $UF_6$ /Zusatzgas-Trennung für kommerzielle Trenndüsenanlagen auch aus Investitionsgründen wieder attraktiv zu sein, da statt der 10 Gemischtrennstufen wie in /11/ infolge der beim Einsatz von Doppelumlenksystemen um etwa eine Größenordnung erhöhten Gemischtrennung wesentlich weniger Gemischtrennstufen benötigt werden. Die Betriebsbedingungen der Stufen der Gemischtrennkaskade unterscheiden sich dabei wesentlich von den Betriebsbedingungen der Stufen der Isotopentrennkaskade.

**Ziel der vorliegenden Arbeit** war es, Richtlinien für den Aufbau und die Betriebsweise von Gemischtrennkaskaden - basierend auf dem Einsatz von Doppelumlenksystemen - zu erarbeiten. Dazu sollte zuerst der Einfluß der beim Einsatz eines Doppelumlenksystems in einer Gemischtrennstufe gegenüber dem Einsatz in einer Trennstufe zur Isotopentrennung stark abweichenden Betriebsbedingungen auf die Gemischtrennung systematisch untersucht werden. Da die  $UF_6$ -Konzentrationen in der Gemischtrennkaskade niedriger als in der Isotopentrennkaskade sind, war zur Messung niedriger  $UF_6$ -Konzentrationen bis unter 1 ppm eine geeignete Meßtechnik bereitzustellen.

Die Untersuchungen sollten unter der Randbedingung durchgeführt werden, daß auch in der Gemischtrennkaskade zweistufige Radialverdichter der für das Trenndüsenverfahren konventionellen Bauart verwendet werden, deren Radumfangsgeschwindigkeit zum Erreichen möglichst hoher Kompressionsverhältnisse gegenüber den Verdichtern der Isotopentrennkaskade auf 460 m/s erhöht wird. Um die notwendigen Expansionsverhältnisse an den Trenndüsen zu erhalten, müssen trotzdem mehrere solcher Verdichter in Serie geschaltet werden.

Die **Auswahl** sowohl der **Anzahl** der in den Gemischtrennstufen eingesetzten **Verdichter**, als auch der **Anzahl** der **Gemischtrennstufen** der Gemischtrennkaskade sollte ebenso wie die **Wahl** der **Betriebsbedingungen** der Gemischtrennstufen unter **wirtschaftlichen Gesichtspunkten** erfolgen. Hierzu waren die **spezifischen Investitionskosten** für die Gesamtanlage, die aus Isotopen- und Gemischtrennkaskade besteht, zu minimieren. Die spezifischen Investitionskosten ergeben sich aus dem Verhältnis der Investitionskosten für die Gesamtanlage zur Trennleistung der Isotopentrennkaskade, abzüglich der Trennleistungsverluste durch  $UF_6$ -Restmengen, die auf Grund der nicht vollständigen  $UF_6$ /Zusatzgas-Trennung in der Gemischtrennkaskade in dem Zusatzgasrückstrom verbleiben, der vom Kopf zum Fuß der Isotopentrennkaskade zurückgeführt wird.

Die Untersuchungen zur **Betriebsweise** von **Gemischtrennkaskaden** zeigen, daß es trotz der gewählten symmetrischen Kaskadenschaltung günstig ist, die An- und Abreicherungs-faktoren in den einzelnen Stufen unterschiedlich einzustellen und somit die Gemischtrennung in einer "nicht idealen Kaskade" durchzuführen. Die  $UF_6$ -Endkonzentration des zum Kaskadenfuß zurückgeführten Zusatzgasstromes wird durch die Vermischung von Gasströmen unterschiedlicher  $UF_6$ -Konzentrationen nicht wesentlich verändert, da die vermischten Gasströme stark unterschiedliche Molstromstärken besitzen und deshalb die Konzentration des kaskadenaufwärts gerichteten Zusatzgasstromes an den Vermischungsstellen kaum beeinflusst wird. Es hat sich weiterhin als günstig erwiesen, die oberen Gemischtrennstufen mit einem Zusatzgasabschälverhältnis zu betreiben, das deutlich geringer ist als das Zusatzgasabschälverhältnis der gesamten Gemischtrennkaskade. Zur Aufrechterhaltung der geforderten Zusatzgasbilanzen am Kaskadenkopf werden innerhalb der Gemischtrennkaskade Zirkulationsströme erzeugt, die - ähnlich den Zirkulationsströmen innerhalb einer Gemischtrennstufe durch die zurückgeführte mittlere Fraktion eines Doppelumlenksystems - den Durchsatz durch die Verdichter vergrößern. Durch diese Maßnahmen ist es möglich, die in den Trennelementen erzielte Gemischtrennung besser für die Zusatzgasanreicherung zu nutzen, so daß die Zahl der Gemischtrennstufen bzw. die spezifischen Investitionskosten reduziert werden können.

Da die gasdynamischen Eigenschaften eines He/ $UF_6$ -Gemisches (Zähigkeit, mittlere Masse, Strömungsgeschwindigkeit), welches  $UF_6$  lediglich in Spuren enthält, durch das  $UF_6$  nur noch geringfügig beeinflusst werden, kann ab einer Konzentration kleiner 0,1 Mol-%  $UF_6$  im Rahmen der Meßgenauigkeit kein Einfluß der Düsengaskonzentration auf die Gemischtrennung mehr beobachtet werden. Bei der Auslegung einer Gemischtrennkaskade genügt es deshalb, die Optimierung der Betriebsbedingungen nur für die ersten beiden Gemischtrennstufen durchzuführen, da schon die Düsengaskonzentration der zweiten Gemischtrennstufe bei etwa 0,1 Mol-%  $UF_6$  in Helium liegt.

Im Gegensatz hierzu unterscheiden sich die Betriebsbedingungen der ersten Gemischtrennstufe infolge der relativ hohen Düsengaskonzentration (0,6 bis 1 Mol-%  $UF_6$  in Helium) sehr deutlich von den übrigen Gemischtrennstufen, da die relativ hohe Düsengaskonzentration sowohl die Gemischtrennung im Trennelement, als auch das Kompressionsverhältnis der Verdichter stark beeinflusst.

Die Untersuchungen zum Einfluß des Expansionsverhältnisses auf die Gemischtrennung zeigen, daß der Gemischtrennfaktor über einen weiten Bereich nahezu linear mit dem Expansionsverhältnis ansteigt, sofern die Trenndüsen mit dem für die Gemischtrennung optimalen Düsenvordruck betrieben werden. Einer Anwendung relativ hoher Expansionsverhältnisse steht jedoch entgegen, daß aufgrund des fest vorgegebenen Ansaugdrucks der Verdichter mit zunehmendem Expansionsverhältnis auch der Düsenvordruck ansteigt. Will man im optimalen Düsenvordruck für die Gemischtrennung arbeiten, so müssen bei relativ hohen Expansionsverhältnissen die Umlenk radien der Trennelemente der Gemischtrennkaskade gegenüber den Umlenk radien der Trennelemente der Isotopentrennkaskade **verkleinert** werden.

Aufgrund der relativ niedrigen  $UF_6$ -Konzentration ist das mit einem zweistufigen Radialverdichter erreichbare Expansionsverhältnis zu gering, um in einer Trennstufe die notwendigen Gemischtrennfaktoren zu erreichen, so daß mindestens zwei Verdichter hintereinander geschaltet werden müssen. In den oberen Trennstufen entspricht bei einer Serienschaltung von zwei Verdichtern das am Trennelement zur Verfügung stehende Expansionsverhältnis etwa dem Expansionsverhältnis in der Isotopentrennkaskade, so daß auch die Verwendung von gleich großen Trennelementen in beiden Kaskaden optimal ist. In der ersten Stufe der Gemischtrennkaskade wird durch zwei und in den oberen Stufen durch drei hintereinander geschaltete Verdichter schon ein so hohes Kompressionsverhältnis erzeugt, daß die Trennelemente dann im optimalen Betriebspunkt arbeiten, wenn die Umlenk radien um einen Faktor zwei kleiner sind als in der Isotopentrennkaskade.

Die Anforderungen an die Gemischtrennkaskade hängen wesentlich vom Aufbau der betrachteten Isotopentrennkaskade ab. So muß die  $UF_6$ -Endkonzentration des zum Fuß der Isotopentrennkaskade zurückgeführten Zusatzgasstromes mit zunehmender Stufenzahl der Isotopentrennkaskade abnehmen, da ein immer größer werdender Isotopengradient von diesem Strom überbrückt wird. Zum Erreichen einer vorgegebenen  $UF_6$ -Endkonzentration müssen in der Gemischtrennkaskade um so höhere Gemischtrennfaktoren erreicht werden, je größer die Gemischtrennung in der Isotopentrennkaskade ist, d. h. daß beim Einsatz von Doppelumlenksystemen in der Isotopentrennkaskade in den Gemischtrennstufen höhere Gemischtrennfaktoren erzielt werden müssen als beim Einsatz von Einzelumlenksystemen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die als Extremfälle zu betrachtenden Isotopentrennkaskaden der optimale Aufbau und die optimale Betriebsweise von Gemischtrennkaskaden untersucht. Es zeigte sich, daß für Rechteck-Isotopentrennkaskaden, die Reaktormaterial im Recycling-Betrieb erzeugen, eine dreistufige Gemischtrennkaskade mit jeweils zwei hintereinander geschalteten Verdichtern in den Gemischtrennstufen am kostengünstigsten ist. Bei Rechteck-Isotopentrennkaskaden, die in einem Schritt auf einen  $^{235}U$ -Gehalt von etwa 3 Mol-% anreichern, ist es am günstigsten, die Gemischtrennkaskade um eine Gemischtrennstufe mit ebenfalls zwei Verdichtern zu erweitern.

Da die Herstellung von sehr kleinen Trennelementen eventuell mit technischen Schwierigkeiten verbunden sein könnte, werden für die Auslegung dieser Gemischtrennkaskaden mit jeweils zwei hintereinander geschalteten Verdichtern in allen Stufen nur Trennelemente eingesetzt, deren Umlenkradien den Trennelementen der Isotopentrennkaskade entsprechen. Falls jedoch solche kleinen Trennelemente zur Verfügung stehen, ist es auch möglich, in den oberen Gemischtrennstufen drei Verdichter hintereinander zu schalten, wodurch meist eine Gemischtrennstufe eingespart werden könnte. Diese Hintereinanderschaltung von drei Verdichtern ist jedoch nur mit einer Verringerung der absoluten Investitionskosten oder des spezifischen Energieverbrauchs verbunden, während die spezifischen Investitionskosten nahezu unverändert bleiben und die benötigte Trennelementschlitzlänge zunimmt.



## 2. Beschreibung des Trennelementes und der Versuchsanordnung

In diesem Kapitel werden die zur Beschreibung der Gemischtrennung in einem Doppelumlenksystem benötigten Kenngrößen eingeführt. Der Aufbau der zur Bestimmung dieser Kenngrößen verwendeten Versuchsanordnung wird erläutert.

### 2.1 Kenngrößen eines Doppelumlenksystems

Die zur Kennzeichnung eines Doppelumlenksystems wichtigsten Kenngrößen sind in Abb. 3 dargestellt. Der Molstrom  $L_G^I$  mit der  $UF_6$ -Konzentration  $N_0$  und dem Druck  $p_0$  wird dem ersten Trennsystem (Düse I) des Doppelumlenksystems zugeführt. Die leichte Fraktion des ersten Trennsystems stellt gleichzeitig die leichte Fraktion des Gesamtsystems mit der  $UF_6$ -Konzentration  $N_L$  und dem Absaugdruck  $p_L$  dar. Die schwere Fraktion des ersten Trennsystems  $N_S^I$  bildet das Düsengas des zweiten Trennsystems (Düse II) mit der  $UF_6$ -Konzentration  $N_0^{II}$  und wird dort in zwei weitere Fraktionen aufgeteilt. Die leichte Fraktion des zweiten Trennsystems wird als mittlere Fraktion - mit der  $UF_6$ -Konzentration  $N_M$  und dem Absaugdruck  $p_M$  - bezeichnet. Die schwere Fraktion des zweiten Trennsystems mit der  $UF_6$ -Konzentration  $N_S$  und dem Absaugdruck  $p_S$  stellt die schwere Fraktion des Gesamtsystems dar. In einer Trenndüsenkaskade wird die mittlere Fraktion vor den Verdichter der Trennstufe zurückgespeist (Abb. 2). Die sich bei der Verschaltung des Doppelumlenksystems ergebenden Kenngrößen einer Trennstufe werden in analoger Weise wie für die Einzeldüsen definiert und als Stufengrößen bezeichnet. Der Stufendurchsatz  $L_G^{St}$  ist um den innerhalb der Trennstufe zurückgeführten Molstrom der mittleren Fraktion geringer als der Molstrom  $L_G^I$ , der dem Trennelement zugeführt wird.

Als partielles Abschälverhältnis  $\theta_i^k$  der Komponente  $i$  und des Trennsystems  $k$  wird das Verhältnis des Molstroms der Komponente  $i$  in der leichten Fraktion des Trennsystems  $k$  zu dem Gesamt molstrom dieser Komponente  $i$  durch dieses Trennsystem  $k$  bezeichnet:

Molstrom der Komponente  $i$  in der leichten Fraktion des Trennsystems  $k$   
 $\theta_i^k = \frac{\text{Molstrom der Komponente } i \text{ in der leichten Fraktion des Trennsystems } k}{\text{Gesamt molstrom der Komponente } i \text{ durch das Trennsystem } k}$

mit  $i = \text{Gemisch (G), Zusatzgas (Z), UF}_6 \text{ (U)}$   
 $k = \text{erste Düse (I), zweite Düse (II), Stufe (St)}$

Zur Berechnung der partiellen Abschälverhältnisse aus den Konzentrationen bei den Trennversuchen werden zuerst die Gemischabschälverhältnisse der beiden Einzeldüsen, d. h. das Verhältnis der Gesamt molströme in den Fraktionen berechnet:

$$\theta_G^k = \frac{N_S^k - N_0^k}{N_S^k - N_L^k} \quad (1.1)$$

mit  $k = \text{I, II}$

Aus den Gemischabschälverhältnissen können die  $\text{UF}_6$ - und Zusatzgas-Abschälverhältnisse der beiden Einzeldüsen berechnet werden:

$$\theta_U^k = (N_L^k / N_0^k) \cdot \theta_G^k \quad (1.2)$$

$$\theta_Z^k = \frac{(1 - N_L^k)}{(1 - N_0^k)} \cdot \theta_G^k \quad (1.3)$$

mit  $k = \text{I, II}$

Die Berechnung der Stufenabschälverhältnisse aus den Abschälverhältnissen der beiden Einzeldüsen erfolgt nach folgender Beziehung:

$$\theta_i^{\text{St}} = \theta_i^{\text{I}} / [\theta_i^{\text{I}} + (1 - \theta_i^{\text{I}}) \cdot (1 - \theta_i^{\text{II}})] \quad (1.4)$$

mit  $i = \text{G, Z, U}$

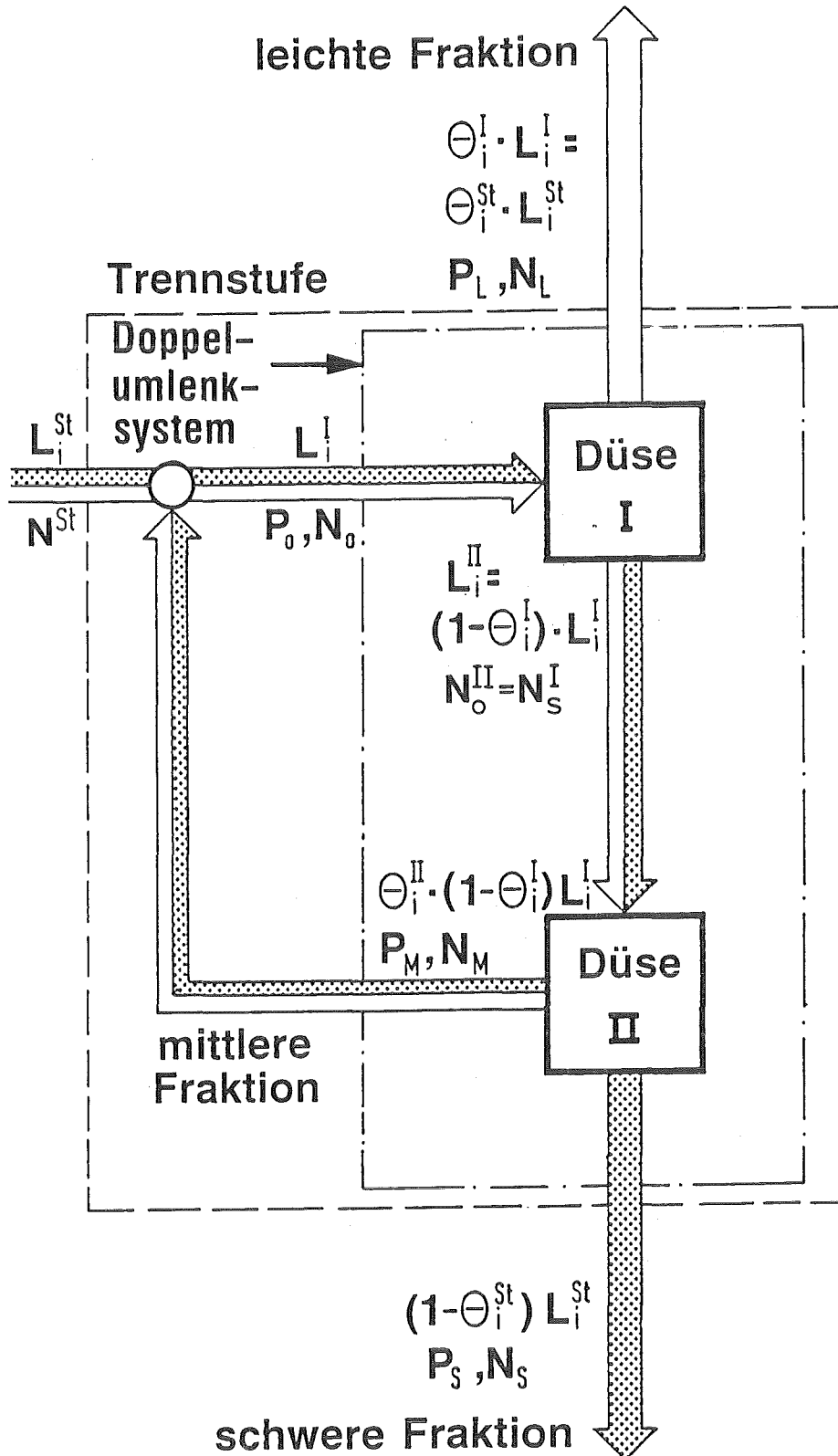


Abb. 3: Ersatzschaltbild eines Doppelumlenksystems mit den wichtigsten Kenngrößen.

$i$  = Gemisch (G), Zusatzgas (Z),  $UF_6$  (U)

Die Erhöhung des Gasdurchsatzes  $L_G^I$  durch das Trennelement gegenüber dem Stufendurchsatz  $L_G^{St}$  aufgrund des stufenintern zirkulierten Stroms der mittleren Fraktion läßt sich aus dem Verhältnis der Gemischabschälverhältnisse der Gesamtstufe zum ersten Trennsystem berechnen:

$$L_G^I / L_G^{St} = \theta_G^{St} / \theta_G^I \quad (2.1)$$

Der stufenintern zirkulierte Gasstrom  $Z^{St}$  der mittleren Fraktion ergibt sich aus (2.1) zu:

$$Z^{St} = L_G^I / L_G^{St} - 1 \quad (2.2)$$

Als Maß für die Zusatzgas-Anreicherung in einer Trenndüse wird der **Anreicherungsfaktor**  $\alpha$  herangezogen.

$$\alpha^k = \frac{N_o^k \cdot (1 - N_L^k)}{N_L^k \cdot (1 - N_o^k)} \quad (3.1)$$

Analog wird für die Zusatzgas-Abreicherung in einer Trenndüse der **Abreicherungsfaktor**  $\beta$  definiert:

$$\beta^k = \frac{N_S^k \cdot (1 - N_o^k)}{N_o^k \cdot (1 - N_S^k)} \quad (3.2)$$

Das Produkt aus Anreicherungs- und Abreicherungsfaktor wird als **Gemisch-trennfaktor**  $A$  bezeichnet:

$$A^k = \alpha^k \cdot \beta^k \quad (3.3)$$

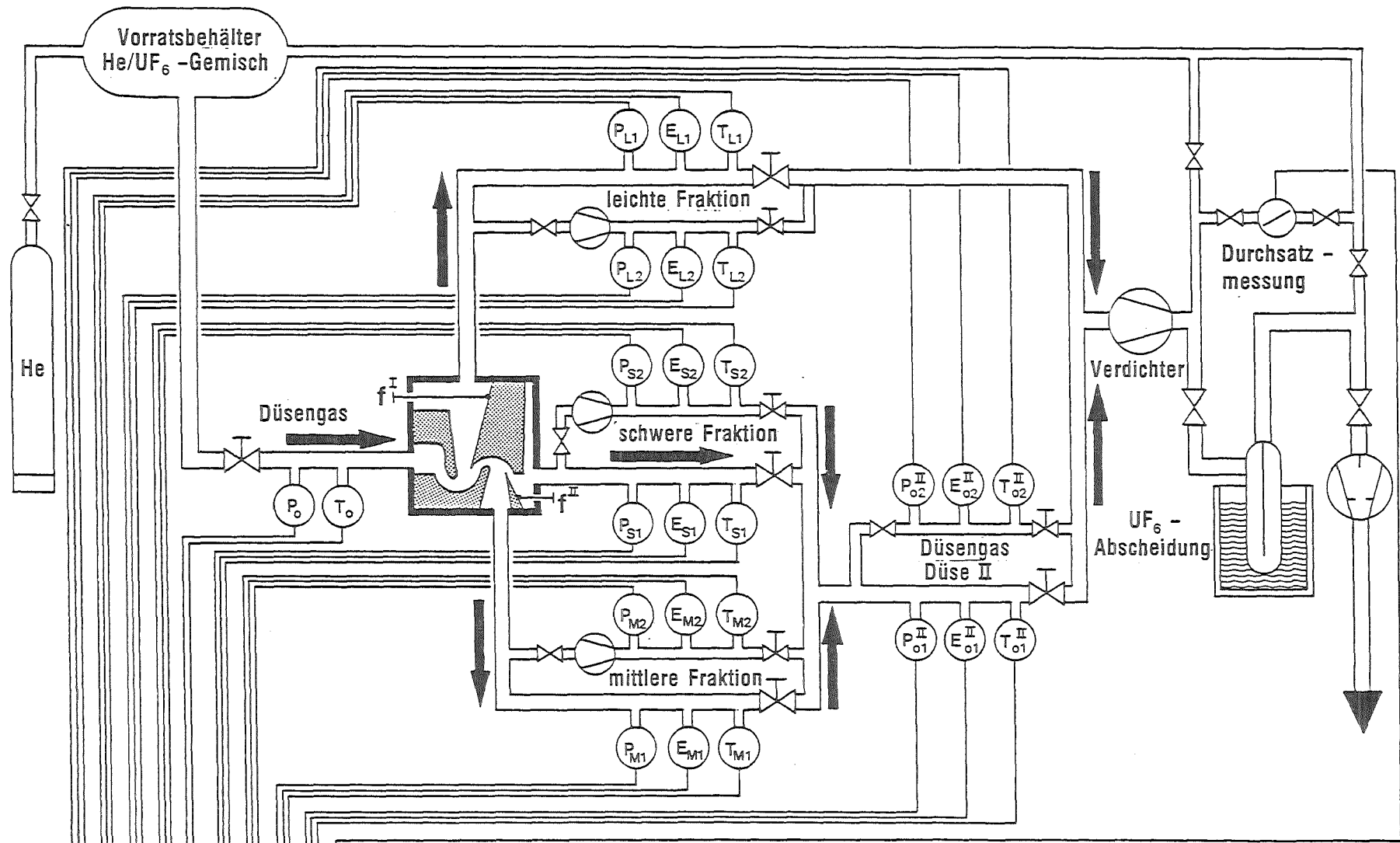
mit  $k = I, II, St$

## 2.2 Beschreibung der Versuchsapparatur

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Messungen wurden an der Trennapparatur II des Instituts für Kernverfahrenstechnik durchgeführt. Abb. 4 zeigt ein vereinfachtes Fließbild dieser Trennapparatur. Die Versuchsdurchführung der Trennversuche erfolgt im "Kreislaufbetrieb", d. h. ein Gasgemisch aus einem Vorratsbehälter (Volumen 1,5 m<sup>3</sup>) wird einem Doppelumlenksystem zugeführt und dort in die drei Absaugfraktionen (leicht, mittel, schwer) aufgeteilt. Nach der Messung der Drücke und Konzentrationen in diesen Fraktionen werden zuerst die Gasströme der mittleren und schweren Fraktion wieder zum Düsengas des zweiten Trennsystems zusammengeführt und dessen Konzentration gemessen. Anschließend wird auch die leichte Fraktion wieder zugemischt und der Gesamtgasstrom von einem UF<sub>6</sub>-festen Spiralverdichter komprimiert und über ein Durchsatzmeßgerät in den Vorratsbehälter zurückgepumpt. Die Trennversuche können dadurch ohne Gemischverlust durchgeführt werden, so daß ein zeitraubendes Neuansetzen von Gemischen bei langen Versuchsreihen vermieden wird.

Bei den Trennversuchen werden der Düsenvordruck  $p_0^{\text{Lab}}$  und die Drücke in den Absaugfraktionen durch Handregelventile eingestellt. Der Düsenvordruck wird über eine Regelautomatik konstant gehalten. Alle Drücke werden mit Präzisions-Druckaufnehmern gemessen und gleichzeitig angezeigt, so daß die für einen Trennversuch vorgegebenen Expansionsverhältnisse leicht eingestellt werden können.

Da zur Bestimmung z. B. des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta_Z^{\text{St}}$  oder des stufeninternen Zirkulationsstromes  $Z^{\text{St}}$  umfangreiche Rechenoperationen notwendig sind, können die hierfür vorgegebenen Sollwerte nur mit Hilfe eines on-line Prozeßrechners eingestellt werden.



Meßwertumschalter		
Digitalvoltmeter		
Rechner		
Bildschirm	Drucker	Speicher

T = Temperaturmessung  
P = Druckmessung  
E = Ausgangssignal  
Prozessphotometer

Abb.4: Vereinfachtes Fließschema der Versuchsanordnung

Zur Berechnung der partiellen Abschälverhältnisse, des stufeninternen Zirkulationsstromes  $Z^{St}$  und der Gemischtrennfaktoren (Abschn. 2.1) beider Einzeldüsen und der Stufe werden die Düsengaskonzentrationen beider Trennsysteme  $N_0$  und  $N_0^{II}$  und die Konzentrationen in den drei Absaugfraktionen  $N_L$ ,  $N_M$ ,  $N_S$  benötigt. Die on-line Messung der Konzentrationen (außer der Düsengaskonzentration des ersten Trennsystems  $N_0$ , die durch Ansetzen des Gasgemisches bekannt ist) erfolgt mit Infrarot-Prozeßphotometern vom Typ SPECTRAN<sup>\*</sup>), die im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben werden.

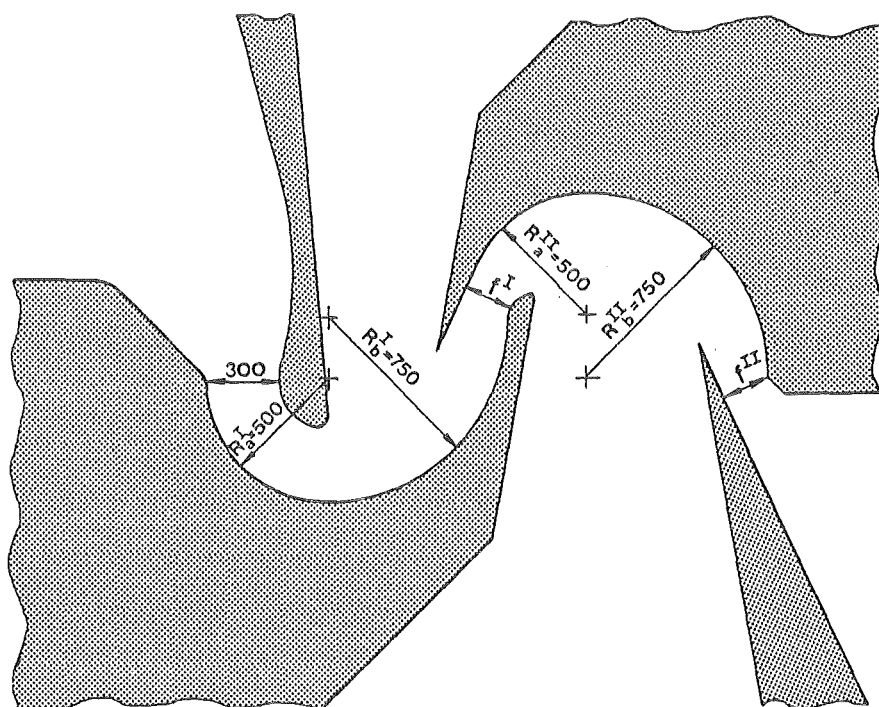


Abb. 5: Bezeichnungen und charakteristische Abmessungen (in µm) des für die Trennversuche verwendeten Labortrennelements Nr. 424

Alle Trennversuche wurden mit dem in Abb. 5 gezeigten Labortrennelement Nr. 424 durchgeführt. Trennelement 424 ist ein biradiales Doppelumlenk-System mit gleich großen Umlenkradien des ersten und zweiten Trennsystems, wobei die Radien auf der zweiten Hälfte der Umlenkung um 50 % größer sind als auf der ersten Hälfte. Die Abschälterweiten  $f^I$  und  $f^{II}$  der beiden Trennsysteme können ohne Ausbau des Trennelements kontinuierlich verändert werden /13/.

<sup>\*</sup>) Hersteller Bodenseewerk Geosystem GmbH (Überlingen)

### 2.3 Messung der UF<sub>6</sub>-Konzentrationen

Das Meßprinzip des gemeinsam vom Kerforschungszentrum Karlsruhe und der Bodenseewerk Geosystem GmbH entwickelten Infrarot-Prozeßphotometers ist in /14/ ausführlich beschrieben. Zur Bestimmung der Konzentration  $N_{\text{UF}_6}$  wird die Teilchendichte  $\nu_{\text{UF}_6}$  gemessen, indem ein Lichtstrahl eine vom Verfahrensgas (UF<sub>6</sub>/Zusatzgas-Gemisch) durchströmte Prozeßgasküvette mit der optischen Weglänge  $l$  durchläuft, wobei infolge der Absorption der infraroten Strahlung durch das UF<sub>6</sub> die Anfangsintensität  $I_0$  bei ausreichend kleiner UF<sub>6</sub>-Teilchendichte entsprechend dem Beer'schen Gesetz auf den Wert

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha_{\text{UF}_6}(T) \cdot \nu_{\text{UF}_6} \cdot l} \quad (4.1)$$

abfällt. Durch Messung des Quotienten  $I/I_0$  kann aus (4.1) bei vorher ermitteltem Absorptionskoeffizienten  $\alpha_{\text{UF}_6}(T)$  und bekannter Gastemperatur  $T$  die Dichte  $\nu_{\text{UF}_6}$  bzw. der Partialdruck

$$p_{\text{UF}_6} = \nu_{\text{UF}_6} \cdot k \cdot T_{\text{UF}_6} \quad (4.2)$$

( $k$  = Boltzmann Konstante)

berechnet werden. Durch zusätzliche Messung des Gesamtdruckes  $p_{\text{Ges}}$  ist eine Bestimmung der Konzentration

$$N_{\text{UF}_6} = p_{\text{UF}_6} / p_{\text{Ges}} \quad (4.3)$$

möglich. Durch einen Filter vor dem Infrarot-Empfänger erfolgt die Messung der Abschwächung der infraroten Strahlung selektiv nur im Wellenlängenbereich der stärksten Absorptionsbande des UF<sub>6</sub>.



Zur Bestimmung des Konzentrationsverlaufs innerhalb der Gemischtrennkaskade müssen die Konzentrationen in den Fraktionen der einzelnen Gemischtrennstufen gemessen werden. Die Konzentrationen variieren dabei von ca. 25 Mol-%  $UF_6$  (schwere Fraktion der ersten Gemischtrennstufe) bis unter 1 ppm (leichte Fraktion der letzten Gemischtrennstufe). Innerhalb einer Fraktion variieren die Konzentrationen in den verschiedenen Gemischtrennstufen nur um vier Dekaden, doch kann auch dieser Meßbereich nicht mit einem Meßsystem alleine überdeckt werden. Eine Beeinflussung des Meßbereichs der Prozeßphotometer ist sowohl über die optische Weglänge  $l$  der Prozeßgasküvetten, als auch über den Gesamtdruck  $p_{Ges}$  des Gasgemisches möglich. An der Versuchsanordnung werden beide Möglichkeiten zur Anpassung des Meßbereiches an die Meßaufgabe benutzt.

Abb. 6 zeigt die Kennlinie eines Prozeßphotometers im linearen Arbeitsbereich. Aufgetragen ist das Ausgangssignal des Prozeßphotometers  $E$  in Volt über dem Produkt aus optischer Weglänge der Küvette  $l$  [cm] und dem  $UF_6$ -Partialdruck  $p_{UF_6}$  [mbar], so daß die Kennlinie unabhängig von der optischen Weglänge der Küvette ist. Bei bekanntem Gesamtdruck  $p_{Ges}$  kann aus Abb. 6 für einen gewünschten Konzentrationsbereich die optimale optische Weglänge einer Küvette ermittelt werden.

Tabelle 1 zeigt die bei den Messungen zur Bestimmung des Konzentrationsverlaufs in der Gemischtrennkaskade verwendeten optischen Weglängen  $l$  der Prozeßgasküvetten in den einzelnen Fraktionen.

Fraktion	leicht	mittel	schwer	$N_0^{II}$
Standardküvetten	40	10	1	6
Sonderküvetten	2000	100	10	50

Tab. 1: Optische Weglängen der Prozeßgasküvetten [cm].

Die Standardküvetten werden zur Messung der Konzentrationen bei Trennversuchen für die erste Gemischtrennstufe mit typischen Werten für die Düsenkonzentration  $N_0$  von 0,6 bis 1 Mol-%  $UF_6$  benutzt.

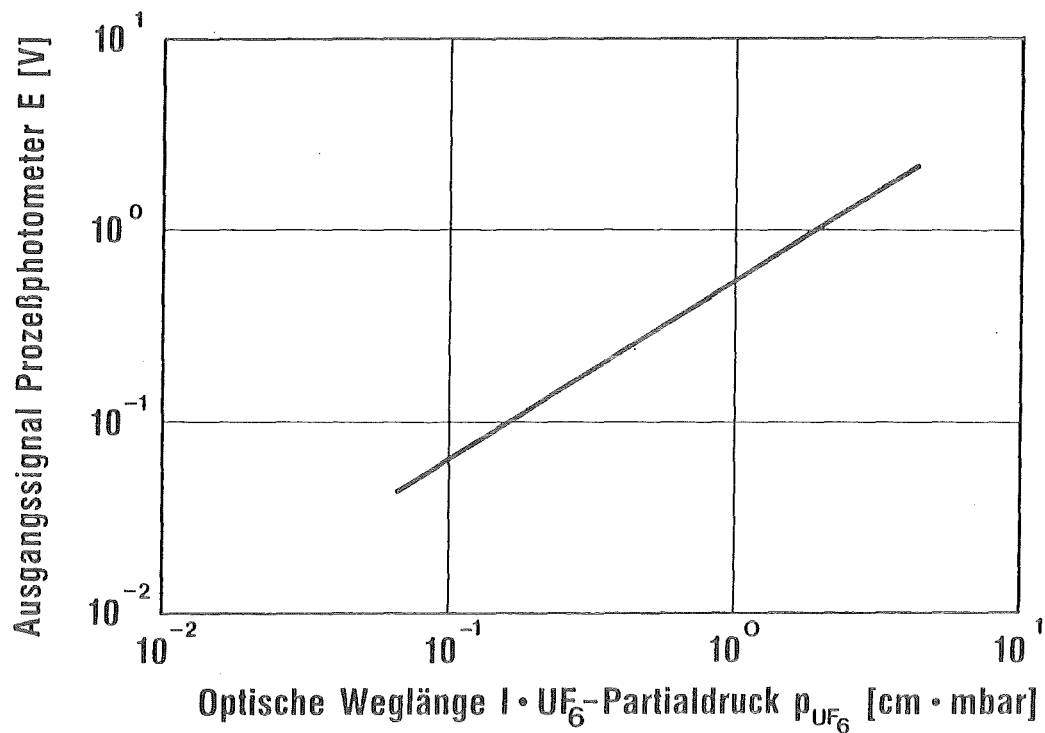


Abb. 6: Kennlinie eines Prozeßphotometers im linearen Arbeitsbereich

Die Sonderküvetten werden bei Untersuchungen für die oberen Gemischtrennstufen mit Düsengaskonzentrationen  $N_0 < 0,1$  Mol-% UF<sub>6</sub> eingesetzt. Für diese Sonderküvetten wurde durch je einen zusätzlichen Spiralverdichter auch die Möglichkeit geschaffen, den Gesamtdruck  $p_{\text{Ges}}$  in der Küvette unabhängig von den Absaugdrücken am Trennelement (ca. 10 mbar) bis auf maximal 80 mbar kontinuierlich zu erhöhen (Abb. 4). Alle Küvetten, die länger als 40 cm sind, werden durch Heizmanschetten auf konstanter Temperatur (30°C) gehalten. Dadurch wird eine Schwankung der Temperatur des Küvettenkörpers und die damit verbundene Nullpunktsdrift verhindert.

Die optische Weglänge  $l=20$  m der Sonderküvette in der leichten Fraktion wird durch Vielfachreflexion der Infrarot-Strahlung an mit Gold beschichteten Spiegeln erzeugt /14/. Die geometrische Länge dieser speziell zum  $UF_6$ -Spurennachweis entwickelten Prozeßgas-Langwegküvette beträgt nur ca. 80 cm, die Nachweisgrenze für  $UF_6$  liegt bei 80 mbar Gesamtdruck bei ca. 0,4 ppm.

Vor dem Einsatz zur  $UF_6$ -Konzentrationsmessung müssen die Meßsysteme, die aus Prozeßphotometer, Prozeßgasküvette, Druckaufnehmer und Temperaturfühler bestehen, kalibriert werden. Die Kalibrierung erfolgt mit Hilfe eines  $UF_6$ /Zusatzgas-Gemisches dessen  $UF_6$ -Konzentration dem Meßbereich des jeweiligen Meßsystems entsprechend gewählt wird. Durch Variation des Gesamtdrucks  $p_{Ges}$  wird die Kennlinie des Meßsystems aufgenommen und nach einem Fit der Meßpunkte im Prozeßrechner zur Berechnung der  $UF_6$ -Konzentration bei den Trennversuchen abgespeichert. Durch Kalibrierungen bei verschiedenen Temperaturen wird die Temperaturabhängigkeit des  $UF_6$ -Absorptions-Koeffizienten berücksichtigt. Das Verfahren der Kalibrierung eines Meßsystems mit der Prozeßgas-Langwegküvette, sowie die Herstellung der dafür benötigten  $UF_6$ /He-Gemische mit Konzentrationen bis herab zu 1 ppm  $UF_6$  ist in /15/ ausführlich beschrieben.

Der Fehler bei der Bestimmung der  $UF_6$ -Konzentrationen setzt sich aus den Meßfehlern des Prozeßphotometers, des Druckaufnehmers, des Temperaturfühlers, sowie dem Fehler bei der Kalibrierung (Fehler beim Ansetzen des  $UF_6$ /Helium-Gemisches) des Meßsystems zusammen. Eine Fehleranalyse ergab, daß der **mittlere Fehler** bei der Bestimmung der  $UF_6$ -Konzentrationen  $\pm 2$  % relativ beträgt.

### 3. Theoretische Grundlagen einer Gemischtrennkaskade

In diesem Kapitel wird der Aufbau einer Gemischtrennkaskade erläutert. Die Abhängigkeiten der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta_Z^{St}$  und der Gemischtrennfaktoren  $A^{St}$  von der an die Gemischtrennkaskade gestellten Trennaufgabe werden hergeleitet und an Beispielen diskutiert.

#### 3.1 Aufbau einer Gemischtrennkaskade

Um die Investitionskosten für die Gemischtrennkaskade so niedrig wie möglich zu halten, wird die Verschaltung der Gemischtrennstufen gewählt, die zu minimaler Stufenzahl führt. Diese als "symmetrische Kaskadenschaltung" bezeichnete Verschaltung entspricht, wie Abb. 7 zeigt, einer einfachen Serienschaltung der Gemischtrennstufen, bei welcher die leichte Fraktion der Gemischtrennstufe  $s$  zur Stufe  $s+1$  weitergeleitet und die schwere Fraktion vor die Stufe  $s-1$  zurückgeführt wird. Die leichte Fraktion der letzten Gemischtrennstufe  $S$ , welche möglichst  $UF_6$ -frei sein sollte, wird an den Fuß der Isotopentrennkaskade zurückgespeist. Die schwere Fraktion der ersten Gemischtrennstufe wird vor die oberste Stufe der Isotopentrennkaskade zurückgeführt (Abb. 8). Bei richtiger Einstellung der Zusatzgasabschälverhältnisse der Gemischtrennstufen wird der sich durch die Gemischtrennung in den Stufen der Isotopentrennkaskade ergebende, kaskadenaufwärts gerichtete Nettostrom des Zusatzgases zum Fuß der Isotopentrennkaskade zurückgespeist und alle Stufen der Isotopentrennkaskade arbeiten mit gleichen Betriebsbedingungen, insbesondere mit gleichen Düsengaskonzentrationen.

Da mit einer Gemischtrennkaskade das  $UF_6$  abgereichert werden soll, nimmt im Gegensatz zur Isotopentrennkaskade die Düsengaskonzentration in der Gemischtrennkaskade von Stufe zu Stufe stark ab. Zum Erreichen einer möglichst hohen  $UF_6$ -Abreicherung müssen in den Gemischtrennstufen kleine  $UF_6$ -Abschälverhältnisse, bzw. hohe Anreicherungsfaktoren für das Zusatzgas, erzielt werden. Um auch bei niedrigen Düsengaskonzentrationen hohe Expansionsverhältnisse und damit hohe Gemischtrennfaktoren erreichen zu können, müssen in den Gemischtrennstufen mehrere Verdichter in Serie geschaltet werden. Hierauf wird in Abschn. 4.3 näher eingegangen.

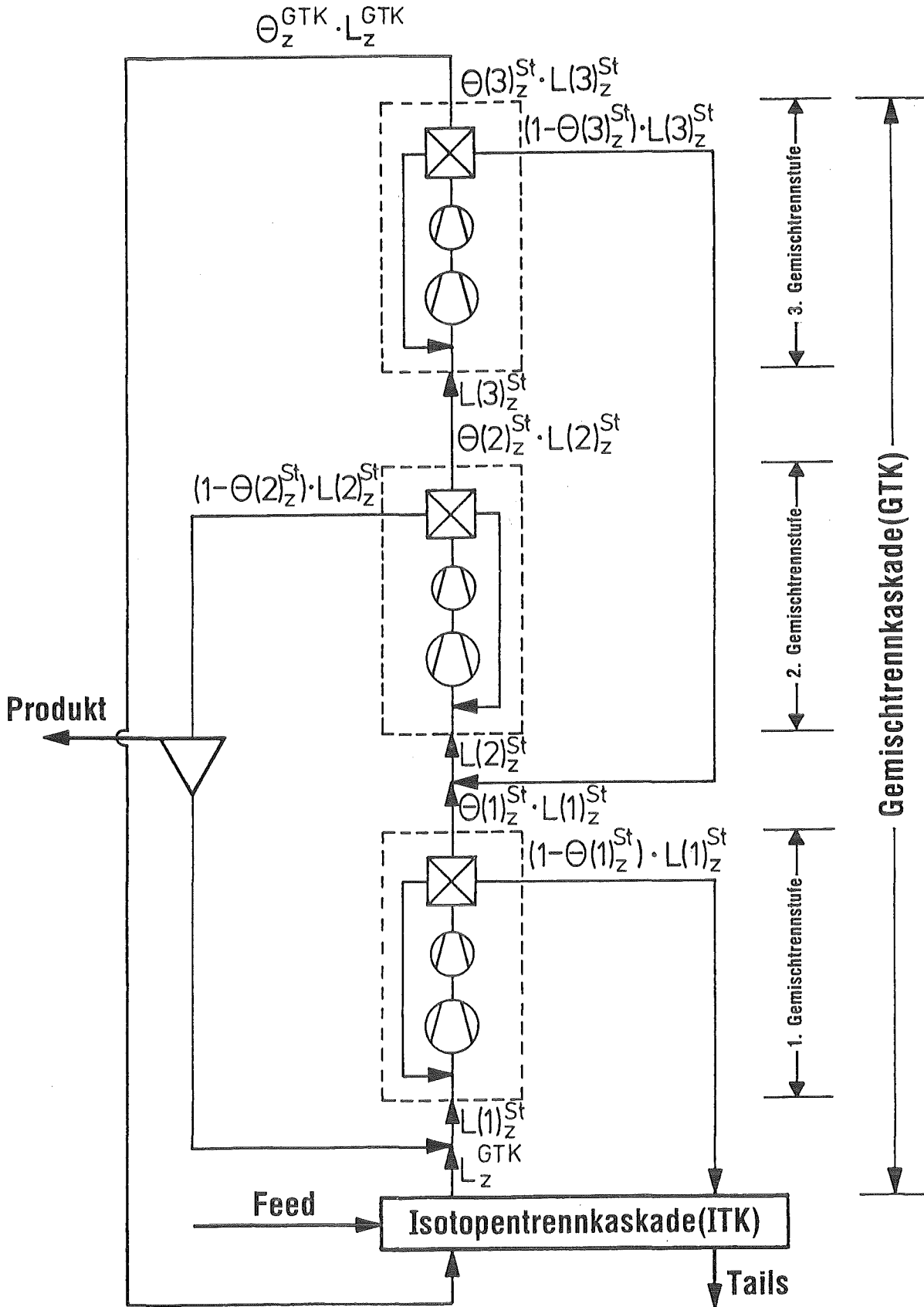


Abb. 7: Blockschaltbild einer dreistufigen Gemischtrennkaskade mit Angabe der Zusatzgasströme.

Die Entnahme des Produktstromes erfolgt mit Hilfe von zyklisch arbeitenden Abscheidern. Da diese Abscheider nur die Aufgabe haben, eine bestimmte Menge  $UF_6$  aus dem Gasstrom auszufrieren, können sie wesentlich einfacher ausgeführt werden als im Falle der  $UF_6$ /Zusatzgas-Trennung mittels Vorabtrennung des  $UF_6$  in einer besonderen Trenndüsenstufe und Abscheidung des  $UF_6$  in nachgeschalteten Feinabscheidern, mit denen das  $UF_6$  möglichst vollständig aus dem Gasstrom abgetrennt werden muß. Da man einerseits aus Investitionsgründen kleine Abscheider verwenden will, wird man als Entnahmestelle innerhalb der Gemischtrennkaskade den Gasstrom mit einer möglichst hohen  $UF_6$ -Konzentration wählen. Andererseits möchte man die Isotopentrennung in den Gemischtrennstufen so gut wie möglich ausnutzen, was zu einer Entnahmestelle weit entfernt von der Einspeisestelle aus der Isotopentrennkaskade führt. Die freie Wahl einer Entnahmestelle wird dadurch eingeschränkt, daß der  $UF_6$ -Molstrom der entsprechenden Fraktion größer oder gleich dem der Kaskade zu entnehmenden Produktstrom sein sollte. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Isotopen- und Gemischtrennkaskaden ist eine Produktentnahme aus der schweren Fraktion der zweiten Gemischtrennstufe möglich, was einen guten Kompromiß der unterschiedlichen Forderungen darstellt. Dabei kann die Isotopentrennung der ersten Gemischtrennstufe nahezu vollständig genutzt werden, da infolge der niedrigen  $UF_6$ -Abschälverhältnisse der Gemischtrennstufen die Abreicherung des  $^{235}U$  in der zweiten Gemischtrennstufe wesentlich kleiner ist als die Anreicherung in der ersten Gemischtrennstufe.

Bei allen in den folgenden Kapiteln dargestellten Rechnungen zur Gemischtrennung wird die Entnahme des Produktes nicht mit einbezogen, da hierdurch lediglich die Konzentration der Gemischtrennstufen und damit die  $UF_6$ -Endkonzentration der Gemischtrennkaskade geringfügig abgesenkt werden, so daß die berechneten  $UF_6$ -Endkonzentrationen konservative Werte sind. Bei der Optimierung der Auslegung und der Betriebsweise von Gemischtrennkaskaden unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist eine detaillierte Berücksichtigung der Isotopentrennung in der Gemischtrennkaskade nicht sinnvoll, da die Versuchszeit zur Bestimmung der Isotopentrennung etwa eine Größenordnung über der Versuchszeit zur Bestimmung der Gemischtrennung liegt. In Abschnitt 6.5 wird daher der Beitrag der Gemischtrennkaskade zur Isotopentrennung nur an Beispielen für Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlenksystemen quantitativ dargestellt.

### 3.2 Notwendige Zusatzgasabschälverhältnisse der Stufen

Zur Durchführung der Trennversuche für die Auslegung sowie zur Einregulierung der Stufen bei der technischen Realisierung einer Gemischtrennkaskade müssen die Sollwerte für die **Zusatzgasabschälverhältnisse**  $\theta(s)_Z^{St}$  der **Gemischtrennstufen** bekannt sein. Diese sind verschieden vom **Zusatzgasabschälverhältnis**  $\theta_Z^{GTK}$  der **Gemischtrennkaskade**, welches allein durch den Gemischtrennfaktor der Isotopentrennkaskade fest vorgegeben wird, während die Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s)_Z^{St}$  der Gemischtrennstufen zusätzlich von der Stufenzahl der Gemischtrennkaskade abhängen.

In diesem Abschnitt werden zuerst das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade und dann die Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s)_Z^{St}$  der Gemischtrennstufen hergeleitet.

Das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade, d. h. die Aufteilung des in die Gemischtrennkaskade eintretenden Zusatzgasstromes in die zum Kaskadenfuß zurückgeführte leichte Fraktion der obersten Gemischtrennstufe und in die vor die letzte Stufe der Isotopentrennkaskade zurückgeführte schwere Fraktion der untersten Gemischtrennstufe, wird durch die Zusatzgas- und  $UF_6$ -Abschälverhältnisse ( $\vartheta_Z, \vartheta_U$ ) bzw. durch den Gemischtrennfaktor  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade vorgegeben.

$$A^{ITK} = \frac{\vartheta_Z \cdot (1 - \vartheta_U)}{\vartheta_U \cdot (1 - \vartheta_Z)} \quad (5)$$

Die Berechnung des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade soll anhand der Abb. 8 erklärt werden. Der Zusatzgaseinstrom  $L_Z^{GTK}$  in die Gemischtrennkaskade ergibt sich aus den  $(1/\vartheta_U - 1)$  leichten Fraktionen der obersten Stufen der Isotopentrennkaskade

$$L_Z^{GTK} = (1/\vartheta_U - 1) \cdot L_Z^{ITK} \cdot \vartheta_Z$$

Damit auch die letzte Stufe der Isotopentrennkaskade bei Sollbetriebsbedingungen arbeitet, muß aus der Gemischtrennkaskade der Zusatzgasstrom  $L_Z^{ITK} \cdot (1 - \vartheta_Z)$  vor die letzte Stufe der Isotopentrennkaskade zurückgespeist werden. Der restliche Zusatzgasstrom

$$L_{Z,L}^{GTK} = L_Z^{ITK} \cdot [(1/\vartheta_U - 1) \cdot \vartheta_Z - (1 - \vartheta_Z)]$$

wird an den Kaskadenfuß zurückgeführt. Das erforderliche Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade ist das Verhältnis von zum Kaskadenfuß zurückgeführtem Zusatzgasstrom zum in die Gemischtrennkaskade eintretenden Gasstrom

$$\theta_Z^{GTK} = L_{Z,L}^{GTK} / L_Z^{GTK} = \frac{\vartheta_Z - \vartheta_U}{\vartheta_Z - \vartheta_Z \cdot \vartheta_U} \quad (6.1)$$

oder mit (5) in (6.1) eingesetzt

$$\theta_Z^{GTK} = 1 - 1/A^{ITK} \quad (6.2)$$

Wie Abb. 9 zeigt, muß das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade um so größer sein, je höher der Gemischtrennfaktor  $A^{ITK}$  in der Isotopentrennkaskade ist. Typische Werte für den Gemischtrennfaktor in Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlenksystemen sind  $A^{ITK}=16$ ; daraus folgt nach (6.2) für das Zusatzgasabschälverhältnis der Gemischtrennkaskade  $\theta_Z^{GTK}=0,937$ . Da bei Doppelumlenksystemen in der Isotopentrennkaskade höhere Gemischtrennfaktoren erreicht werden ( $A^{ITK}=42$ ), ist das notwendige Zusatzgasabschälverhältnis der Gemischtrennkaskade mit  $\theta_Z^{GTK}=0,976$  entsprechend höher.



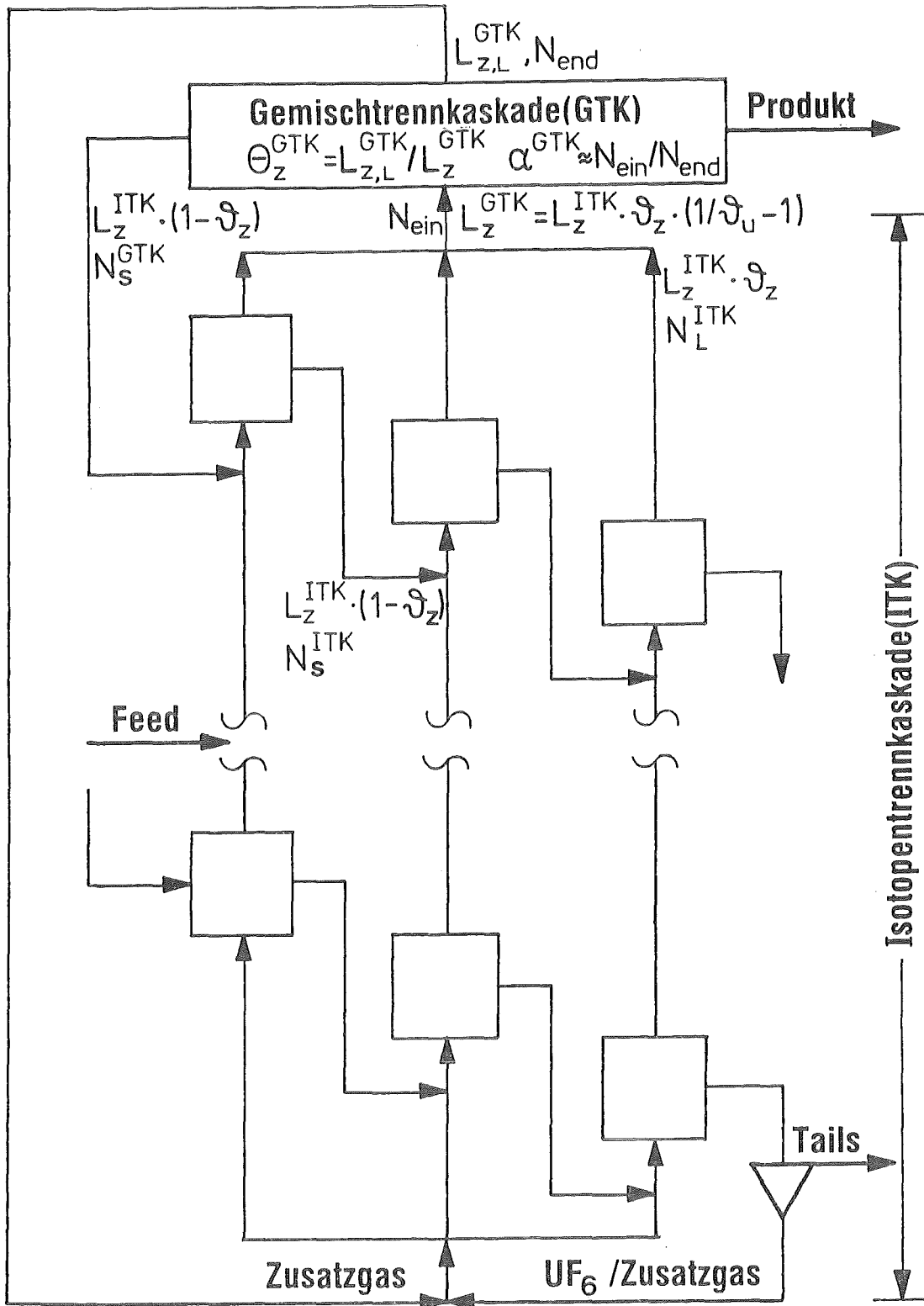


Abb. 8: Schematische Darstellung der Gasströme einer Isotopentrennkaskade mit  $\vartheta_u = 1/4$ -Schaltung zur Ableitung des benötigten Zusatzgasabschälverhältnisses  $\Theta_z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade.

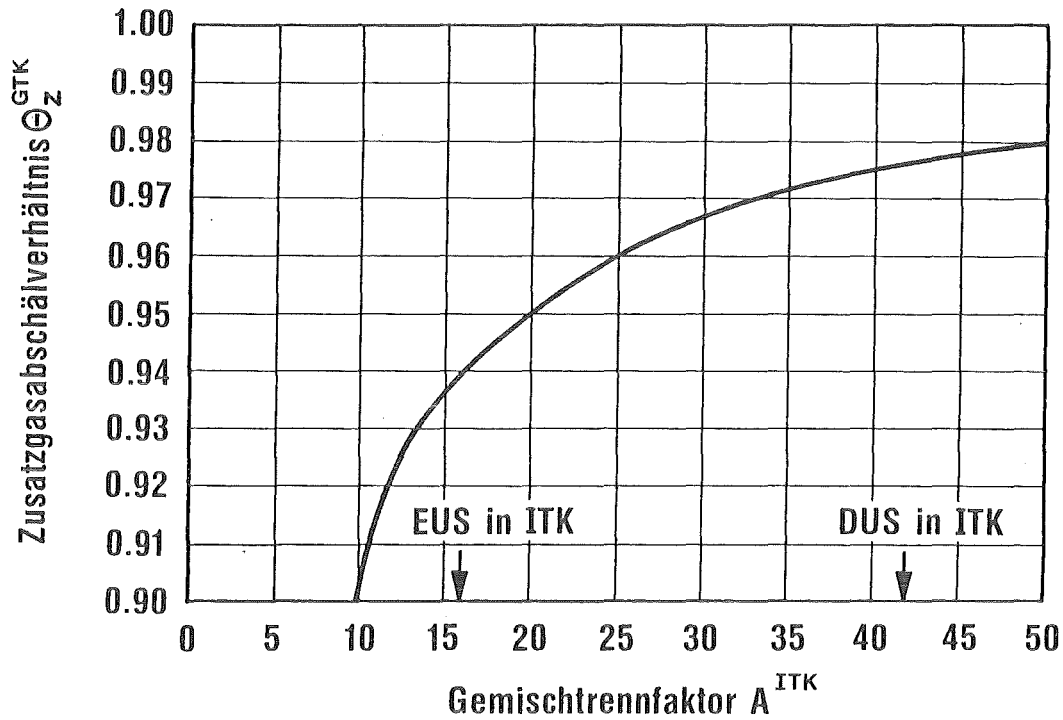


Abb. 9: Abhängigkeit des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade vom Gemischtrennfaktor  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade.

Für eine "einstufige Gemischtrennkaskade" (bzw. für eine Vorabscheidungstrennstufe mit nachgeschalteter Tieftemperaturfeinabscheidung) ist das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{St}$  der Gemischtrennstufe gleich dem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade. Bei einer mehrstufigen Gemischtrennkaskade dagegen kann ein vorgegebenes Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade durch verschiedene Einstellungen der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s)_Z^{St}$  der Gemischtrennstufen realisiert werden. Der Zusammenhang zwischen  $\theta(s)_Z^{St}$  und  $\theta_Z^{GTK}$  läßt sich mit den in Abb. 7 angegebenen Zusatzgasströmen in der Gemischtrennkaskade berechnen. Für eine Gemischtrennkaskade mit S Stufen ergibt sich der folgende Zusatzgaseinstrom  $L(s)_Z^{St}$  in die Gemischtrennstufe der Nummer s

$$\text{für } s=1 \quad L(1)_Z^{St} = L_Z^{GTK} + L(2)_Z^{St} \cdot (1 - \theta(2)_Z^{St}) \quad (7.1)$$

$$\text{für } 1 < s < S \quad L(s)_Z^{St} = L(s-1)_Z^{St} \cdot \theta(s-1)_Z^{St} + L(s+1)_Z^{St} \cdot (1 - \theta(s+1)_Z^{St}) \quad (7.2)$$

$$\text{für } s=S \quad L(S)_Z^{St} = L(S-1)_Z^{St} \cdot \theta(S-1)_Z^{St} \quad (7.3)$$

Geht man zunächst von **gleichen Zusatzgasabschälverhältnissen in allen Stufen der Gemischtrennkaskade** aus

$$\theta_Z^{St} = \theta(1)_Z^{St} = \dots = \theta(s)_Z^{St} = \dots = \theta(S)_Z^{St}$$

und setzt die Gleichungen (7) ineinander ein, so erhält man unter Verwendung von (6.1) für eine Gemischtrennkaskade mit **zwei Stufen**

$$S=2: \quad (\theta_Z^{GTK}-1) \cdot (\theta_Z^{St})^2 - \theta_Z^{GTK} \cdot \theta_Z^{St} + \theta_Z^{GTK} = 0 \quad (8.1)$$

für eine Gemischtrennkaskade mit **drei Stufen**

$$S=3: \quad \theta_Z^{GTK} \cdot (1 - 2 \cdot \theta_Z^{St} + 2 \cdot (\theta_Z^{St})^2) - (\theta_Z^{St})^3 = 0 \quad (8.2)$$

und entsprechend für eine Gemischtrennkaskade mit vier Stufen eine Gleichung 4. Grades in  $\theta_Z^{St}$  etc. In Tabelle 2 sind die Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta_Z^{St}$  der Gemischtrennstufen für Gemischtrennkaskaden mit 1-5 Stufen und einem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}=0,937$  der Gemischtrennkaskade eingetragen.

Stufenzahl S der GTK	Zusatzgasabschälverh. $\theta_Z^{St}$
1	0.93670
2	0.94025
3	0.94045
4	0.94047
5	0.94047

**Tab. 2:** Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta_Z^{St}$  der Gemischtrennstufen für Gemischtrennkaskaden mit  $\theta_Z^{GTK}=0,937$  und gleichem Zusatzgasabschälverhältnis in allen Gemischtrennstufen.

Tabelle 2 zeigt, daß erwartungsgemäß die Erhöhung der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta_Z^{St}$  der Gemischtrennstufen gegenüber dem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade beim Übergang von einer Gemischtrennkaskade mit einer Stufe auf eine Gemischtrennkaskade mit zwei Stufen am größten ist. Jede weitere Erhöhung der Stufenzahl der Gemischtrennkaskade hat nur noch wenig Einfluß auf die Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta_Z^{St}$  der Gemischtrennstufen.

Da die schwere Fraktion der ersten Gemischtrennstufe vor die letzte Stufe der Isotopentrennkaskade zurückgespeist wird und infolge des hohen Zusatzgasabschälverhältnisses der Gemischtrennstufen wenig Gas innerhalb der Gemischtrennkaskade zurückgeführt wird, muß die von der Isotopentrennkaskade vorgegebene **Zusatzgasbilanz** der **Gemisch-trennkaskade**  $\theta_Z^{GTK}$  im wesentlichen von der **ersten Gemischtrennstufe erfüllt werden**, während die Einstellung der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der übrigen Gemischtrennstufen das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade nur geringfügig beeinflusst.

Dies bedeutet, daß das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe auf einen Wert eingestellt werden muß, der ungefähr dem von der Isotopentrennkaskade vorgegebenen Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade entspricht. Dagegen ist das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen in vergleichsweise weiten Grenzen frei wählbar, wobei die exakte Erfüllung der Zusatzgasbilanz der Gemischtrennkaskade  $\theta_Z^{GTK}$  durch eine geringfügige Änderung der Einstellung des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(1)_Z^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe erreicht wird.

In Abb. 10 ist für Zusatzgasabschälverhältnisse der Gemischtrennkaskade  $\theta_Z^{GTK}=0,937$  und  $\theta_Z^{GTK}=0,976$  der Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen auf die benötigte Anpassung des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(1)_Z^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe dargestellt. Es wird dabei angenommen, daß die oberen Stufen ( $s>1$ ) alle mit identischem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  betrieben werden.

Für eine Isotopentrennkaskade mit Einzelumlenksystemen kann Abb. 10 beispielsweise entnommen werden, daß bei einer Wahl der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s>1)_Z^{St}=0,800$  der oberen Gemischtrennstufen das Zusatzgasabschälverhältnis der ersten Gemischtrennstufe nur von  $\theta(1)_Z^{St}=0,940$  auf  $\theta(1)_Z^{St}=0,948$  erhöht werden muß. Die Wahl der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s>1)_Z^{St}$  erfolgt nach den in Kapitel 5 angegebenen Kriterien.

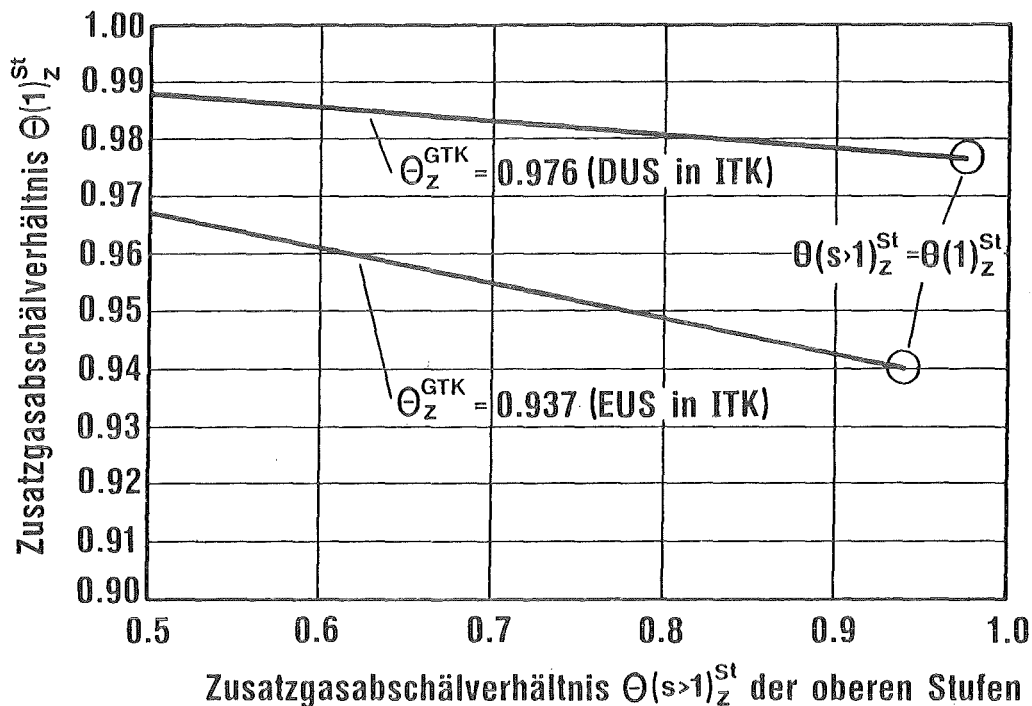


Abb. 10: Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen auf das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe bei konstantem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der gesamten Gemischtrennkaskade.  $\theta_Z^{GTK}=0,937$  ist ein typischer Wert für eine Isotopentrennkaskade mit Einzelumlenksystemen,  $\theta_Z^{GTK}=0,976$  ein typischer Wert für eine Isotopentrennkaskade mit Doppelumlenksystemen.

### 3.3 Bilanzgleichungen für eine Gemischtrennkaskade

Zur Berechnung des Konzentrationsverlaufs innerhalb einer Gemischtrennkaskade und der Endkonzentration  $N_{\text{end}}$  wurden Bilanzgleichungen aufgestellt, mit denen die  $\text{UF}_6$ - und Zusatzgasströme der Gemischtrennstufen für Gemischtrennkaskaden mit beliebiger Stufenzahl analytisch berechnet werden können.

$$L(s)_i^{\text{St}} = L(s-1)_i^{\text{St}} \cdot \theta(s-1)_i^{\text{St}} \cdot k(s)_i \quad (9.1)$$

$$k(s)_i = 1/[1-(1-\theta(s+1)_i^{\text{St}}) \cdot \theta(s)_i^{\text{St}} \cdot k(s+1)_i] \quad (9.2)$$

mit  $k(s)_i = 1$   
 $\theta(0)_i = 1$   
 $L(0)_i = \text{Molströme aus der Isotopentrennkaskade}$   
 $i = G, Z, U$

Bei Vorgabe der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s)_Z^{\text{St}}$  und der Gemischtrennfaktoren  $A(s)^{\text{St}}$  werden die  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnisse  $\theta(s)_U^{\text{St}}$  nach

$$\theta(s)_U^{\text{St}} = \theta(s)_Z^{\text{St}} / [A(s)^{\text{St}} \cdot (1-\theta(s)_Z^{\text{St}}) + \theta(s)_Z^{\text{St}}] \quad (10)$$

berechnet und die Bilanzgleichungen für  $\text{UF}_6$  und Zusatzgas aufgestellt. Der Konzentrationsverlauf ergibt sich aus den Molströmen nach

$$N(s)^{\text{St}} = L(s)_U^{\text{St}} / L(s)_G^{\text{St}}$$

Ebenso ergeben sich die Konzentrationen der einzelnen Fraktionen der Gemischtrennstufen, so daß die für die Gemischtrennkaskade wichtigste Kenngröße, die  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration  $N_{\text{end}}$  im zum Kaskadenfuß zurückgespeisten Zusatzgasstrom, berechnet werden kann.

### 3.4 Notwendige Gemischtrennfaktoren der Stufen

In diesem Abschnitt werden die in den Gemischtrennstufen notwendigen Gemischtrennfaktoren  $A^{St}$  in Abhängigkeit von der Trennaufgabe und der Stufenzahl der Gemischtrennkaskade berechnet. Dabei werden zunächst die notwendigen Gemischtrennfaktoren für eine ideale Kaskade hergeleitet. Aus diesen relativ einfachen Formeln lassen sich einfache Näherungslösungen auch für nicht ideale Kaskaden herleiten, welche entweder mit konstanten Zusatzgasabschälverhältnissen  $\theta_Z^{St}$  in allen Stufen oder mit verschiedenen Zusatzgasabschälverhältnissen  $\theta_Z^{St}$  betrieben werden. Die mit den einfachen Näherungslösungen erzielten Ergebnisse werden mit den an der exakten Bilanzgleichung (9) gewonnenen Ergebnissen verglichen. Bei der Trennaufgabe wird dabei der Gemischtrennfaktor  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade, die Aufteilung der Zusatzgasbilanzierung auf die einzelnen Gemischtrennstufen und der Gesamtanreicherungsfaktor  $\alpha^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade variiert.

Der Gesamtabreicherungsfaktor  $\beta^{GTK}$  einer Gemischtrennkaskade ist gegeben durch (Abb. 8):

$$\beta^{GTK} = \frac{N_S^{GTK} \cdot (1 - N_{ein})}{N_{ein} \cdot (1 - N_S^{GTK})} \quad (11.1)$$

Da die Eingangskonzentration der Gemischtrennkaskade gleich der Konzentration der leichten Fraktion der Isotopentrennkaskade

$$N_{ein} = N_L^{ITK}$$

und die schwere Fraktion der Gemischtrennkaskade gleich der schweren Fraktion der Isotopentrennkaskade

$$N_S^{GTK} = N_S^{ITK}$$

ist, folgt mit (3.1-3) und (6.2)

$$\beta^{GTK} = A^{ITK} = 1/(1 - \theta_Z^{GTK}) \quad (11.2)$$

Der Abreicherungsfaktor  $\beta^{\text{GTK}}$  der Gemischtrennkaskade ist also durch die Gemischtrennung in der Isotopentrennkaskade fest vorgegeben.

### 3.4.1 Ideale Kaskade

Baut man die Gemischtrennkaskade als **ideale Kaskade** mit einer Stufe im Abstreifeteil für das Zusatzgas auf (Abb. 7), so ist der Abreicherungs-faktor der Kaskade identisch mit dem Abreicherungs-faktor dieser ersten Stufe:

$$\beta^{\text{GTK}} = \beta(1)^{\text{St}}$$

In einer idealen Kaskade ist der **Gesamtanreicherungs-faktor**  $\alpha^{\text{GTK}}$  der Gemischtrennkaskade

$$\alpha^{\text{GTK}} = \frac{N_{\text{ein}} \cdot (1 - N_{\text{end}})}{N_{\text{end}} \cdot (1 - N_{\text{ein}})} \approx \frac{N_{\text{ein}}}{N_{\text{end}}} \quad (\text{da } N_{\text{ein}}, N_{\text{end}} \ll 1) \quad (12.1)$$

gegeben durch das Produkt der Anreicherungs-faktoren  $\alpha^{\text{St}}$  der S Gemisch-trennstufen /16/. Da in der idealen Kaskade die Anreicherungs-faktoren alle gleich groß sind

$$\alpha^{\text{St}} = \alpha(1)^{\text{St}} = \dots = \alpha(s)^{\text{St}} = \dots = \alpha(S)^{\text{St}}$$

gilt für den notwendigen **Anreicherungs-faktor**  $\alpha^{\text{St}}$  einer Gemischtrenn-stufe:

$$\alpha^{\text{St}} = \sqrt[S]{\alpha^{\text{GTK}}} \quad (12.2)$$



In einer idealen Kaskade muß bei symmetrischer Schaltung für alle Stufen  $\alpha^{St} = \beta^{St}$  sein, damit die Konzentration der schweren Fraktion der Stufe s+1 gleich der Konzentration der leichten Fraktion der Stufe s-1 ist, so daß zum Stufengas der Stufe s nur Gasströme mit gleicher Konzentration vermischt werden. Damit sind auch die notwendigen Gemischtrennfaktoren der Gemischtrennstufen einer idealen Kaskade

$$A_{ideal}^{St} = \alpha_{ideal}^{St} \cdot \beta_{ideal}^{St} = (A^{ITK})^2 \quad (13)$$

durch die Gemischtrennung in der Isotopentrennkaskade vorgegeben.

In Abb. 11a ist die Abhängigkeit des notwendigen Gemischtrennfaktors  $A_{ideal}^{St}$  in den Gemischtrennstufen vom Gemischtrennfaktor  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade gestrichelt eingezeichnet. Bei Einzelumlenksystemen in der Isotopentrennkaskade ist in den Gemischtrennstufen ein Gemischtrennfaktor  $A^{St}=256$  notwendig. Wie die später diskutierten Messungen zeigen (Kap. 4), ist dieser ohne allzu großen technischen Aufwand realisierbar; mit einem Anreicherungsfaktor  $\alpha^{St}=16$  wären jedoch vier Stufen notwendig, um einen Gesamtanreicherungsfaktor  $\alpha^{GTK} > 10.000$  zu erreichen. Bei Doppelumlenksystemen in der Isotopentrennkaskade wäre in den Gemischtrennstufen ein Gemischtrennfaktor  $A^{St} \approx 1700$  notwendig, der praktisch nicht erreichbar ist.

Beim Aufbau der Gemischtrennkaskade als nicht ideale Kaskade ergeben sich deutlich reduzierte Anforderungen an die Gemischtrennstufen, die in den folgenden Abschnitten hergeleitet werden.

### 3.4.2 Nicht ideale Kaskade mit identischen Zusatzgasabschälverhältnissen der Stufen

Infolge des hohen Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade (Abb. 9), sind die Molströme der leichten Fraktionen der Gemischtrennstufen viel größer als die Molströme der schweren Fraktionen, so daß die Stufengaskonzentration der Gemischtrennstufe  $s$  auch dann im wesentlichen der Konzentration der leichten Fraktion der Stufe  $s-1$  entspricht, falls die schwere Fraktion der Stufe  $s+1$  eine abweichende Konzentration besitzt ( $N(s+1)_S \neq N(s-1)_L$ ). **Näherungsweise** gilt daher die Gleichung (12.2) auch für eine **nicht ideale Kaskade**, bei welcher sich die An- und Abreicherungs-faktoren unterscheiden ( $\alpha^{St} \neq \beta^{St}$ ).

Für **gleiche Zusatzgasabschaelverhaeltnisse**  $\theta_Z^{St}$  und **gleiche Gemischtrennfaktoren**  $A^{St}$  in **allen S Gemischtrennstufen** folgt daher näherungsweise folgende einfache Formel für den notwendigen Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  einer Gemischtrennstufe:

$$A^{St} = \sqrt[S]{\alpha^{GTK}} \cdot A^{ITK} \quad (\text{für } A^{St} \gg A^{ITK}) \quad (14)$$

Wie Gleichung (14) zeigt, steigt der benötigte Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  der Gemischtrennstufen linear mit dem Gemischtrennfaktor  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade und mit der  $S$ -ten Wurzel des Gesamtanreicherungs-faktors  $\alpha^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade an.

Abb. 11a zeigt den Einfluß des Gemischtrennfaktors  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade auf den notwendigen Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  der Gemischtrennstufen. Die Stufenzahl  $S$  der Gemischtrennkaskade variiert zwischen zwei und vier, der Gesamtanreicherungsfaktor beträgt jeweils  $\alpha^{GTK}=10.000$ , was beispielsweise einer Abreicherung des  $UF_6$  von  $N_{ein}=1$  Mol-% auf  $N_{end}=1$  ppm entspricht. Wie aus Abb. 11a und (14) ersichtlich ist, muß beim Einsatz von Doppelumlenksystemen statt Einzelumlenksystemen in der Isotopentrennkaskade der Gemischtrennfaktor in den Gemischtrennstufen um den **gleichen Faktor** erhöht werden, um den sich der Gemischtrennfaktor in der Isotopentrennkaskade erhöht hat, sofern man den Gesamtanreicherungsfaktor  $\alpha^{GTK}$  und die Stufenzahl  $S$  der Gemischtrennkaskade konstant hält.

Ein Vergleich der Näherungsformel (14) mit der exakten Berechnung mit den Bilanzgleichungen (9) zeigt, daß die Abweichung der berechneten Gemischtrennfaktoren  $A^{St}$  im interessierenden Betriebsbereich der Gemischtrennkaskaden für Isotopentrennkaskaden mit Gemischtrennfaktoren zwischen 10 und 50 kleiner als 3 % relativ sind. Die Vermischung von Gasströmen unterschiedlicher  $UF_6$ -Konzentrationen wirkt sich so gering aus, daß dadurch die Anforderungen an die Gemischtrennstufen bzw. die Gesamtanreicherung der Gemischtrennkaskade nicht merklich verändert werden.

Abb. 11b zeigt den Einfluß des Gesamtanreicherungsfaktors  $\alpha^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade auf den notwendigen Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  der Gemischtrennstufen. Für beispielsweise einen Gesamtanreicherungsfaktor  $\alpha^{GTK}=10.000$  kann man Abb. 11b entnehmen, daß beim Einsatz von Doppelumlenksystemen statt Einzelumlenksystemen in der Isotopentrennkaskade um ca. 22 % höhere Gemischtrennfaktoren benötigt werden, obwohl die Anzahl der Gemischtrennstufen von drei auf vier erhöht wurde.

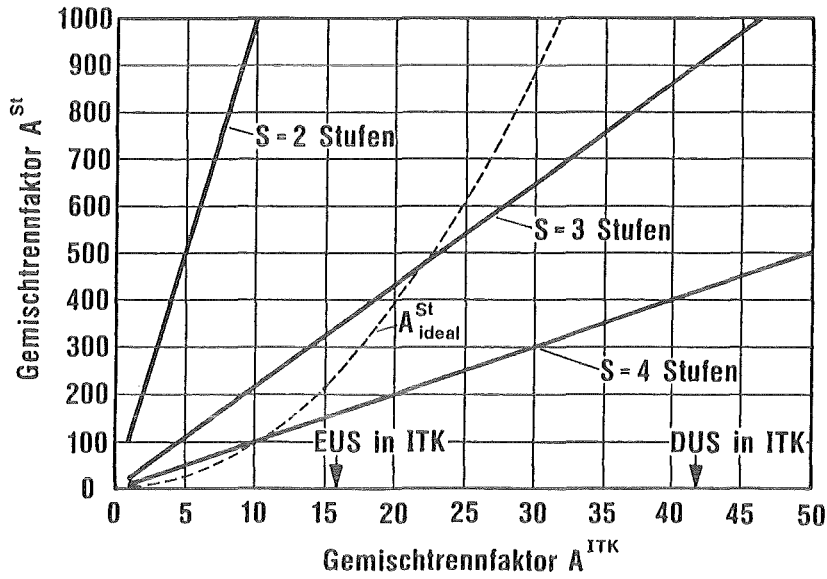


Abb. 11a: Abhängigkeit der notwendigen Gemischtrennfaktoren  $A^{St}$  in den Stufen der Gemischtrennkaskade vom Gemischtrennfaktor  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade. Der Gesamtanreicherungsfaktor der Gemischtrennkaskade soll  $\alpha^{GTK}=10.000$  betragen und alle Gemischtrennstufen werden mit gleichem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{St}$  betrieben.

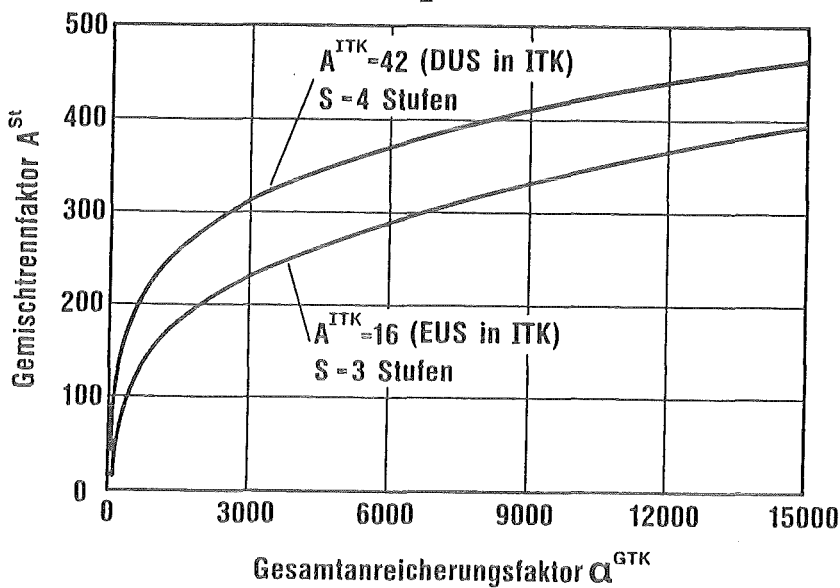


Abb. 11b: Abhängigkeit der notwendigen Gemischtrennfaktoren  $A^{St}$  vom Gesamtanreicherungsfaktor  $\alpha^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade. Alle Stufen der Gemischtrennkaskade werden mit gleichem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{St}$  betrieben.

### 3.4.3 Nicht ideale Kaskade mit unterschiedlichen Zusatzgasabschälverhältnissen der Stufen

Wie aus Abschn. 3.2 ersichtlich wurde, ist es jedoch nicht notwendig, alle Gemischtrennstufen mit dem gleichen Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{St}$  zu betreiben. In den oberen Stufen kann  $\theta_Z^{St}$  gegenüber  $\theta_Z^{GTK}$  wesentlich reduziert werden. Um die vorgegebene Zusatzgasbilanz  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade zu erfüllen, muß dann das Zusatzgasabschälverhältnis der ersten Gemischtrennstufe  $\theta(1)_Z^{St}$  geringfügig erhöht werden.

Aus der Beziehung  $\beta^{St} \approx 1/(1-\theta_Z^{St})$  folgt unmittelbar, daß durch die Reduktion von  $\theta_Z^{St}$  der Abreicherungsfaktor der Stufe reduziert wird. Dies bedeutet, daß bei konstantem Anreicherungsfaktor  $\alpha^{St}$  der notwendige Gemischtrennfaktor  $A^{St} = \alpha^{St} \cdot \beta^{St}$  kleiner wird bzw. daß bei vorgegebenem Gemischtrennfaktor dieser besser für die Zusatzgasanreicherung  $\alpha^{St} = A^{St} / \beta^{St}$  genutzt werden kann. Geht man davon aus, daß mit Ausnahme der ersten Stufe alle Gemischtrennstufen mit gleichem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  arbeiten und daß in allen Stufen der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  gleich groß ist, so läßt sich dieser **naheungsweise** nach folgender Formel berechnen:

$$A^{St} \approx \sqrt{\frac{S}{\alpha^{GTK}}} \cdot \sqrt{\frac{S}{A^{ITK} / (1 - (\theta(s>1)_Z^{St})^{(S-1)})}} \quad (15)$$

Diese Gleichung berücksichtigt nicht die geringe Erhöhung des Zusatzgasabschälverhältnisses der ersten Gemischtrennstufe bei einer Absenkung der Zusatzgasabschälverhältnisse der übrigen Gemischtrennstufen (Abb. 10). Ferner ist die Änderung der Stufengaskonzentration gegenüber der Konzentration der leichten Fraktion der vorangegangenen Stufe größer als im Falle gleicher Zusatzgasabschälverhältnisse in allen Gemischtrennstufen. Ein Vergleich der Näherungsformel (15) mit der exakten Berechnung mit den Bilanzgleichungen (9) zeigt jedoch auch hier, daß die Abweichung der berechneten Gemischtrennfaktoren  $A^{St}$  auch bei einer Absenkung der Zusatzgasabschälverhältnisse der oberen Gemischtrennstufen auf  $\theta(s>1)_Z^{St} = 0,5$  unter 10 % relativ bleibt.

Abb. 12 zeigt für dreistufige Gemischtrennkaskaden mit einem Gesamtanreicherungsfaktor  $\alpha^{GTK}=10.000$  den mit (15) berechneten Einfluß der Zusatzgasabschälverhältnisse der oberen Gemischtrennstufen auf den notwendigen Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  der Gemischtrennstufen. Zum Vergleich ist jeweils die mit den Bilanzgleichungen (9) berechnete, exakte Abhängigkeit gestrichelt eingezeichnet. Für eine Isotopentrennkaskade mit Einzelumlenksystemen und einer Gemischtrennkaskade mit konstantem Gesamtanreicherungsfaktor kann Abb. 12 entnommen werden, daß bei Wahl der Zusatzgasabschälverhältnisse der oberen Gemischtrennstufen von beispielsweise  $\theta(s>1)_Z^{St}=0,8$  der notwendige Gemischtrennfaktor gegenüber dem Gemischtrennfaktor bei gleichen Zusatzgasabschälverhältnissen in allen Gemischtrennstufen um etwa die Hälfte verringert werden kann. Weiterhin zeigt Abb. 12, daß - ebenfalls bei Wahl der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s>1)_Z^{St}=0,8$  in den oberen Gemischtrennstufen - der notwendige Gemischtrennfaktor für eine Isotopentrennkaskade mit Doppelumlenksystemen gegenüber dem Gemischtrennfaktor für eine Isotopentrennkaskade mit Einzelumlenksystemen nicht mehr um einen Faktor 2,6 (Abb. 11a), sondern nur noch um ca. 40 % erhöht werden muß.

Durch Wahl eines kleineren Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St} < \theta_Z^{GTK}$  in den oberen Gemischtrennstufen kann der somit in den Gemischtrennstufen notwendige Gemischtrennfaktor drastisch reduziert werden. Wie später in Kap. 4 in Zusammenhang mit den entsprechenden Messungen gezeigt wird, gelangt jedoch mit kleiner werdendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  immer mehr Zusatzgas in die schwere Fraktion und wird vor die darunter liegende Stufe zurückgespeist (Abb. 7). Neben dem stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z^{St}$  entsteht ein kaskadeninterner Zirkulationsstrom  $Z^{GTK}$ , der wie der stufeninterne Zirkulationsstrom größere Verdichter und mehr Trennelementschlitzlänge bedingt. Zur Wahl des Zusatzgasabschälverhältnisses der oberen Gemischtrennstufen ist also eine Optimierung notwendig, bei welcher auch berücksichtigt wird, wie die erreichbaren Gemischtrennfaktoren vom Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  abhängen (Abschn. 4.4).

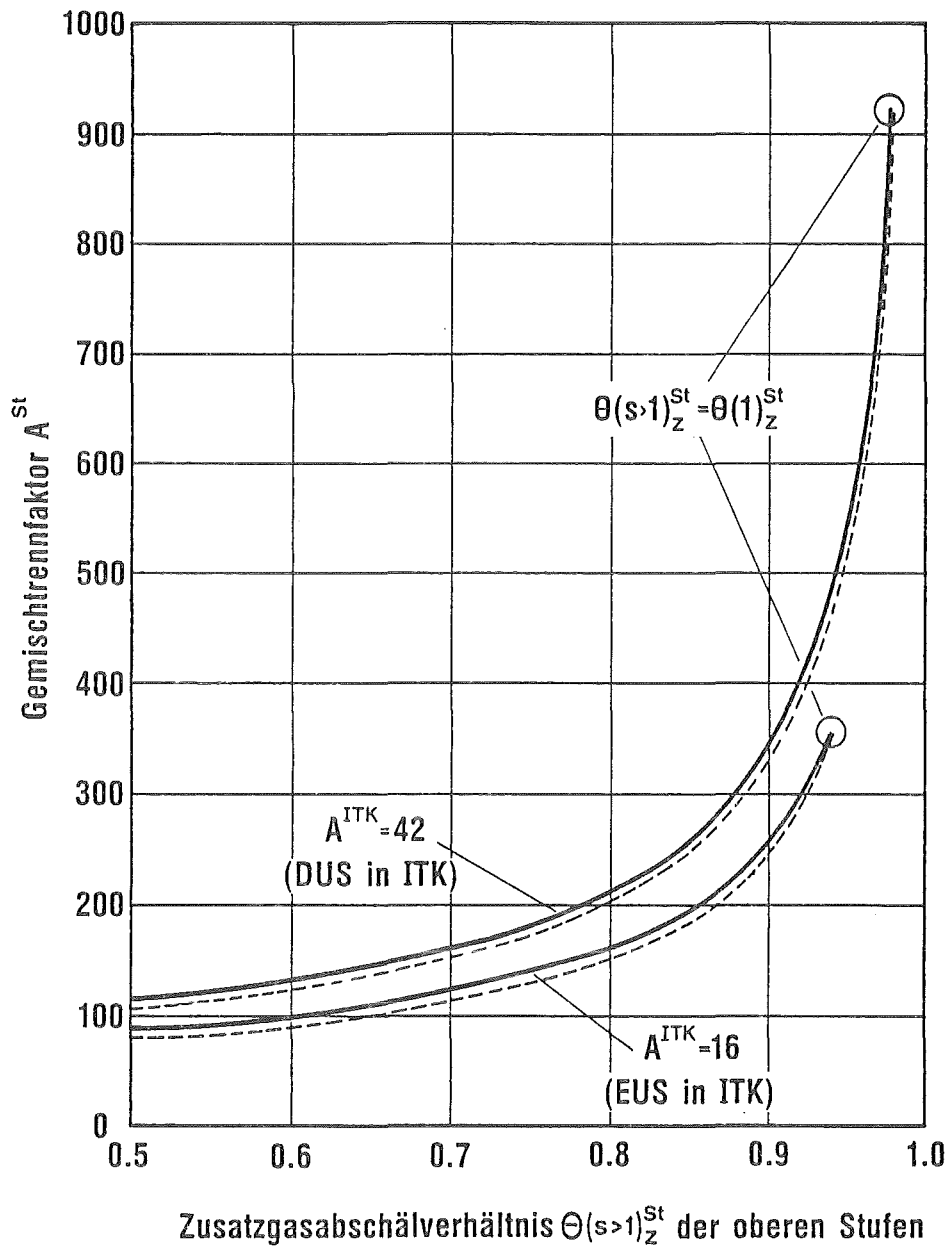


Abb. 12: Abhängigkeit des notwendigen Gemischtrennfaktors  $A^{St}$  von den Zusatzgasabschälverhältnissen  $\Theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen für dreistufige Gemischtrennkaskaden mit einem Gesamtanreicherungsfaktor  $\alpha^{GTK}=10.000$ .

— Näherungslösung nach Gl. (15)

---- exakte Lösung nach Gl. (9)

#### 4. Experimentelle Bestimmung der Gemischtrennung in einem Doppelumlensystem

Nachdem gezeigt wurde, welche Gemischtrennfaktoren notwendig sind, um einen vorgegebenen Anreicherungsfaktor der Gemischtrennkaskade zu erreichen, werden in diesem Kapitel an typischen Beispielen die Ergebnisse der durchgeführten Trennversuche zur Bestimmung der Gemischtrennung in einem Doppelumlensystem dargestellt. Zuerst werden die Vorteile von Doppelumlensystemen für die Gemischtrennung aufgezeigt, anschließend wird der Einfluß der wichtigsten Betriebsparameter auf die mit Doppelumlensystemen erreichbaren Gemischtrennfaktoren diskutiert. Daneben wird auch gezeigt, welcher technische Aufwand (Expansionsverhältnis, Verdichteransaugvolumen und Verdichteranzahl) hierzu notwendig ist.

##### 4.1 Einfluss des stufeninternen Zirkulationsstromes von Doppelumlensystemen auf die Gemischtrennung

Bei einem Einzelumlensystem ist bei vorgegebenen Werten für die am Trennelement anliegenden Drucke und die Düsengaskonzentration ein vorgegebener Sollwert für das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z$  nur mit einer einzigen Abschälerweite realisierbar. Damit liegen für diese Betriebsbedingungen auch das  $UF_6$ -Abschälverhältnis  $\theta_U$  und nach (5) der Gemischtrennfaktor  $A$  fest.

Beim Doppelumlensystem mit interner Rückspeisung der mittleren Fraktion kann ein vorgegebener Sollwert für das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{St}$  der Stufe auch bei größeren Abschälerweiten  $f^I$  der ersten Düse als beim Einzelumlensystem erreicht werden. Die damit zunächst verbundene Abnahme des Zusatzgasstromes in der leichten Fraktion wird durch die Rückführung der mittleren Fraktion vor die Verdichter und die damit verbundene Erhöhung des Gesamtstromes in das Trennelement kompensiert. Trennelementschlitzlänge und Verdichteransaugvolumen müssen entsprechend dem stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z^{St}$  vergrößert werden. Auf diese Weise kann auch bei größeren Abschälerweiten  $f^I$  der ersten Düse, d. h. kleinem  $UF_6$ -Abschälverhältnis, das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{St}$  der Stufe konstant gehalten werden.



Für typische Betriebsbedingungen der oberen Gemischtrennstufen zeigt Abb. 13a, daß durch eine Vergrößerung der Abschälerweite der ersten Düse von  $f(s>1)^I=69 \mu\text{m}$  auf beispielsweise  $f(s>1)^I=200 \mu\text{m}$ , das  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnis  $\theta(s>1)_U^I$  der ersten Düse um ca. einen Faktor 20, das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^I$  der ersten Düse hingegen nur um ca. 38 % abnimmt.

Dieser Abfall des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^I$  wird durch einen stufeninternen Zirkulationsstrom von  $Z(s>1)^{\text{St}} \approx 0,6$  kompensiert, so daß der Zusatzgasstrom der leichten Fraktion konstant bleibt. Das Verdichteransaugvolumen und die Trennelementschlitzlänge müssen entsprechend vergrößert werden (Abb. 13b).

Der Gemischtrennfaktor  $A(s>1)^{\text{St}}$  der Stufe kann bei diesen Betriebsbedingungen durch Verwendung eines Doppelumlenksystems mit einer Abschälerweite  $f(s>1)^I=200 \mu\text{m}$  gegenüber einem Einzelumlenksystem ( $f(s>1)^I=69 \mu\text{m}$ ) um etwa einen Faktor 8 verbessert werden (Abb. 13c).

Der Gemischtrennfaktor  $A^{\text{St}}$  kann auf diese Weise jedoch nicht beliebig gesteigert werden. Bei sehr großen Abschälerweiten  $f^I$  der ersten Düse wird der Absaugquerschnitt der leichten Fraktion so klein, daß das angelegte Expansionsverhältnis nicht mehr voll zur Beschleunigung der Strömung genutzt werden kann. Ferner wird mit zunehmender Abschälerweite das Zentrifugalfeld in der ersten Düse durch die gegensinnige Krümmung der zweiten Düse bei kleineren Umlenkswinkeln abgebaut. Der Gemischtrennfaktor  $A^{\text{St}}$  fällt daher bei zu großen Abschälerweiten  $f^I$  wieder ab (Abb. 13c). Der stufeninterne Zirkulationsstrom  $Z^{\text{St}}$  steigt dagegen mit zunehmender Abschälerweite monoton an (Abb. 13b).

Um bei großen Abschälerweiten  $f^I$  der ersten Düse eines Doppelumlenksystems für den erhöhten Gasstrom in die mittlere Fraktion einen genügend großen Absaugquerschnitt zur Verfügung zu haben, muß der Umlenkradius der zweiten Düse entsprechend groß sein. Die in Abb. 5 gezeigte Düsengeometrie, die **gleich grosse Umlenkradien** in der **ersten und zweiten Düse** besitzt, hat sich als für die Gemischtrennung gut geeignet erwiesen.

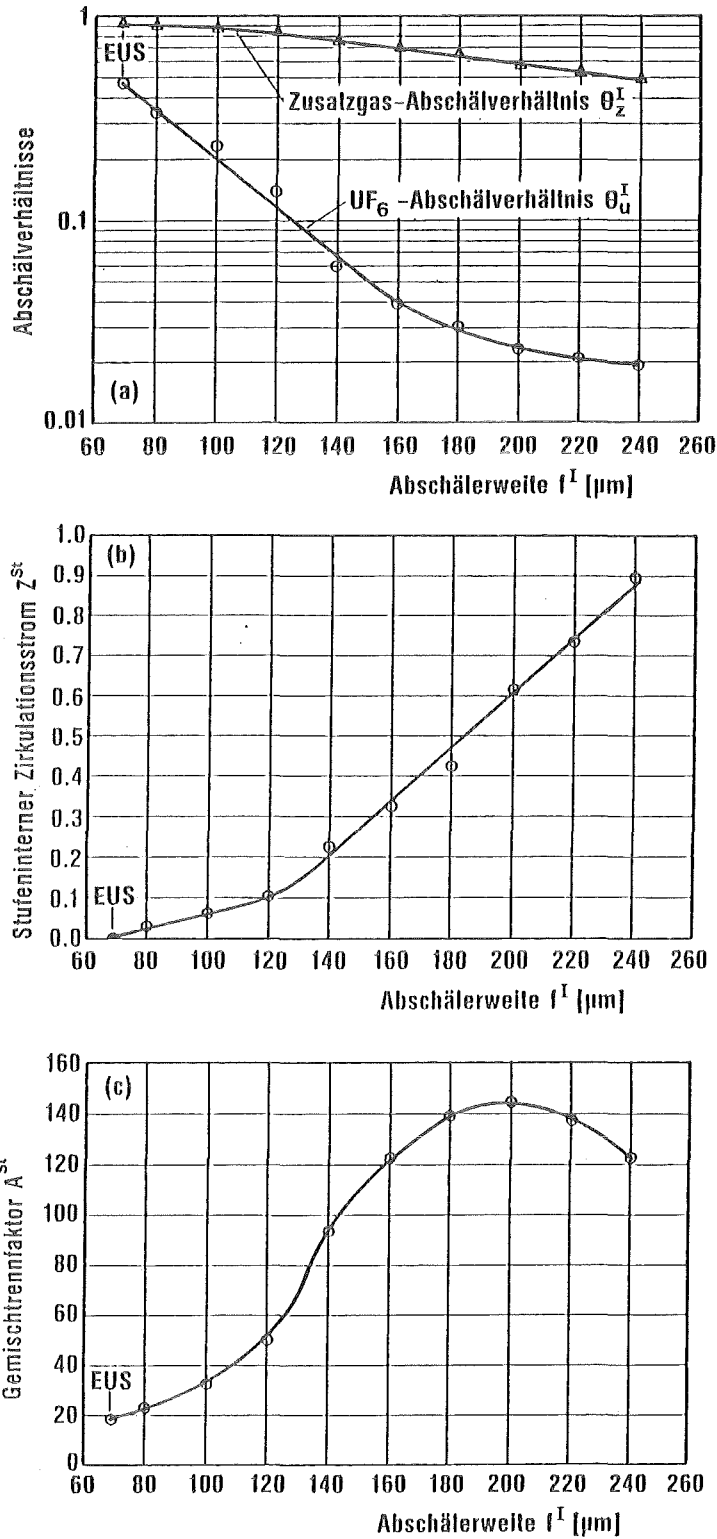


Abb. 13: Einfluß der Abschälerweite  $f^I$  der ersten Düse eines Doppelumlenksystems auf die UF<sub>6</sub>- und Zusatzgasabschälverhältnisse ( $\theta_U^I, \theta_Z^I$ ) der ersten Düse (a), den stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z^{\text{St}}$  (b) und den Gemischtrennfaktor  $A^{\text{St}}$  der Stufe (c) für ein konstantes Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{\text{St}} = 0,94$ .  
 Typische Betriebsbedingungen der oberen Gemischtrennstufen:  
 $N_0 = 0,1 \text{ Mol-\% UF}_6$  in Helium,  $p_0^{\text{Lab}} = 42,4 \text{ mbar}$ ,  $\pi = 2,1$

## 4.2 Einfluss der Düsengaskonzentration auf die Gemischtrennung

In Isotopentrennkaskaden arbeiten alle Stufen mit gleicher Düsengaskonzentration, die etwa zwischen 2 und 4 Mol-%  $UF_6$  liegt. Da in einer Gemischtrennkaskade das  $UF_6$  abgereichert werden soll, nimmt hier die Düsengaskonzentration von Stufe zu Stufe stark ab. So arbeiten insbesondere die letzten Gemischtrennstufen mit einem Gasgemisch, welches  $UF_6$  nur noch in Spuren enthält und dessen mittlere Masse daher nur wenig über der Masse des reinen Zusatzgases liegt. Alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf die Verwendung von **Helium** als **leichtem Zusatzgas**.

Abb. 14 zeigt den Einfluß der mittleren Masse  $m$  des Gasgemisches und der Düsengaskonzentration  $N_0$  auf den Gemischtrennfaktor  $A^{St}$ . Die Steigerung der Gemischtrennung mit abnehmender Düsengaskonzentration wird durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Gasgemisches bewirkt. Im Bereich hoher Düsengaskonzentrationen, bei denen die mittlere Masse des Gasgemisches ein Vielfaches der Masse des reinen Zusatzgases beträgt, steigt der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  mit kleiner werdender Düsengaskonzentration etwa umgekehrt proportional dem Quadrat der mittleren Masse des Gasgemisches an. Ab einer Düsengaskonzentration  $N_0 \approx 1,1$  Mol-%  $UF_6$  (die mittlere Masse des Gasgemisches beträgt etwa das Doppelte der Masse des Zusatzgases) steigt der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  mit abnehmender Düsengaskonzentration nur noch um maximal ca. 50 % an.

Im Rahmen der Meßgenauigkeit kann ab einer Düsengaskonzentration kleiner 0,1 Mol-%  $UF_6$  keine Abhängigkeit des Gemischtrennfaktors von der Düsengaskonzentration mehr festgestellt werden, da das nur noch in Spuren vorhandene  $UF_6$  kaum noch einen Einfluß auf die gasdynamischen Eigenschaften (Zähigkeit, mittlere Masse, Strömungsgeschwindigkeit) des Gasgemisches hat.

Typische Werte für die Düsengaskonzentration der ersten Gemischtrennstufe einer Gemischtrennkaskade liegen zwischen 0,6 und 1,0 Mol-%  $UF_6$ , die Werte der zweiten Gemischtrennstufe liegen zwischen 0,01 und 0,14 Mol-%  $UF_6$ , die Düsengaskonzentrationen der folgenden Gemischtrennstufen sind noch wesentlich niedriger.

Die Betriebsbedingungen der ersten und zweiten Gemischtrennstufe unterscheiden sich daher stark voneinander. Da der Einfluß der Düsengaskonzentration auf die Gemischtrennung beim Vergleich der zweiten und der folgenden Gemischtrennstufen vernachlässigbar ist, wird in der zweiten und allen folgenden Stufen die gleiche Anzahl von Verdichtern eingesetzt. Dadurch sind das Expansionsverhältnis und der Düsenvordruck der oberen Gemischtrennstufen ähnlich. Bei gleichen Abschälerweiten und gleichen Zusatzgasabschälverhältnissen der oberen Stufen ergeben sich daher nur wenig unterschiedliche Gemischtrennfaktoren und stufeninterne Zirkulationsströme.

Durch die Serienschaltung von bis zu drei zweistufigen Radialverdichtern in den oberen Gemischtrennstufen fällt ab einer Konzentration kleiner 0,1 Mol-%  $UF_6$  bis zu reinem Helium das Kompressionsverhältnis noch maximal 10 % ab. Der Gemischtrennfaktor der oberen Gemischtrennstufen ist daher etwa bis zu 10 % kleiner als der Gemischtrennfaktor der zweiten Gemischtrennstufe. Dies wird bei den Berechnungen der  $UF_6$ -Endkonzentration berücksichtigt, jedoch wird dadurch für die oberen Gemischtrennstufen keine neue Optimierung des Betriebspunktes notwendig.

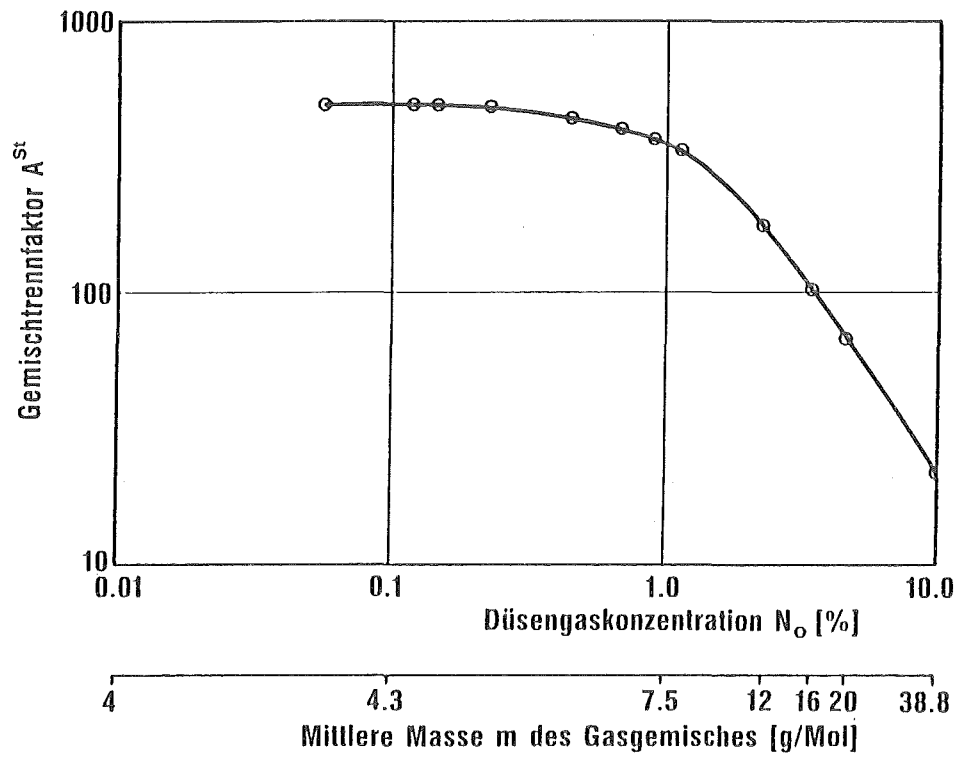


Abb. 14: Einfluß der mittleren Masse  $m$  des Gasgemisches bzw. der Düsengaskonzentration  $N_o$  auf den Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  bei folgenden konstanten Betriebsbedingungen:  
 $p_o^{Lab}=30\text{mbar}$ ,  $\pi=3$ ,  $\theta_Z^{St}=0,94$ ,  $f^I=265\mu\text{m}$ , Zusatzgas Helium

### 4.3 Einfluss des Expansionsverhältnisses und des Düsenvordrucks auf die Gemischtrennung und die Trennelementgröße

In diesem Abschnitt werden der Einfluß von Expansionsverhältnis und Düsenvordruck auf die Gemischtrennung untersucht. Hieraus kann der Einfluß der Trennelementgröße auf die erreichbaren Gemischtrennfaktoren in Abhängigkeit von der Zahl der in Serie geschalteten Verdichter abgeleitet werden.

Um keine Neuentwicklungen durchführen zu müssen, wird für die Kompressoren vom Einsatz von Radialverdichtern der für das Trenndüsenverfahren konventionellen Bauart ausgegangen. Hierbei handelt es sich um zweistufige Verdichter mit Zwischenkühlung nach jeder Verdichterstufe und "back-to-back" Anordnung der Laufräder auf einer vertikalen Welle.

Die Berechnung des Kompressionsverhältnisses  $\pi_{\text{Kom}}$  einer Verdichterstufe erfolgt - wie bei der Auslegung von Verdichtern üblich - durch Ähnlichkeitsbetrachtungen. Dabei wird die Kompressionsarbeit  $H$  eines bekannten "Modellrades" zugrunde gelegt. Geht man davon aus, daß dieses Laufrad dem jeweiligen neuen Arbeitspunkt (Ansaugdruck, Ansaugvolumen, mittlere Masse des Gasgemisches) optimal angepaßt wird (Raddurchmesser, Schaufelhöhe, Gaseintrittswinkel), so bleibt der polytrope Wirkungsgrad  $\eta_{\text{pol}}$  und die Kompressionsarbeit  $H_{\text{pol}}$  der Verdichterstufe bei konstanter Radumfangsgeschwindigkeit annähernd unverändert. Das Kompressionsverhältnis  $\pi_{\text{Kom}}$  der Verdichterstufe läßt sich dann in Abhängigkeit von der mittleren Masse  $m$  des Gasgemisches nach folgender Beziehung (vgl. z. B. /17/) berechnen.

$$\pi(m)_{\text{Kom}} = (m \cdot H_{\text{pol}})^{(x-1) / (R \cdot T_a \cdot x + 1)} [x \cdot \eta_{\text{pol}} / (x-1)] \quad (16)$$

mit	R	allgemeine Gaskonstante
	$T_a$	Gastemperatur an der Verdichteransaugseite
	x	Verhältnis der spezifischen Wärmen
	$\eta_{\text{pol}}$	polytroper Wirkungsgrad
	$H_{\text{pol}}$	polytrope Kompressionsarbeit
	m	mittlere Masse des Gasgemisches

Als Modellrad wurde ein Laufrad der Verdichter der Trenndüsen-Vorabscheidungsstufe für die First Cascade gewählt, da deren Laufräder mit einer hohen Radumfangsgeschwindigkeit von 461 m/s drehen und entsprechend hohe Kompressionsverhältnisse erreicht werden. Eine solche Verdichterstufe leistet eine Kompressionsarbeit von  $H_{pol} \approx 190$  kJ/kg bei einem Wirkungsgrad von  $\eta_{pol} \approx 72$  %.

Abb. 15 zeigt das nach (16) berechnete Kompressionsverhältnis  $\pi_{Kom}$  für eine Serienschaltung von zwei, drei und vier Verdichtern in Abhängigkeit von der  $UF_6$ -Konzentration in Helium. Die Druckverluste für die Gaskühler in Höhe von 1-3 % des Kühlerfordrucks jeder Verdichterstufe sind hierbei berücksichtigt.

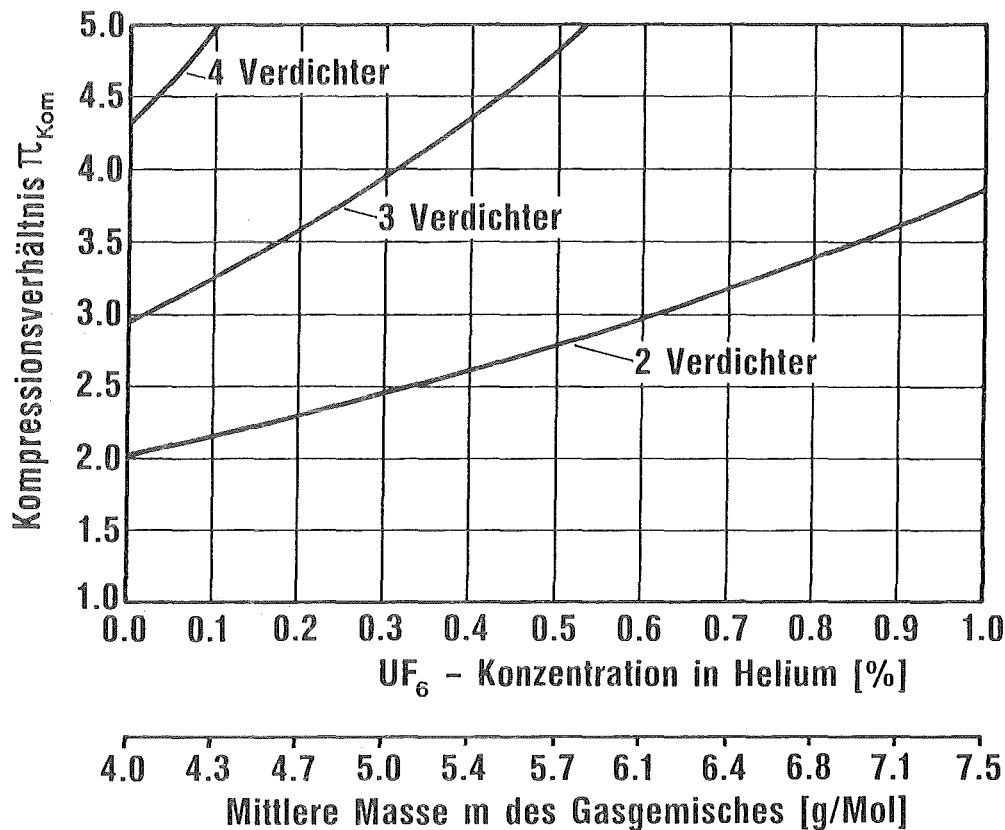


Abb. 15: Kompressionsverhältnis hintereinander geschalteter zweistufiger Radialverdichter in Abhängigkeit von der mittleren Masse  $m$  des Gasmisches bzw. der  $UF_6$ -Konzentration in Helium. Radumfangsgeschwindigkeit 461 m/s. Druckverluste in Höhe von 1-3 % des Kühlerfordrucks für die Gaskühler jeder Verdichterstufe sind berücksichtigt.

Abb. 16 zeigt den Einfluß des Expansionsverhältnisses  $\pi$  auf den Gemischtrennfaktor  $A^{St}$ . Expansionsverhältnisse zwischen zwei und fünf können bei der verwendeten Gemischkonzentration von 0,1 Mol-%  $UF_6$  durch Serienschaltung von zwei bis vier Verdichtern erreicht werden (Abb. 15). Der Düsenvordruck  $p_0^{Lab}$  wurde bei diesen Trennversuchen auf  $p_0^{Lab}=30$  mbar konstant gehalten. Im untersuchten Bereich steigt der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  nahezu linear mit dem Expansionsverhältnis  $\pi$  an.

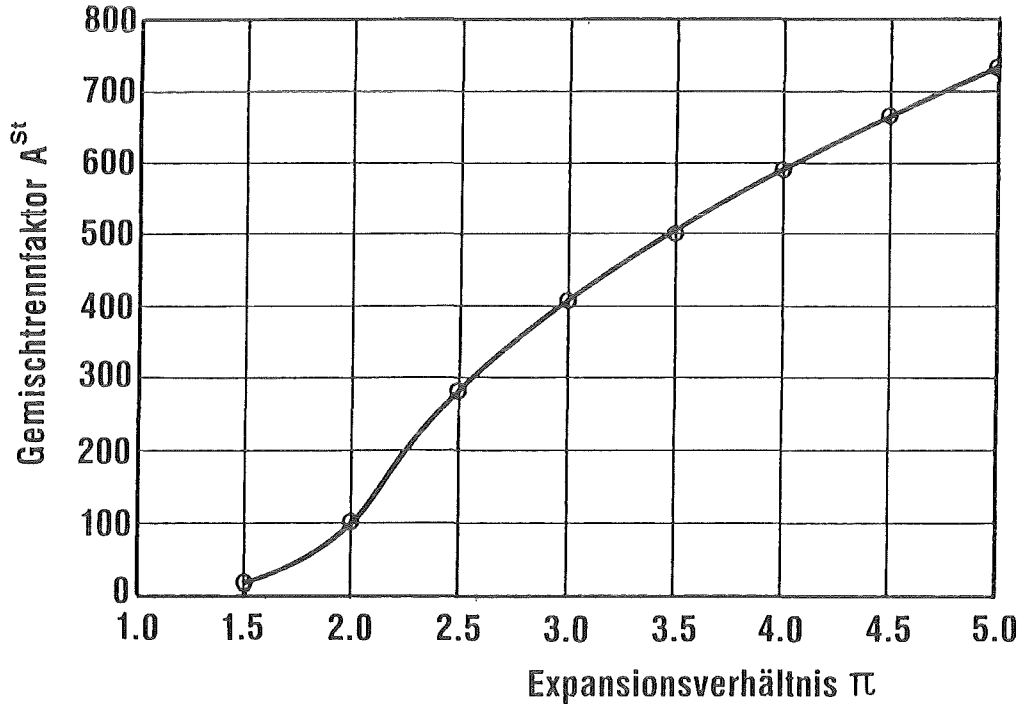


Abb. 16: Einfluß des Expansionsverhältnisses  $\pi$  auf den Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  bei folgenden konstanten Betriebsbedingungen:  
 $N_0=0,1$  Mol-%  $UF_6$  in Helium,  $p_0^{Lab}=30$ mbar,  $\theta_Z^{St}=0,94$ ,  $f^I=200\mu m$

Der Druck in der leichten Fraktion einer Isotopentrennkaskade wird so gewählt, daß sich ein Minimum für die Trennarbeitskosten der Kaskade ergibt. In der Gemischtrennkaskade ist daher der Ansaugdruck  $p_a$  der Verdichter der Gemischtrennstufen vorgegeben. Prinzipiell besteht die Möglichkeit den Druck in der leichten Fraktion der Gemischtrennkaskade unter den Druck der leichten Fraktion der Isotopentrennkaskade abzusenken. Da damit jedoch eine Vergrößerung der Ansaugvolumina der Verdichter und eine Erhöhung der Investitionskosten verbunden ist, wird diese Möglichkeit im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht. Mit zunehmendem Kompressionsverhältnis steigt daher der "technische" Düsenvordruck  $p_0^{tech}$  der Trennelemente der Gemischtrennkaskade linear mit dem Expansionsverhältnis an.



Abb. 17a zeigt den Einfluß des Düsenvordrucks  $p_0^{\text{Lab}}$  auf den Gemischtrennfaktor  $A^{\text{St}}$  für verschiedene Expansionsverhältnisse. Die Expansionsverhältnisse wurden so gewählt, daß sie den Werten entsprechen, die zwei bis vier in Serie geschaltete Verdichter bei einer Düsen-gaskonzentration von 0,1 Mol-%  $\text{UF}_6$  am Trennelement zur Verfügung stellen. Dies entspricht etwa den Betriebsbedingungen der oberen Gemischtrennstufen. Abb. 17b zeigt den Einfluß des Düsenvordrucks  $p_0^{\text{Lab}}$  auf den Gemischtrennfaktor  $A^{\text{St}}$  bei einer Düsengaskonzentration von 1 Mol-%  $\text{UF}_6$  und einem Expansionsverhältnis  $\pi=3,7$ , welches bei dieser Konzentration durch zwei Verdichter erreicht wird.

Aus Abb. 17 ist ersichtlich, daß der Gemischtrennfaktor  $A^{\text{St}}$  jeweils ein Maximum durchläuft. Der zugehörige Düsenvordruck, der als "**optimaler Duesenvordruck**"  $p_0^+(A^{\text{St}})$  bezeichnet wird, ist bei konstanter Düsengaskonzentration nur schwach vom Expansionsverhältnis abhängig.

Der Zusammenhang zwischen dem Expansionsverhältnis  $\pi$  und dem Düsenvordruck  $p_0^{\text{Lab}}$  bei den Trennversuchen ist durch das Größenverhältnis  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}$  der "technischen" Trennelemente von Gemisch- und Isotopentrennkaskade gegeben:

$$p_0^{\text{Lab}} = p_L^{\text{Lab,ITK}} \cdot R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}} \cdot \pi \quad (17)$$

mit  $p_L^{\text{Lab,ITK}}$  Labor-Druck in der leichten Fraktion bei den Trennversuchen für die Trennelemente der Isotopentrennkaskade ( $\approx 20$  mbar).  
 $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}$  Verhältnis der Umlenkradien der Trennelemente der Gemisch- und Isotopentrennkaskade

Bei konstantem "technischem" Düsenvordruck  $p_0^{\text{tech}}$ , der durch das Kompressionsverhältnis der Verdichter vorgegeben wird, muß das "technische" Trennelement um so kleiner sein, je niedriger der Labor-Düsenvordruck  $p_0^{\text{Lab}}$  ist, der als Arbeitspunkt gewählt wird.

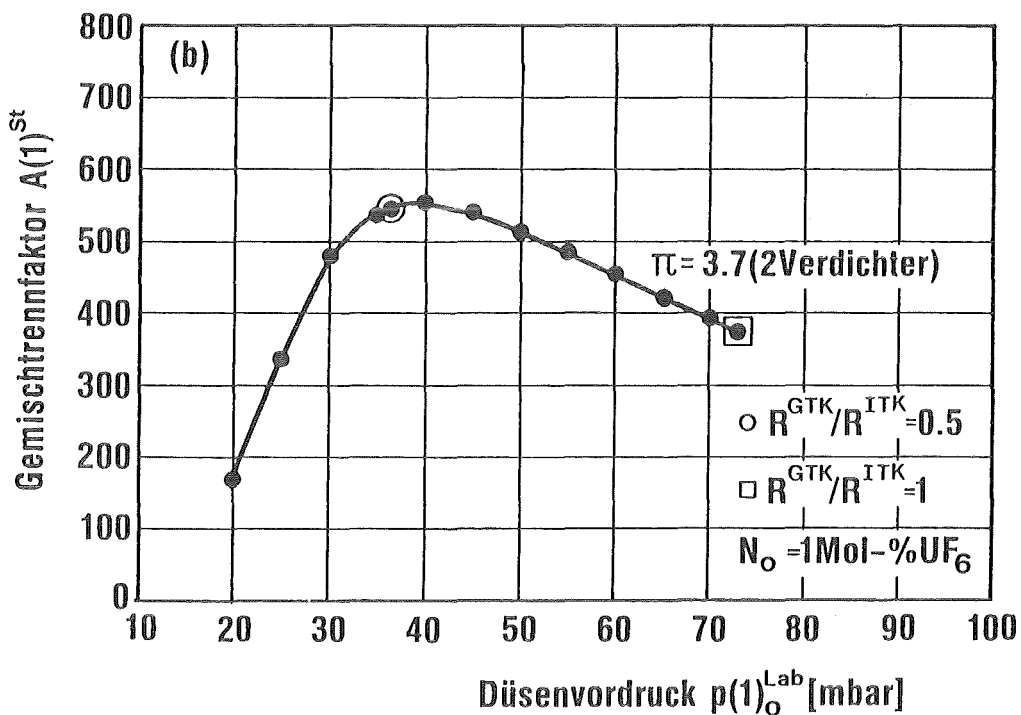
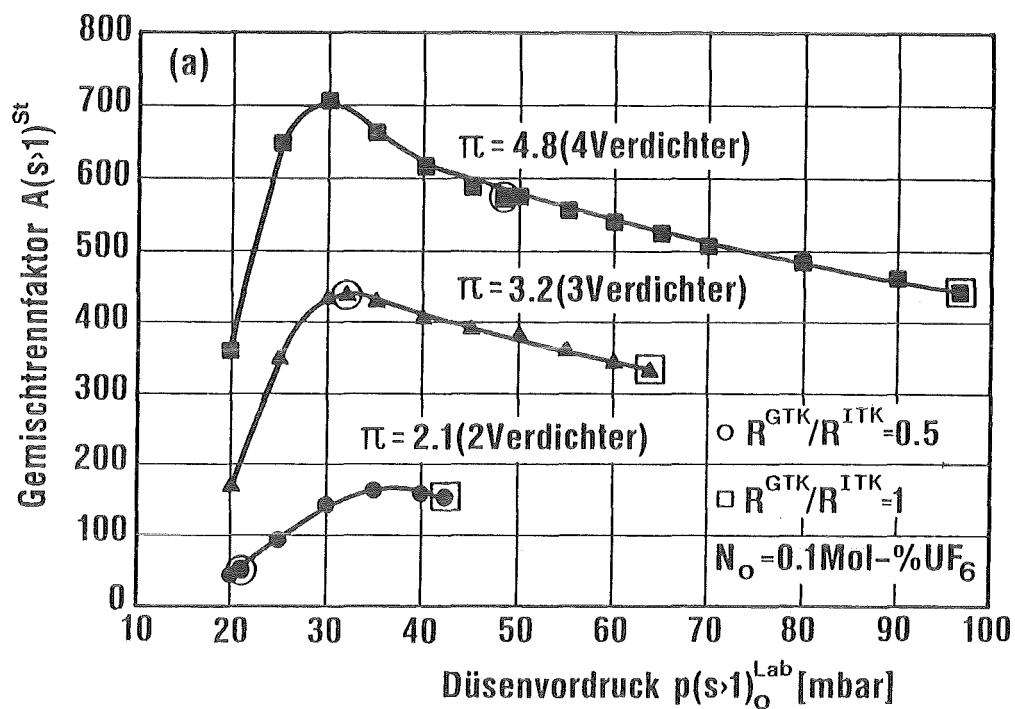


Abb. 17: Einfluß des Düsenvordrucks  $p_o^{Lab}$  auf den Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  bei verschiedenen Expansionsverhältnissen und Düsengaskonzentrationen. Betriebsbedingungen:  $\theta_Z^{St} = 0,94$ ,  $f^I = 200 \mu\text{m}$   
Die Arbeitspunkte für technische Trennelemente verschiedener Größen sind durch  $\circ$  und  $\square$  gekennzeichnet.

Für die **oberen Gemischtrennstufen** ( $N_0 \leq 0,1$  Mol-%) kann Abb. 17a entnommen werden, daß bei einer Serienschaltung von **zwei Verdichtern** und Verwendung von Trennelementen, deren Umlenkradien den Umlenkradien der Trennelemente der Isotopentrennkaskade entsprechen ( $R^{GTK}/R^{ITK}=1$ ), der Arbeitspunkt nahezu mit dem optimalen Düsenvordruck übereinstimmt. Durch eine Verkleinerung der Trennelemente um ca. 20 % kann der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  maximal um ca. 7 % verbessert werden. Bei Verwendung von Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  liegt der Arbeitspunkt bei wesentlich niedrigerem Druck als dem optimalen Düsenvordruck und der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  fällt sogar um etwa einen Faktor 2,8 ab. Bei einer Serienschaltung von zwei Verdichtern in den oberen Gemischtrennstufen wird man also Trennelemente verwenden, deren Umlenkradien den Umlenkradien der Trennelemente der Isotopentrennkaskade entsprechen ( $R^{GTK}/R^{ITK}=1$ ).

Da der optimale Düsenvordruck nur schwach vom Expansionsverhältnis abhängt, liegt bei einer Serienschaltung von **drei Verdichtern** und Verwendung von Trennelementen, deren Umlenkradien den Umlenkradien der Trennelemente der Isotopentrennkaskade entsprechen, der Arbeitspunkt weit oberhalb des optimalen Düsenvordrucks. Da das Expansionsverhältnis jedoch um 50 % höher ist als bei zwei Verdichtern, ist der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  bei gleicher Trennelementgröße trotzdem um etwa einen Faktor 2,2 höher. Durch Verkleinerung der Umlenkradien der Trennelemente um den Faktor zwei ( $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$ ) ergibt sich als Betriebspunkt etwa gerade der optimale Düsenvordruck und der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  kann um ca. 32 % erhöht werden.

Bei einer Serienschaltung von **vier Verdichtern** liegt selbst bei Verwendung von relativ kleinen Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  der Betriebspunkt deutlich oberhalb des optimalen Düsenvordrucks. Unabhängig von der Trennelementgröße ergibt sich jedoch noch eine deutliche Steigerung des Gemischtrennfaktors  $A^{St}$  um ca. 30 % gegenüber der Serienschaltung von drei Verdichtern.

Für die **erste Gemischtrennstufe** kann Abb. 17b entnommen werden, daß schon bei einer Serienschaltung von **zwei Verdichtern** der Arbeitspunkt von Trennelementen, deren Umlenkradien den Umlenkradien der Trennelemente der Isotopentrennkaskade entsprechen, deutlich oberhalb des optimalen Düsenvordrucks liegt. Bei Einsatz von kleineren Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  liegt der Arbeitspunkt nahezu beim optimalen Düsenvordruck und der Gemischtrennfaktor  $A^{St}$  kann durch diese Trennelementverkleinerung um ca. 46 % erhöht werden. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, daß durch eine Serienschaltung von drei Verdichtern ( $\pi=7,5$ ) der Arbeitspunkt zu so hohem Düsenvordruck verschoben wird, daß dies selbst bei kleinen Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  nicht mehr sinnvoll erscheint. Andererseits erzeugt nur ein Verdichter ein so niedriges Kompressionsverhältnis ( $\pi=1,85$ ), daß die erreichten Gemischtrennfaktoren  $A^{St}\approx 45$  etwa denen der Isotopentrennkaskade entsprechen, was für die angestrebte Gemischtrennkaskade mit nur drei oder vier Stufen nicht ausreichend ist.

#### 4.4 Einfluss des kaskadeninternen Zirkulationsstromes auf die Gemischtrennung

In Kap. 3 wurde gezeigt, daß das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen kleiner als das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{GTK}$  der Gemischtrennkaskade sein kann und in diesem Fall für eine vorgegebene Trennaufgabe die notwendigen Gemischtrennfaktoren  $A(s)^{St}$  deutlich kleiner werden. Welche Gemischtrennfaktoren  $A(s>1)^{St}$  in Abhängigkeit vom Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  erreicht werden können, kann Abb. 18a entnommen werden, in welcher für verschiedene Abschälerweiten  $f(s>1)^I$  von 69  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$  der Gemischtrennfaktor  $A(s>1)^{St}$  aufgetragen ist. Die unterschiedlichen Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s>1)_Z^{St}$  wurden durch Variation der Abschälerweite  $f(s>1)^{II}$  der zweiten Düse des Doppelumlenksystems bzw. des Rückstaus  $p_S/p_M$  eingeregelt. Betrachtet man nochmals ein Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}=0,94$ , so kann man Abb. 18a den in Abschn. 4.1 diskutierten Vorteil von Doppelumlenkssystemen entnehmen, durch den der Gemischtrennfaktor  $A(s>1)^{St}$  gegenüber Einzelumlenkssystemen um bis zu einem Faktor 8 erhöht werden kann.

Bei konstanter Abschälerweite  $f(s>1)^I$  fällt der Gemischtrennfaktor  $A(s>1)^{St}$  nahezu linear mit kleiner werdendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  ab (Abb. 18a). Entscheidend für die Zusatzgasanreicherung der Gemischtrennkaskade, d. h. die erreichbare  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration  $N_{\text{end}}$ , ist jedoch der Anreicherungsfaktor  $\alpha^{St}=A^{St}/\beta^{St}$ . Da der Abreicherungsfaktor  $\beta(s>1)^{St}$  mit kleiner werdendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  sehr steil abfällt (Abb. 18b), steigt trotz des Abfalls des Gemischtrennfaktors  $A(s>1)^{St}$  der Anreicherungsfaktor  $\alpha(s>1)^{St}$  an (Abb. 18c). So fällt beispielsweise bei einer Abschälerweite  $f(s>1)^I=200\mu\text{m}$  der Gemischtrennfaktor  $A(s>1)^{St}$  bei einer Abnahme des Zusatzgasabschälverhältnisses von  $\theta(s>1)_Z^{St}=0(1)_Z^{St}=0,94$  auf  $\theta(s>1)_Z^{St}=0,80$  um 19 % ab, da der Abreicherungsfaktor  $\beta(s>1)^{St}$  aber gleichzeitig um einen Faktor 3,3 abnimmt, steigt der Anreicherungsfaktor  $\alpha(s>1)^{St}$  um einen Faktor 2,7 an.

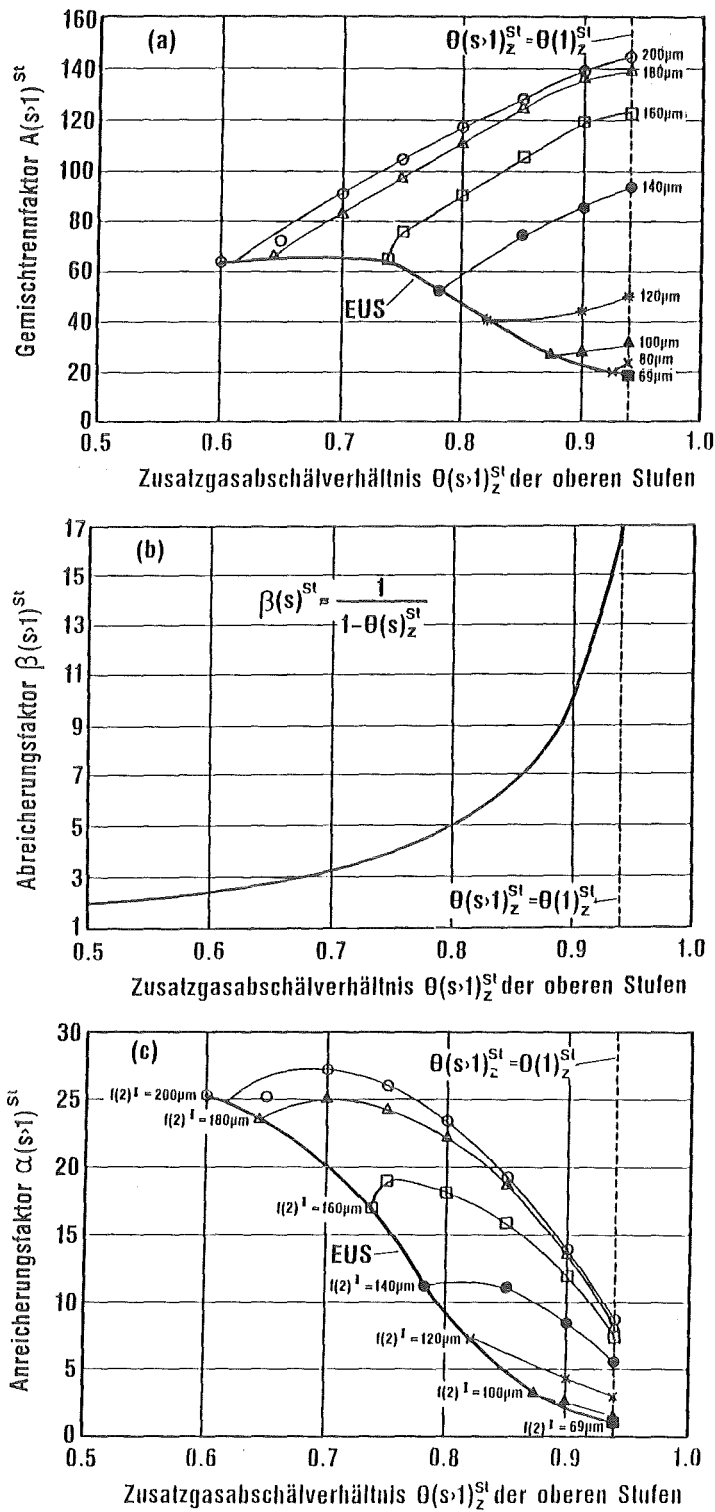


Abb. 18: Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  auf den Gemischtrennfaktor  $A(s>1)^{St}$  (a), den Abreicherungsfaktor  $\beta(s>1)^{St}$  (b) und den Anreicherungsfaktor  $\alpha(s>1)^{St}$  (c) der oberen Gemischtrennstufen bei folgenden konstanten Betriebsbedingungen:

$N_0 = 0,1 \text{ Mol-\% UF}_6 \text{ in Helium}$ ,  $\pi = 2,1$ ,  $p_0^{\text{Lab}} = 42,4 \text{ mbar}$

Der Abbildung kann weiter entnommen werden, daß mit kleiner werdendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der maximale Unterschied zwischen Doppelumlenksystemen und Einzelumlenksystemen kleiner wird. Die Verbesserung beim Einzelumlenksystem ist darauf zurückzuführen, daß diese nun ebenfalls bei größeren Abschälerweiten betrieben werden können und so das  $UF_6$ -Abschälverhältnis stark verringert werden kann (Abb. 13a). Bei einem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}=0,80$  beträgt die maximale Verbesserung des Gemischtrennfaktors mit einem Doppelumlenksystem gegenüber einem Einzelumlenksystem nur noch etwa einen Faktor drei, während der Gemischtrennfaktor bei einem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}=0,94$  um etwa einen Faktor acht verbessert werden kann.

Wie Abb. 19a zeigt, nimmt einerseits mit kleiner werdendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  und mit kleiner werdender Abschälerweite  $f(s>1)^I$  der interne Zirkulationsstrom  $Z(s>1)^{St}$  innerhalb einer Trennstufe ab. Andererseits gelangt mit kleiner werdendem Zusatzgasabschälverhältnis immer mehr Zusatzgas in die schwere Fraktion und wird vor die darunter liegende Stufe zurückgespeist (Abb. 7). Neben dem stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z^{St}$  entsteht ein kaskadeninterner Zirkulationsstrom  $Z^{GTK}$ , der wie der stufeninterne Zirkulationsstrom größere Verdichter und mehr Trennelementschlitzlänge bedingt.

Abb. 19b zeigt als Beispiel die kaskadeninternen Zirkulationsströme einer dreistufigen Gemischtrennkaskade. Die kaskadeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{GTK}$  wurden so definiert, daß sich für gleiche Zusatzgasabschälverhältnisse in allen Stufen der Wert 0 ergibt, d. h.  $Z(s)^{GTK}(\theta_Z^{St}=0,94)=0$ . Abb. 19b ist zu entnehmen, daß der kaskadeninterne Zirkulationsstrom  $Z(3)^{GTK}$  der dritten Gemischtrennstufe am niedrigsten ist, da dieser Stufe keine schwere Fraktion zugeführt wird (Abb. 7). Der kaskadeninterne Zirkulationsstrom  $Z(2)^{GTK}$  der zweiten Gemischtrennstufe ist am höchsten, da diese Stufe sowohl direkt den erhöhten Zusatzgasstrom der schweren Fraktion der dritten Stufe, als auch indirekt über die erste Stufe den erhöhten Zusatzgasstrom ihrer eigenen schweren Fraktion erhält.

Wie sich die stufen- und kaskadeninternen Zirkulationsströme auf die Ansaugvolumina der (jeweils ersten) Verdichter der Gemischtrennstufen auswirken, wird an Abb. 19c beispielhaft für eine dreistufige Gemischtrennkaskade gezeigt. Die Abschälerweiten der ersten Düsen der Doppelumlenksysteme betragen für die erste Stufe  $f(1)^I=150 \mu\text{m}$  und für die oberen Stufen  $f(s>1)^I=180 \mu\text{m}$ ; sie wurden so gewählt, daß sich für die Gemischtrennkaskade die optimalen Betriebsbedingungen ergeben (vgl. nachfolgende Abschnitte). Zum Vergleich ist in Abb. 19c auch der in die Gemischtrennkaskade einströmende Volumenstrom gestrichelt eingezeichnet.

Wird bei diesen konstanten Abschälerweiten das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{\text{St}}$  der oberen Stufen unter den Wert von  $\theta(s>1)_Z^{\text{St}}=0,94$  reduziert, so wird bei der dritten Gemischtrennstufe die Abnahme des stufeninternen Zirkulationsstromes  $Z(3)^{\text{St}}$  (Abb. 19a) gerade durch die Zunahme des kaskadeninternen Zirkulationsstromes  $Z(3)^{\text{GTK}}$  kompensiert (Abb. 19b), so daß unabhängig von der Wahl des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{\text{St}}$  das Verdichteransaugvolumen nahezu konstant bleibt.

Die Ansaugvolumina der Verdichter der ersten und zweiten Stufe steigen dagegen mit abnehmendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{\text{St}}$  der oberen Stufen an. Dabei ist das Verdichteransaugvolumen der ersten Stufe geringfügig größer als in der zweiten Stufe, obwohl der kaskadeninterne Zirkulationsstrom der zweiten Stufe höher ist als in der ersten Stufe (Abb. 19b). Dies ist darauf zurückzuführen, daß in der zweiten Stufe der stufeninterne Zirkulationsstrom abfällt (Abb. 19a) während er in der ersten Stufe aufgrund des nahezu konstanten Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(1)_Z^{\text{St}} \approx 0,94$  (Abb. 10) sich nur geringfügig ändert.

Verkleinert man in dem in Abb. 19c gezeigten Beispiel bei konstanten Abschälerweiten das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{\text{St}}$  der oberen Stufen von 0,94 auf 0,80, so steigt das Verdichteransaugvolumen der ersten beiden Stufen um ca. 30 % an. Hierdurch wird der Anreicherungsfaktor in den beiden oberen Stufen um den Faktor 2,7 erhöht (Abb. 18c).



In diesem Arbeitspunkt  $\theta(s>1)_{\Sigma}^{St}=0,80$  beträgt das Verdichteransaugvolumen der ersten beiden Stufen etwa das 4,7-fache des Ansaugvolumens der Verdichter der Isotopentrennkaskade, in der letzten Stufe ist das Verdichteransaugvolumen nur um den Faktor 3,7 größer. Beträgt das Ansaugvolumen der Verdichter der Isotopentrennkaskade  $33.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , so liegt das maximale Ansaugvolumen der Verdichter der Gemischtrennkaskade unter  $155.000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

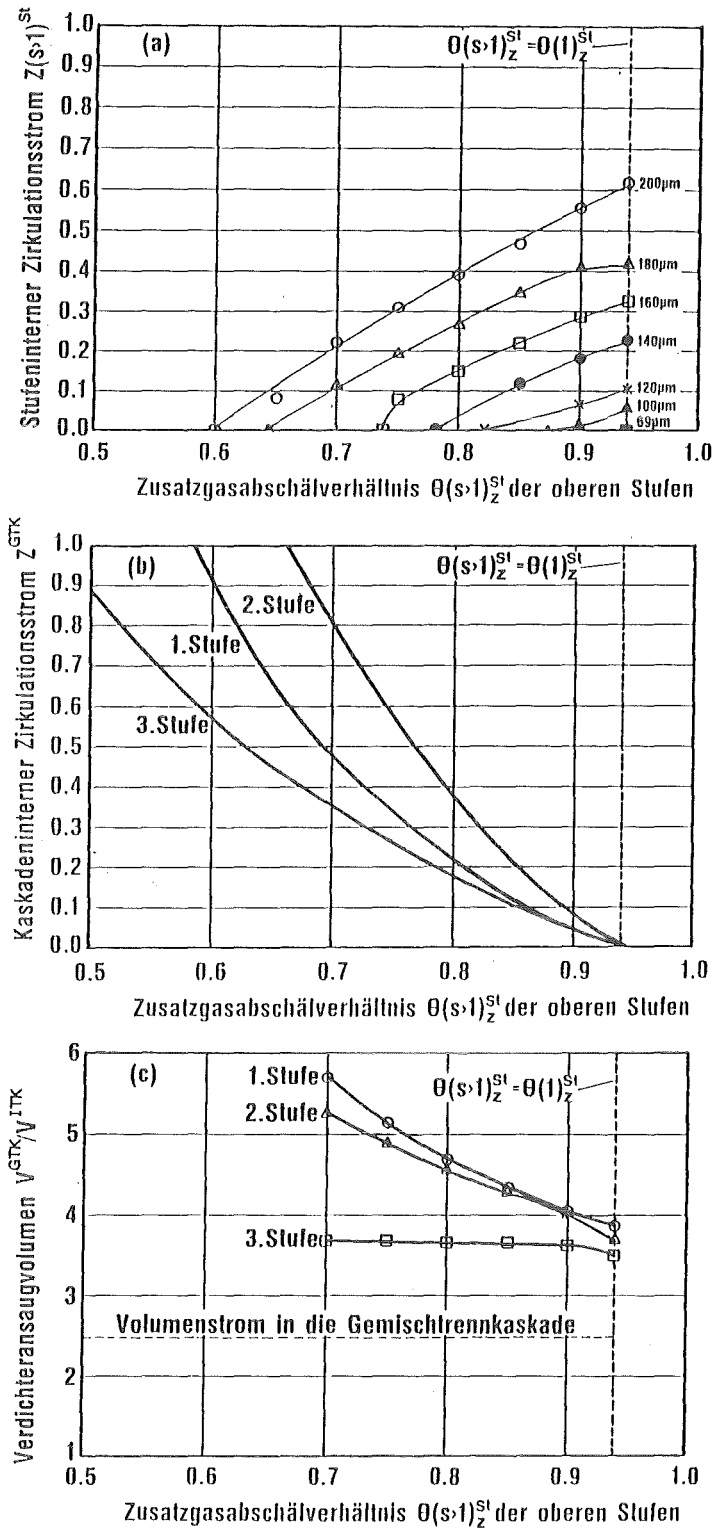


Abb. 19: Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Stufen auf den stufeninternen  $Z^{St}$  (a) und den kaskadeninternen  $Z^{GTK}$  (b) Zirkulationsstrom sowie auf das Ansaugvolumen des jeweils ersten Verdichters der Gemischtrennstufen normiert auf das Verdichteransaugvolumen in der Isotopentrennkaskade  $V^{GTK}/V^{ITK}$  (c) bei folgenden konstanten Betriebsbedingungen:  
 $N_0=0,1$  Mol-%  $\text{UF}_6$  in Helium,  $\pi=2,1$ ,  $p_0^{Lab}=42,4$  mbar

#### 4.5 Einfluss der Gemischtrennung in der Isotopentrennkaskade und des Zusatzgasabschälverhältnisses der oberen Gemischtrennstufen auf die Gemischtrennung der ersten Gemischtrennstufe

In Kap. 3 wurde gezeigt, daß das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe durch die Gemischtrennung in der Isotopentrennkaskade vorgegeben wird und bei einer Absenkung der Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen geringfügig erhöht werden muß. In diesem Abschnitt wird gezeigt, welche Gemischtrennfaktoren  $A(1)^{St}$  bei einem vorgegebenem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}$  erreicht werden können.

Abb. 20 zeigt den Einfluß des stufeninternen Zirkulationsstromes  $Z(1)^{St}$  auf den Gemischtrennfaktor  $A(1)^{St}$  der ersten Stufe für zwei Trennelementgrößen. Abb. 20 kann entnommen werden, daß für beide Trennelementgrößen mit größer werdendem stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z(1)^{St}$  der Gemischtrennfaktor  $A(1)^{St}$  zunächst nahezu linear ansteigt. Das Ende des linearen Anstiegs wird bei Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  bereits bei einem stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z(1)^{St}\approx 0,3$  erreicht, während bei Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=1$  der Gemischtrennfaktor  $A(1)^{St}$  bis zu einem stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z(1)^{St}\approx 0,5$  linear ansteigt.

Der Arbeitspunkt der Trennelemente mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  liegt nahezu beim optimalen Düsenvordruck, während der Arbeitspunkt der Trennelemente mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=1$  weit oberhalb des optimalen Düsenvordrucks liegt (Abb. 17b), deshalb sind die mit den kleinen Trennelementen erzielbaren Gemischtrennfaktoren  $A(1)^{St}$  bei gleichem stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z(1)^{St}$  höher.

Da die Trennversuche bei konstantem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}=0,94$ , d. h. bei konstantem Abreicherungsfaktor  $\beta(1)^{St}$  durchgeführt wurden, gilt für den Anreicherungsfaktor  $\alpha(1)^{St}$ , der sich vom Gemischtrennfaktor  $A(1)^{St}$  um den Faktor  $1/(1-\theta(1)_Z^{St})=16,7$  unterscheidet, die gleiche Abhängigkeit.

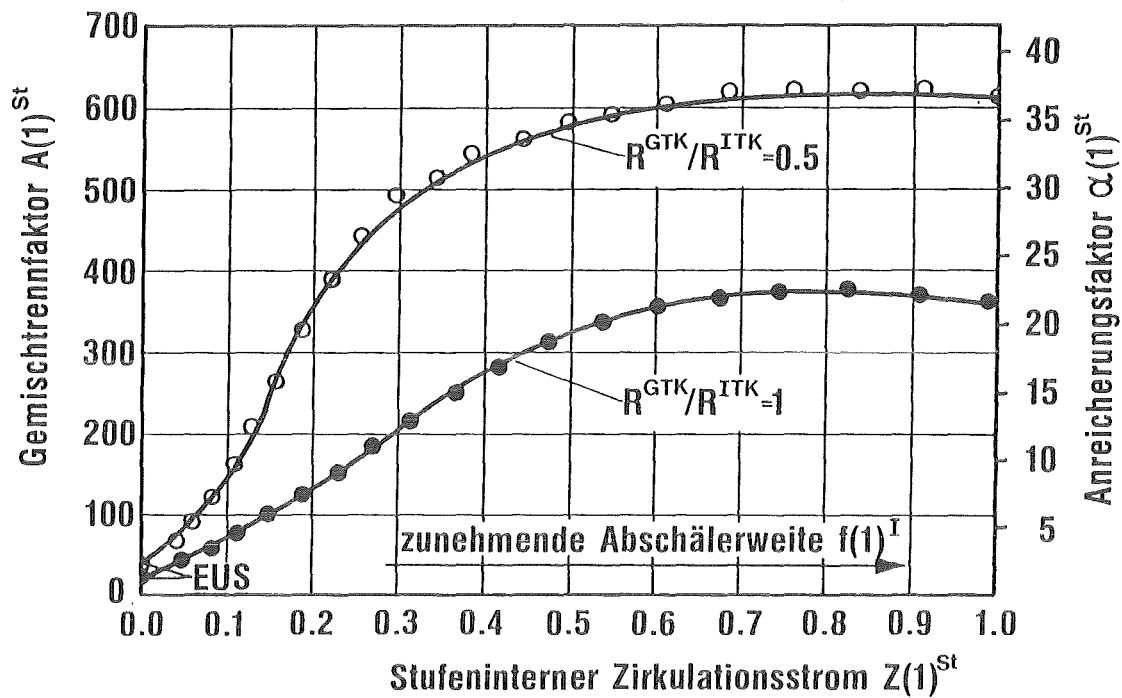


Abb. 20: Einfluß des stufeninternen Zirkulationsstromes  $Z(1)^{St}$  auf den Gemischtrennfaktor  $A(1)^{St}$  und den Anreicherungsfaktor  $\alpha(1)^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe bei folgenden konstanten Betriebsbedingungen:

$$N_0 = 1 \text{ Mol-\% UF}_6 \text{ in Helium, } \pi = 3,7, \theta_Z^{St} = 0,94$$

Im Gegensatz zu den oberen Gemischtrennstufen, bei denen das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  in gewissen Grenzen frei wählbar ist, ist das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe durch die Gemischtrennung in der Isotopentrennkaskade annähernd vorgegeben. Aus Abb. 10 war ersichtlich, daß bei einer Verkleinerung des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe geringfügig erhöht werden muß.

Aus Abb. 21 kann entnommen werden, daß im untersuchten Bereich von  $\theta(1)_Z^{St} = 0,94$  bis  $\theta(1)_Z^{St} = 0,98$  der Gemischtrennfaktor  $A(1)^{St}$  mit zunehmendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}$  leicht ansteigt. So nimmt in diesem Bereich der Gemischtrennfaktor  $A(1)^{St}$  bei Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK} = 1$  um ca. 10 %, bei Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK} = 0,5$  um ca. 17 % zu.

Da aber mit zunehmendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St}$  auch der Abreicherungsfaktor mit  $\beta(1)^{St} \approx 1/(1-\theta(1)_Z^{St})$  ansteigt, nimmt der Anreicherungsfaktor  $\alpha(1)^{St}$  der ersten Stufe bei einer Verkleinerung des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Stufen ab (Abb. 22). Beispielsweise beträgt unabhängig von der Trennelementgröße die Abnahme des Anreicherungsfaktors  $\alpha(1)^{St}$  bei einer Absenkung des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  von 0,94 auf 0,80 bei einer Gemischtrennkaskade für eine Isotopentrennkaskade mit Einzelumlenksystemen ca. 12 %.

Einen wesentlich stärkeren Einfluß auf den Anreicherungsfaktor  $\alpha(1)^{St}$  der ersten Stufe hat dagegen die Wahl der Trennelemente in der Isotopentrennkaskade. Verwendet man statt Einzelumlenksystemen Doppelumlenksysteme zur Isotopentrennung, so fällt trotz des leichten Anstiegs des Gemischtrennfaktors  $A(1)^{St}$  (Abb. 20) der Anreicherungsfaktor  $\alpha(1)^{St}$  um den Faktor 2,3 ab, da der Abreicherungsfaktor  $\beta(1)^{St}$  der ersten Stufe um den gleichen Faktor (2,6) angehoben werden muß wie sich der Gemischtrennfaktor  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade erhöht hat.

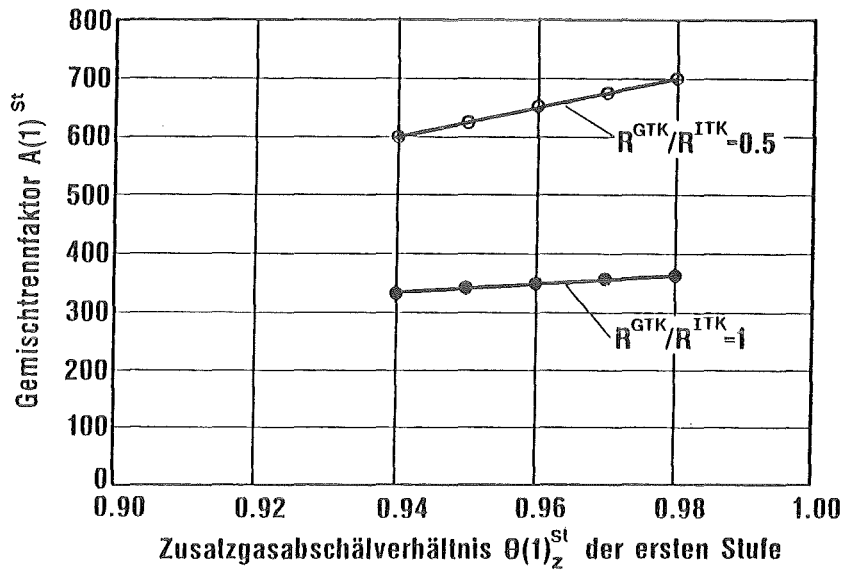


Abb. 21: Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(1)_Z^{St}$  auf den Gemischtrennfaktor  $A(1)^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe bei folgenden konstanten Betriebsbedingungen:  
 $N_0 = 1$  Mol-%  $UF_6$  in Helium,  $\pi = 3,7$ ,  $Z^{St} = 0,5$

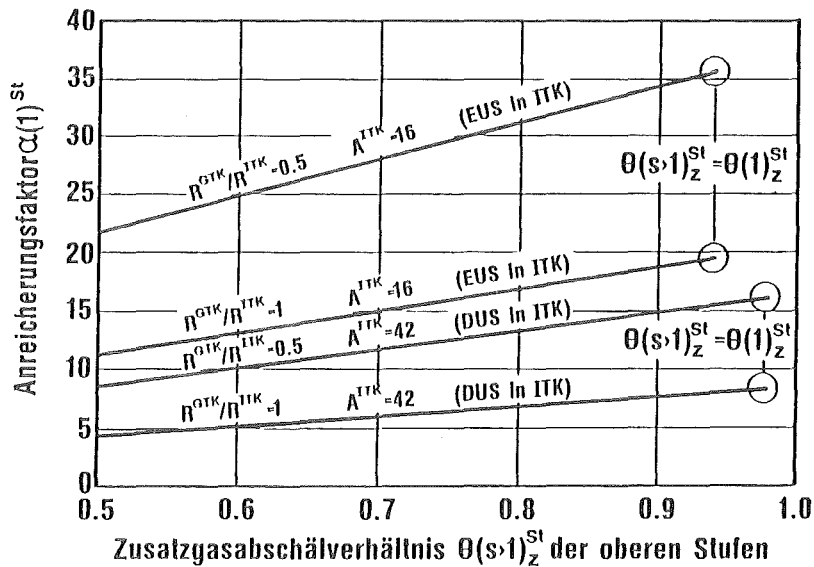


Abb. 22: Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Stufen und des Gemischtrennfaktors  $A^{ITK}$  der Isotopentrennkaskade auf den Anreicherungsfaktor  $\alpha(1)^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe.

## 5. Bewertungskriterien für die Optimierung der Auslegung und der Betriebsweise von Gemischtrennkaskaden

In Kap. 4 wurde gezeigt, welche Gemischtrennfaktoren in einer Gemischtrennstufe erreicht werden können und welcher technische Aufwand dazu notwendig ist. In diesem Kapitel werden die Bewertungskriterien beschrieben, mit welchen ein Vergleich zwischen Aufwand und erreichter  $UF_6$ -Endkonzentration möglich ist und welche zur Optimierung der Gemischtrennkaskaden herangezogen werden.

### 5.1 Normierte Investitionskosten und normierter Energieverbrauch

Der Aufwand für die Gemischtrennkaskade setzt sich aus den Investitionskosten und den Betriebskosten zusammen. Die Investitionskosten werden im wesentlichen durch die Verdichter bestimmt, sind also abhängig von deren Anzahl und Ansaugvolumen, die Betriebskosten sind im wesentlichen durch den Energieverbrauch der Verdichter vorgegeben.

Für die Kompressionsarbeit in der Gemisch- und Isotopentrennkaskade wird hier vereinfachend die ideale isotherme Kompressionsarbeit ( $E \approx \ln \pi$ ) verwendet. Da der Ansaugdruck der Verdichter in der Isotopentrennkaskade gleich dem Ansaugdruck der ersten Verdichter in den Stufen der Gemischtrennkaskade ist, ist das Verhältnis der Kompressionsarbeiten unabhängig vom Ansaugdruck. Die Investitionskosten für die einzelnen Verdichter werden proportional zur Wurzel des Ansaugvolumens  $V$  angenommen.

Die Kosten für die Verdichter der Gemischtrennkaskade werden, ebenso wie der Energieverbrauch auf die entsprechenden Größen der Isotopentrennkaskade bezogen. Die so normierten **Investitionskosten I** und der normierte **Energieverbrauch E** der **Gemischtrennkaskade** werden nach folgender Beziehung berechnet:

$$I = \sum_s \sum_t \sqrt{V_{s,t}^{GTK}} / ( \sqrt{V^{ITK}} \cdot S^{ITK} ) \quad (18.1)$$

$$E = \sum_s V_{s,t=1}^{GTK} \cdot \ln \pi_{Kom,s}^{GTK} / ( S^{ITK} \cdot V^{ITK} \cdot \ln \pi_{Kom}^{ITK} ) \quad (18.2)$$

mit	s	Index für Gemischtrennstufe
	t	Index für die in Serie geschalteten Verdichter einer Gemischtrennstufe
	$S^{ITK}$	Anzahl der Stufen der Isotopentrennkaskade
	$V_{s,t}^{GTK}$	Ansaugvolumen der Verdichter der Gemischtrennstufen
	$V^{ITK}$	Ansaugvolumen der Verdichter der Stufen der Isotopentrennkaskade ( $V^{ITK}=33.000 \text{ m}^3/\text{h}$ )
	$\pi_{Kom,s}^{GTK}$	Gesamtkompressionsverhältnis der hintereinandergeschalteten Verdichter in einer Gemischtrennstufe
	$\pi_{Kom}^{ITK}$	Kompressionsverhältnis der Verdichter der Stufen der Isotopentrennkaskade ( $\pi_{Kom}^{ITK}=2.7$ )

In diesen normierten Investitionskosten sind die Kosten für die Trennelemente nicht enthalten, deren Beitrag an den Investitionskosten jedoch unter 10 % liegt /18/.

## 5.2 Trennleistungsverluste durch $UF_6$ -Restmengen im Zusatzgasrückstrom

Beim Einsatz einer Gemischtrennkaskade am Kopf einer Isotopentrennkaskade ist das zum Kaskadenfuß zurückgespeiste Zusatzgas nicht völlig  $UF_6$ -frei, sondern es verbleibt eine Endkonzentration  $N_{end}$ . Hierdurch wird die Trennleistung  $\Delta U$  der Isotopentrennkaskade reduziert. Der relative Verlust an Trennleistung  $VT$  ist wie folgt definiert:

$$VT = 1 - \Delta U(N_{end}) / \Delta U(N_{end}=0) \quad (19)$$



Die Trennleistungsverluste werden nach den in /12/ angegebenen Gleichungen berechnet; sie steigen in dem in Betracht zu ziehenden Bereich linear mit der  $UF_6$ -Endkonzentration  $N_{end}$  an, hängen aber auch stark von der gewählten Isotopentrennkaskade ab.

Da die Menge des zum Kaskadenfuß zurückgespeisten Zusatzgases von der gewählten Verschaltung in der Isotopentrennkaskade abhängt, sind bei gleicher  $UF_6$ -Endkonzentration die Trennleistungsverluste bei Isotopentrennkaskaden mit Doppelumlenksystemen und  $\vartheta_U=1/3$ -Schaltung niedriger als bei Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlenksystemen und  $\vartheta_U=1/4$ -Schaltung.

Da in einer Rechteck-Isotopentrennkaskade mit steigender Stufenzahl der optimale Produktstrom abnimmt, steigen bei gleichem  $UF_6$ -Reststrom die relativen Trennleistungsverluste  $VT$  mit der Stufenzahl an.

Die geringsten Trennleistungsverluste ergeben sich also bei Kaskaden mit wenigen Stufen. Bei diesen Kaskaden mit Stufenzahlen von etwa 100 bis 150 kann der für Reaktorbrandstoff benötigte  $^{235}U$ -Gehalt von 3,2 Mol-% durch mehrmaliges Rezyklieren des angereicherten Materials erzeugt werden. Hier verursacht eine  $UF_6$ -Endkonzentration von  $N_{end}=1$  ppm Trennleistungsverluste von 0,8 bis 0,9 %. Die höchsten Trennleistungsverluste ergeben sich dagegen bei Rechteck-Isotopentrennkaskaden, die in einem Schritt Reaktormaterial erzeugen. Eine  $UF_6$ -Endkonzentration von 1 ppm führt hier zu Trennleistungsverlusten von 5,1 % (Isotopentrennkaskade mit Einzelumlenksystemen) bzw. 4,0 % (Isotopentrennkaskade mit Doppelumlenksystemen).

Die Anforderungen an die Gemischtrennkaskade bzw. an die geforderte  $UF_6$ -Reinheit des Zusatzgasrückstromes werden sich daher für die verschiedenen Isotopentrennkaskaden deutlich unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die optimalen Gemischtrennkaskaden für die als Extremfälle zu betrachtenden Rechteck-Isotopentrennkaskaden mit Einzel- und Doppelumlenksystemen untersucht (Tab. 3).

### 5.3 Normierte spezifische Aufwandsgrößen

Zur Wahl der optimalen Gemischtrennkaskade bzw. der optimalen  $UF_6$ -Endkonzentration  $N_{end}$  im zurückgespeisten Zusatzgas werden die durch die  $UF_6$ -Restströme bedingten Trennleistungsverluste mit dem technischen Aufwand für die Gemischtrennkaskade - Investitionskosten und Energieverbrauch - verglichen. Dieser Vergleich erfolgt mit Hilfe der normierten spezifischen Aufwandsgrößen. Die normierten **spezifischen Investitionskosten**  $I_s$

$$I_s = \frac{\frac{\text{Gesamtinvestitionskosten (ITK+GTK)}}{\text{Effektive Werterzeugung } (\Delta U - \Delta U \cdot VT)}}{\frac{\text{Investitionskosten (ITK)}}{\text{Werterzeugung der ITK } (\Delta U)}} \quad (20.1)$$

sind dabei auf die spezifischen Investitionskosten einer Trenndüsenanlage ohne  $UF_6$ /Zusatzgas-Trennung normiert, d. h.  $I_s=1$  würde sich für eine Trenndüsenanlage ergeben, bei welcher eine vollständige  $UF_6$ /Zusatzgas-Trennung kostenlos erfolgt. Die Abweichung von 1

$$\Delta I_s = I_s - 1 \quad (20.2)$$

stellt somit direkt die Erhöhung der spezifischen Investitionskosten durch die Investitionskosten für die Gemischtrennkaskade und die Trennleistungsverluste VT durch  $UF_6$ -Restmengen im Zusatzgasrückstrom dar.

Entsprechend ist der normierte **spezifische Energieverbrauch**  $E_s$  der Gesamtanlage und die Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs  $\Delta E_s$  definiert.

$$E_s = \frac{\frac{\text{Gesamtenergieverbrauch (ITK+GTK)}}{\text{Effektive Werterzeugung } (\Delta U - \Delta U \cdot VT)}}{\frac{\text{Energieverbrauch (ITK)}}{\text{Werterzeugung der ITK } (\Delta U)}} \quad (20.3)$$

$$\Delta E_s = E_s - 1 \quad (20.4)$$

Unter Verwendung der normierten Investitionskosten  $I$  (18.1) und des normierten Energieverbrauchs  $E$  (18.2) lassen sich die Gleichungen (20) umformen:

$$\Delta I_s = (1+I)/(1-VT) - 1 \approx I+VT \quad (21.1)$$

$$\Delta E_s = (1+E)/(1-VT) - 1 \approx E+VT \quad (21.2)$$

Die Untersuchungen für den optimalen Aufbau und die optimale Betriebsweise von Gemischtrennkaskaden unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wurde für die in Tabelle 3 angegebenen Rechteck-Isotopentrennkaskaden durchgeführt, die sich in den Stufenzahlen und den verwendeten Trennsystemen unterscheiden.

Bezeichnung	132EUS	396EUS	120DUS	240DUS
Stufenzahl	132	396	120	240
Trennsystem	EUS	EUS	DUS	DUS
UF <sub>6</sub> -Abschälverhältnis $\beta_U$	1/4	1/4	1/3	1/3
Gemischtrennfaktor $A^{ITK}$	16	16	42	42
relative Verluste an Trennleistung				
VT [%] für $N_{end}=1\text{ppm}$	0,8	5,1	0,9	4,0
$\theta_Z^{GTK}$	0,937	0,937	0,976	0,976
Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h] in die GTK	82.000	82.000	54.000	54.000

Tab. 3: Kenndaten verschiedener Isotopentrennkaskaden.

Die Rechteck-Isotopentrennkaskaden 396EUS und 240DUS sind Kaskaden, die bei einer Abstreifkonzentration von 0,35 Mol-% <sup>235</sup>U in einem Schritt auf den für Leichtwasserreaktoren erforderlichen <sup>235</sup>U-Gehalt von 3,2 Mol-% anreichern. Die Rechteck-Isotopentrennkaskade 132EUS benötigt hierzu fünf, die Rechteck-Isotopentrennkaskade 120DUS drei Recycling Schritte. Für alle vier Rechteck-Isotopentrennkaskaden wird der gleiche Stufentyp SR33/2 mit einem Ansaugvolumen von 33.000 m<sup>3</sup>/h zugrunde gelegt, die Konzentration in der leichten Fraktion bzw. die Eingangskonzentration in die Gemischtrennkaskade beträgt für alle Isotopentrennkaskaden  $N_{ein}=0,74$  Mol-% UF<sub>6</sub> in Helium.

In einer Voruntersuchung konnten Gemischtrennkaskaden mit nur einem Verdichter pro Gemischtrennstufe als unwirtschaftlich ausgeschlossen werden, da die damit erreichbaren Gemischtrennfaktoren wesentlich unter den notwendigen Werten liegen. Eine Hintereinanderschaltung von drei Verdichtern in der ersten Gemischtrennstufe oder von vier Verdichtern in den oberen Gemischtrennstufen erwies sich als unvorteilhaft, da selbst Trennelemente mit halb so großen Umlenkradien wie in der Isotopentrennkaskade weit oberhalb des optimalen Betriebspunktes eingesetzt würden und Trennelemente mit kleineren Umlenkradien als  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  hier nicht betrachtet werden.

Ausführlich optimiert wurde die Betriebsweise folgender Gemischtrennkaskaden:

- 2/2/2: Dreistufige Gemischtrennkaskade mit zwei Verdichtern in allen Gemischtrennstufen.
- 2/3/3: Dreistufige Gemischtrennkaskade mit zwei Verdichtern in der ersten und jeweils drei Verdichtern in den beiden oberen Gemischtrennstufen.
- 2/2/2/2: Vierstufige Gemischtrennkaskade mit zwei Verdichtern in allen Gemischtrennstufen.

Bei der Gemischtrennkaskade mit drei Verdichtern in den oberen Gemischtrennstufen wurde sowohl der Einsatz von Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=1$  als auch mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  untersucht. Bei den Gemischtrennkaskaden mit zwei Verdichtern in den oberen Gemischtrennstufen wurde nur der Einsatz von Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=1$  untersucht, da diese dort im optimalen Betriebspunkt arbeiten (Abschn. 4.3). Stets wurde davon ausgegangen, daß die Umlenkradien der Trennelemente aller Gemischtrennstufen gleich groß sind.

Die Untersuchungen zur optimalen Betriebsweise der Gemischtrennkaskaden wurden unter der Randbedingung durchgeführt, daß sowohl die Abschälerweite  $f^I$  als auch das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_z^{St}$  für die zweite und alle folgenden Gemischtrennstufen gleich sind.

Durch die hier gewählte Normierung auf die Kenndaten der Isotopentrennkaskade sind die Ergebnisse unabhängig von der Größe der in der Isotopentrennkaskade eingesetzten Trennelemente bzw. dem Ansaugdruck  $p_a$  der Verdichter.

## 6. Ergebnisse der Untersuchungen zur Auslegung von Gemischtrennkaskaden

### 6.1 Beispiel für die Optimierung der Betriebsweise einer Gemischtrennkaskade

In diesem Abschnitt wird die Optimierung der Betriebsweise einer Gemischtrennkaskade am Beispiel der dreistufigen Gemischtrennkaskade mit jeweils zwei Verdichtern (2/2/2) für eine Isotopentrennkaskade mit 132 Stufen und Einzelumlenksystemen erläutert.

Für eine Gemischtrennkaskade, deren Stufen- und Verdichteranzahl vorgegeben ist, müssen noch die stufeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{St}$  sowie die kaskadeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{GTK}$  bzw. die Zusatzgasabschälverhältnisse  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Stufen optimiert werden. Dabei werden die Zirkulationsströme  $Z(1)^{St}$  der ersten Stufe und die Zirkulationsströme  $Z(s>1)^{St}$  der oberen Stufen als unabhängig voneinander betrachtet, da sich die Betriebsbedingungen dieser Stufen stark unterscheiden und nur in den oberen Stufen das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  frei wählbar ist.

Diese drei freien Parameter ( $Z(1)^{St}$ ,  $Z(s>1)^{St}$  und  $Z(s)^{GTK}$ ) werden unabhängig voneinander variiert und so das Minimum der spezifischen Investitionskosten und das Minimum des spezifischen Energieverbrauchs gesucht. Zur Bestimmung der stufeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{St}$  und der Gemischtrennfaktoren  $A(s)^{St}$  werden Trennversuche durchgeführt, bei denen die Abschälerweiten  $f(s)^I$  und das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen systematisch variiert werden. Bei den Trennversuchen für die erste Gemischtrennstufe wird eine Düsengaskonzentration  $N_0=1$  Mol-%  $UF_6$ , bei den Trennversuchen für die zweite Gemischtrennstufe wird eine Düsengaskonzentration  $N_0=0,1$  Mol-%  $UF_6$  in Helium verwendet. Wie sich diese Variation der Zirkulationsströme  $Z(s)^{St}$  und  $Z(s)^{GTK}$  auf die erreichbare  $UF_6$ -Endkonzentration, die spezifischen Investitionskosten und den spezifischen Energieverbrauch auswirkt, wird in den Abb. 23 bis 25 diskutiert.

Abb. 23 zeigt das Ergebnis für die Optimierung der stufeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{St}$ . Für verschiedene Werte für den internen Zirkulationsstrom der ersten Stufe  $Z(1)^{St}$  wird jeweils eine Variation der stufeninternen Zirkulationsströme  $Z(s>1)^{St}$  der oberen Gemischtrennstufen durchgeführt. Das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s)_Z^{St}$  beträgt dabei für alle Stufen einheitlich  $\theta(s)_Z^{St}=0,94$ , so daß sich mit der Normierung aus Abschn. 4.4 für die kaskadeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{GTK=0}$  ergibt. Die nach (21.1) berechnete Erhöhung der spezifischen Investitionskosten  $\Delta I_s$  ist in Abhängigkeit von der  $UF_6$ -Endkonzentration  $N_{end}$  aufgetragen.

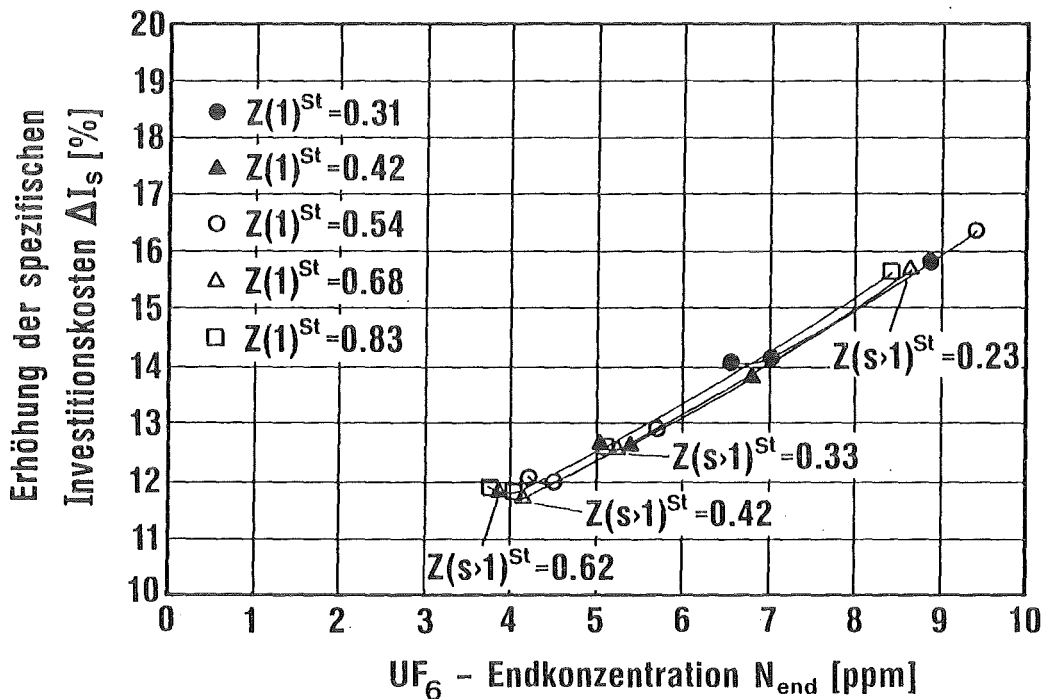


Abb. 23: Einfluß der stufeninternen Zirkulationsströme der ersten Stufe  $Z(1)^{St}$  und der oberen Stufen  $Z(s>1)^{St}$  auf die  $UF_6$ -Endkonzentration und die Erhöhung der spezifischen Investitionskosten. Kaskadeninterner Zirkulationsstrom  $Z(s)^{GTK=0}$  bei konstantem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s)_Z^{St}=0,94$  in allen Stufen. Gemischtrennkaskade (2/2/2) für Isotopentrennkaskade 132EUS.

Mit Zunahme der stufeninternen Zirkulationsströme  $Z(1)^{St}$  bzw.  $Z(s>1)^{St}$  steigen zunächst die Gemischtrennfaktoren  $A(s)^{St}$  an (Abb. 20) und die  $UF_6$ -Endkonzentration fällt. Die damit verbundene Abnahme der Trennleistungsverluste VT überwiegt die Zunahme der Investitionskosten, so daß die spezifischen Investitionskosten kleiner werden. Mit weiterer Zunahme der stufeninternen Zirkulationsströme steigen die Gemischtrennfaktoren nur noch langsam an, so daß auch die  $UF_6$ -Endkonzentration und die Trennleistungsverluste nur noch wenig abnehmen. Da mit Zunahme der stufeninternen Zirkulationsströme die Verdichteransaugvolumina linear zunehmen, steigen trotz kleiner werdender  $UF_6$ -Endkonzentration die spezifischen Investitionskosten wieder an. Bei einer weiteren Vergrößerung der stufeninternen Zirkulationsströme fällt der Gemischtrennfaktor sogar ab, so daß die spezifischen Investitionskosten **und** die  $UF_6$ -Endkonzentration zunehmen. Dieser Bereich ist jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abb. 23 nicht mehr eingezeichnet.

Bei gleichen Zusatzgasabschälverhältnissen  $\theta(s) \frac{Z^{St}}{Z} = 0,94$  in allen Gemischtrennstufen werden mit dieser dreistufigen Gemischtrennkaskade (2/2/2) bei einer  $UF_6$ -Endkonzentration  $N_{end} = 4,2$  ppm die niedrigsten spezifischen Investitionskosten ( $\Delta I_s = 11,77\%$ ) erreicht. Die dazugehörigen stufeninternen Zirkulationsströme betragen  $Z(1)^{St} = 0,68$  bzw.  $Z(s>1)^{St} = 0,42$ .

In Abb. 24 ist der Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1) \frac{Z^{St}}{Z}$  der oberen Stufen bzw. des kaskadeninternen Zirkulationsstromes auf die  $UF_6$ -Endkonzentration  $N_{end}$  und die Erhöhung der spezifischen Investitionskosten  $\Delta I_s$  aufgetragen. Bei den gezeigten Meßreihen wurde der stufeninterne Zirkulationsstrom  $Z(s>1)^{St}$  der oberen Stufen variiert, wobei jedoch für die Variation des stufeninternen Zirkulationsstromes der ersten Stufen nur die Meßreihe eingezeichnet ist, welche zu einer minimalen Erhöhung der spezifischen Investitionskosten führt (z. B. für  $\theta(s>1) \frac{Z^{St}}{Z} = 0,94$ ,  $Z(1)^{St} = 0,68$  aus Abb. 23).



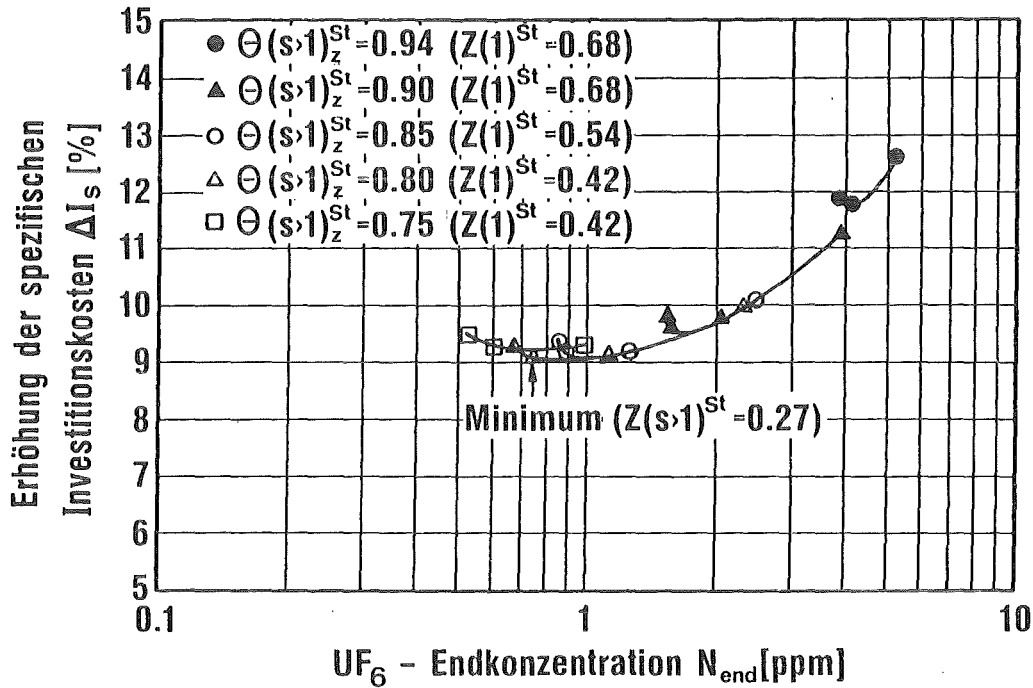


Abb. 24: Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\Theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Stufen auf die  $UF_6$ -Endkonzentration  $N_{end}$  und die Erhöhung der spezifischen Investitionskosten  $\Delta I_s$ . Bei den verschiedenen Meßreihen mit konstantem Zusatzgasabschälverhältnis  $\Theta(s>1)_Z^{St}$  wurde der stufeninterne Zirkulationsstrom  $Z(s>1)^{St}$  der oberen Stufen variiert, wobei der stufeninterne Zirkulationsstrom  $Z(1)^{St}$  der ersten Stufe auf den Wert eingestellt war, der zu einer minimalen Erhöhung der spezifischen Investitionskosten  $\Delta I_s$  führte.  
Gemischtrennkaskade (2/2/2) für Isotopentrennkaskade 132EUS.

Mit abnehmendem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  bzw. zunehmendem kaskadeninternen Zirkulationsstrom  $Z(s)^{GTK}$  fällt die minimal erreichbare  $UF_6$ -Endkonzentration, da der Anreicherungsfaktor  $\alpha(s>1)^{St}$  steigt (Abb. 18c). Die damit verbundene Abnahme der Trennleistungsverluste  $VT$  überwiegt zunächst den Anstieg der Investitionskosten, so daß - wie im Falle der Erhöhung des stufeninternen Zirkulationsstromes - die spezifischen Investitionskosten abnehmen. Bei weiterer Verkleinerung des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\theta(s>1)_Z^{St}$  nimmt der Anreicherungsfaktor  $\alpha(s>1)^{St}$  nur noch geringfügig zu (Abb. 18c), während die kaskadeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{GTK}$  (Abb. 19b) und damit die Verdichteransaugvolumina (Abb. 19c) stark ansteigen. Trotz kleiner werdender  $UF_6$ -Endkonzentration nehmen daher die spezifischen Investitionskosten wieder zu.

Durch die Absenkung des Zusatzgasabschälverhältnisses der oberen Gemischtrennstufen auf  $\theta(s>1)_Z^{St}=0,80$  kann mit dieser Gemischtrennkaskade die Erhöhung der spezifischen Investitionskosten von  $\Delta I_s=11,77\%$  bei gleichem Zusatzgasabschälverhältnis in allen Stufen auf  $\Delta I_s=9,12\%$  abgesenkt werden. Diese minimalen spezifischen Investitionskosten werden bei einer  $UF_6$ -Endkonzentration  $N_{end}=0,74$  ppm erreicht, die dazugehörigen stufeninternen Zirkulationsströme betragen  $Z(1)^{St}=0,42$  bzw.  $Z(s>1)^{St}=0,27$ , die kaskadeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{GTK}$  liegen zwischen 0,18 und 0,38.

In analoger Weise wurde eine Optimierung des normierten spezifischen Energieverbrauchs  $E_s$  durchgeführt. Wie aus einem Vergleich von Abb. 24 und 25 entnommen werden kann, ergeben sich für den spezifischen Energieverbrauch und die spezifischen Investitionskosten sehr ähnliche Abhängigkeiten. Der Wiederanstieg des spezifischen Energieverbrauchs bei kleinen Zusatzgasabschälverhältnissen  $\theta(s>1)_Z^{St}$  ist jedoch steiler als bei den spezifischen Investitionskosten, da der Energieverbrauch proportional, die Investitionskosten jedoch nur mit der Wurzel des Verdichteransaugvolumens zunehmen (vgl. Abschn. 5.1).

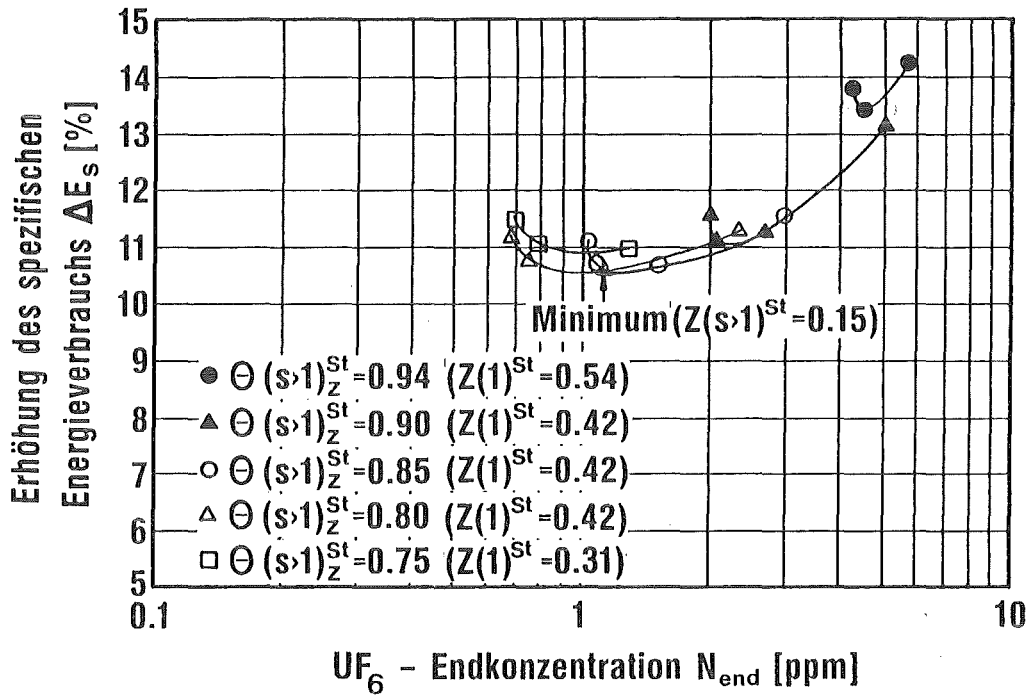


Abb. 25: Einfluß des Zusatzgasabschälverhältnisses  $\Theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Stufen auf die UF<sub>6</sub>-Endkonzentration  $N_{end}$  und die Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs  $\Delta E_s$ . Bei den verschiedenen Meßreihen mit konstantem Zusatzgasabschälverhältnis  $\Theta(s>1)_Z^{St}$  wurde der stufeninterne Zirkulationsstrom  $Z(s>1)^{St}$  der oberen Stufen variiert, wobei der stufeninterne Zirkulationsstrom  $Z(1)^{St}$  der ersten Stufe auf den Wert eingestellt war, der zu einer minimalen Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs  $\Delta E_s$  führte.  
Gemischtrennkaskade (2/2/2) für Isotopentrennkaskade 132EUS.

Das Minimum des spezifischen Energieverbrauchs wird bei gleichem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  und gleichem stufeninternen Zirkulationsstrom  $Z(1)^{St}$  in der ersten Gemischtrennstufe erreicht wie das Minimum der spezifischen Investitionskosten, nur der stufeninterne Zirkulationsstrom  $Z(s>1)^{St}$  der oberen Stufen ist geringfügig zu kleineren Werten verschoben, bzw. die optimale  $UF_6$ -Endkonzentration ist ca. 50 % größer. Die minimalste Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs  $\Delta E_s = 10,64 \%$  ist jedoch mit dem Wert  $\Delta E_s = 10,79 \%$  im Minimum der spezifischen Investitionskosten nahezu identisch. Dieser geringe Unterschied ist auch für andere Gemisch- und Isotopentrennkaskaden typisch, so daß keine getrennte Optimierung bezüglich des spezifischen Energieverbrauchs und der spezifischen Investitionskosten durchgeführt werden muß.

Die wichtigsten Daten der drei Gemischtrennstufen der Gemischtrennkaskade (2/2/2), die zu minimalen spezifischen Investitionskosten führt, sind in Tab. 4 zusammengefaßt.

GTK	2/3	2/2/2	2/3/3-EUS
$R_{GTK}/R_{ITK}$	0,5	1	0,5
$I[\%]$	6,56	8,47	10,18
$\Delta I_s[\%]$	10,06	9,12	12,23
$S_l[m]$	4.720	4.630	6.840
$\Delta E_s[\%]$	11,93	10,79	14,30
$N_{end}[ppm]$	4,0	0,74	2,3
$VT[\%]$	3,2	0,60	1,8
<b>1. Stufe</b>			
$N_o[\%]$	0,91	0,90	0,75
$\pi$	3,53	3,50	3,24
$f^I[\mu m]$	190	150	70
$Z^{St}$	0,34	0,42	0
$V[m^3/h]$	140.000	155.000	133.000
$\theta_Z^{St}$	0,9487	0,9510	0,9597
$A^{St}$	526	282	38,7
$\beta^{St}$	18,8	19,1	15,4
$\alpha^{St}$	27,9	14,8	2,5
<b>2. Stufe</b>			
$N_o[\%]$	0,033	0,053	0,24
$\pi$	2,96	2,03	3,69
$f^I[\mu m]$	220	180	180
$Z^{St}$	0,42	0,27	0
$V[m^3/h]$	135.000	151.000	155.000
$\theta_Z^{St}$	0,8000	0,8000	0,7000
$A^{St}$	274	111	112
$\beta^{St}$	4,9	4,8	3,3
$\alpha^{St}$	55,5	23,0	34,3
<b>3. Stufe</b>			
$N_o[\%]$		0,0023	0,0070
$\pi$		1,96	2,90
$V[m^3/h]$		120.000	109.000
$A^{St}$		100	101
$\beta^{St}$		4,8	3,3
$\alpha^{St}$		20,8	30,9

Tab. 4: Vergleich der Kenndaten von drei verschiedenen, auf minimale spezifische Investitionskosten optimierte Gemischtrennkaskaden für eine Isotopentrennkaskade mit 132 Stufen ( $V=33.000 \text{ m}^3/h$ ) und Einzelumlenksystemen.

## 6.2 Gemischtrennkaskaden für im Recycling-Betrieb arbeitende Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlensystemen

Für die Isotopentrennkaskade  $^{132}\text{EUS}$  wurde die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Optimierung auch für eine dreistufige Gemischtrennkaskade durchgeführt, in welcher in den oberen beiden Stufen drei Verdichter hintereinander geschaltet sind, wobei sowohl der Einsatz von Trennelementen mit  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=1$  als auch mit  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=0,5$  untersucht wurde.

Die wichtigsten Daten dieser Gemischtrennkaskaden sind in Tab. 5 (1. Spalte) zusammengestellt. Man erkennt, daß die dreistufige Gemischtrennkaskade mit jeweils zwei Verdichtern die niedrigsten spezifischen Investitionskosten besitzt, wobei der Unterschied zwischen den einzelnen Gemischtrennkaskaden jedoch nicht allzu groß ist. Auch der Unterschied im spezifischen Energieverbrauch ist zwischen den einzelnen Gemischtrennkaskaden nur gering. Ein Einsatz von Trennelementen mit  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=0,5$  statt 1 nur in der ersten Gemischtrennstufe würde zu einer Verminderung der spezifischen Investitionskosten unter die in Tab. 5 angegebenen Werte führen, wobei jedoch die benötigte Trennelementschlitzlänge aufgrund der kleineren Düsenweite der Trennelemente ansteigt.

Bei einem Einsatz von Trennelementen mit  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=0,5$  in allen Gemischtrennstufen der Gemischtrennkaskade (2/3/3) wird die damit erreichbare niedrigere  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration durch die höheren Investitionskosten überkompensiert, so daß die spezifischen Investitionskosten nicht geringer werden. Da bei Trennelementen mit  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=1$  die Gemischtrennung schlechter ist als bei Trennelementen mit  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=0,5$ , sind die spezifischen Investitionskosten erwartungsgemäß höher.

Da die Isotopentrennkaskade 132EUS unter den vier betrachteten Isotopentrennkaskaden die geringsten Anforderungen an eine Gemischtrennkaskade stellt, wurde zusätzlich die Betriebsweise einer nur **zweistufigen** Gemischtrennkaskade (Abkürzung 2/3) mit zwei Verdichtern in der ersten und drei Verdichtern in der zweiten Gemischtrennstufe sowie einer dreistufigen **Gemischtrennkaskade mit Einzelumlenksystemen** (Abkürzung 2/3/3-EUS) mit zwei Verdichtern in der ersten und jeweils drei Verdichtern in den oberen Gemischtrennstufen optimiert. Für beide Gemischtrennkaskaden wird der Einsatz von Trennelementen mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$  vorausgesetzt.

ITK	132EUS	396EUS	120DUS	240DUS
GTK 2/2/2 $R^{GTK}/R^{ITK}=1$	I=8,47% $\Delta I_s=9,12\%$ $\Delta E_s=10,79\%$ $N_{end}=0,74\text{ppm}$		I=7,98% $\Delta I_s=9,34\%$ $\Delta E_s=9,86\%$ $N_{end}=1,38\text{ppm}$	
2/3/3 $R^{GTK}/R^{ITK}=1$	I=9,65% $\Delta I_s=10,26\%$ $\Delta E_s=11,68\%$ $N_{end}=0,69\text{ppm}$	I=3,86% $\Delta I_s=4,91\%$ $\Delta E_s=6,09\%$ $N_{end}=0,20\text{ppm}$	I=9,18% $\Delta I_s=10,09\%$ $\Delta E_s=10,22\%$ $N_{end}=0,92\text{ppm}$	I=5,21% $\Delta I_s=7,51\%$ $\Delta E_s=8,09\%$ $N_{end}=0,53\text{ppm}$
2/3/3 $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$	I=9,42% $\Delta I_s=9,84\%$ $\Delta E_s=10,57\%$ $N_{end}=0,47\text{ppm}$	I=3,50% $\Delta I_s=4,03\%$ $\Delta E_s=4,62\%$ $N_{end}=0,10\text{ppm}$	I=8,89% $\Delta I_s=9,42\%$ $\Delta E_s=8,89\%$ $N_{end}=0,54\text{ppm}$	I=5,00% $\Delta I_s=5,73\%$ $\Delta E_s=5,88\%$ $N_{end}=0,17\text{ppm}$
2/2/2/2 $R^{GTK}/R^{ITK}=1$		I=3,73% $\Delta I_s=4,02\%$ $\Delta E_s=4,44\%$ $N_{end}=0,05\text{ppm}$	I=9,61% $\Delta I_s=9,93\%$ $\Delta E_s=9,19\%$ $N_{end}=0,32\text{ppm}$	I=5,20% $\Delta I_s=5,55\%$ $\Delta E_s=5,38\%$ $N_{end}=0,08\text{ppm}$

**Tab. 5:** Vergleich der normierten Investitionskosten und der Erhöhung der normierten spezifischen Kosten beim Einsatz verschiedener Gemischtrennkaskaden für Isotopentrennkaskaden mit Einzel- und Doppelumlenksystemen. Die Gemischtrennkaskaden sind auf minimale spezifische Investitionskosten optimiert.

Die wichtigsten Daten dieser Gemischtrennkaskaden sind mit der Gemischtrennkaskade (2/2/2) in der Tab. 4 verglichen. Die Gemischtrennkaskade (2/3) zeichnet sich bei geringfügig erhöhten Werten für den spezifischen Energieverbrauch und die spezifischen Investitionskosten gegenüber der Gemischtrennkaskade (2/2/2) durch **geringere** normierte **Investitionskosten** I aus. Der Einsatz dieser Gemischtrennkaskade bietet sich an, falls die Investitionskosten für eine Trenndüsenanlage möglichst niedrig gehalten werden sollen.

Der Einsatz der Gemischtrennkaskade (2/3/3-EUS) führt zu einer deutlichen Erhöhung der spezifischen Investitionskosten und des spezifischen Energieverbrauchs gegenüber der Gemischtrennkaskade (2/2/2). Auch die benötigte Trennelementschlitzlänge nimmt um etwa einen Faktor 1,5 gegenüber der Gemischtrennkaskade (2/2/2) zu. Ihr großer Vorteil liegt in der Möglichkeit, den **gleichen Trennelementtyp** (Einzelumlenksystem) wie in der **Isotopentrennkaskade** verwenden zu können, allerdings müssen die Umlenkradien auf die Hälfte verkleinert werden. Wie Tab. 4 entnommen werden kann, entspricht das Ansaugvolumen der Verdichter trotz des Einsatzes von Einzelumlenksystemen ( $Z(s)^{St=0}$ ) etwa dem Verdichteransaugvolumen beim Einsatz von Doppelumlenksystemen in der Gemischtrennkaskade (2/3) oder (2/2/2). Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Einzelumlenksysteme mit großen kaskadeninternen Zirkulationsströmen betrieben werden, um möglichst hohe Anreicherungsfaktoren zu erreichen (Abb. 18c).

Berücksichtigt man, daß die Abschälerweite der Trennelemente für die Isotopentrennung für die hier untersuchten Laborsysteme ( $R_{a,b}=500/750 \mu\text{m}$ ) bei etwa  $110 \mu\text{m}$  liegt, so stellt man fest, daß die Abschälerweiten der Trennelemente für die Gemischtrennung wesentlich größer sind. Daher sind selbst bei einer Verkleinerung der Umlenkradien um den Faktor zwei ( $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$ ) die Abschälerweiten der "technischen" Trennelemente in der Gemischtrennkaskade nicht wesentlich kleiner als in der Isotopentrennkaskade. Verwendet man jedoch Einzelumlenksysteme mit  $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$ , so ist die Abschälerweite des Trennelements der ersten Gemischtrennstufe etwa einen Faktor drei kleiner als in der Isotopentrennkaskade.



Prinzipiell wäre es auch möglich, die Einzelumlenksysteme wie Doppelumlenksysteme zu betreiben, d. h. einen Teil der schweren Fraktion auf die Ansaugseite des Verdichters der gleichen Stufe zurückzuführen. Hierdurch kann die Abschälerweite wie beim Doppelumlenksystem - bei konstantem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{\text{St}}$  - vergrößert werden, wodurch das  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnis der Stufe und damit die  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration der Gemischtrennkaskade geringfügig absinkt. Durch die hohe Konzentration der teilweise zurückgespeisten schweren Fraktion steigt jedoch der Energieverbrauch der Verdichter stark an. Eine solche Betriebsweise der Einzelumlenksysteme wurde daher im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht.

### 6.3 Optimale Gemischtrennkaskade für Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlensystemen, die in einem Schritt auf einen $^{235}\text{U}$ -Gehalt von 3,2 Mol-% anreichern

Beim Einsatz der Gemischtrennkaskade (2/2/2) für die Isotopentrennkaskade 396EUS wird bei gleichen Betriebsbedingungen auch die gleiche  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration erreicht wie für die Isotopentrennkaskade 132EUS. Infolge des gegenüber der Isotopentrennkaskade 132EUS niederen Produktstromes (Abschn. 5.2), nehmen jedoch bei gleichem  $\text{UF}_6$ -Reststrom die relativen Trennleistungsverluste  $VT$  (Tab. 3) und damit nach (20) die normierten spezifischen Investitionskosten und der normierte spezifische Energieverbrauch stark zu. Zur Absenkung der  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration können

- die stufen- und kaskadeninternen Zirkulationsströme vergrößert werden,
- durch Serienschaltung von drei Verdichtern in den oberen Stufen das Expansionsverhältnis  $\pi$  erhöht werden (Gemischtrennkaskade 2/3/3),
- eine weitere Gemischtrennstufe hinzugebaut werden (Gemischtrennkaskade 2/2/2/2).

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen (Tab. 5), daß unter den angegebenen Möglichkeiten die vierstufige Gemischtrennkaskade mit je zwei Verdichtern in allen Stufen ( $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=1$ ) sowohl zu den geringsten spezifischen Investitionskosten ( $\Delta I_s=4,02\%$ ), als auch zu dem geringsten spezifischen Energieverbrauch ( $\Delta E_s=4,44\%$ ) führt. Bei optimaler Betriebsweise dieser Kaskade werden die gleichen stufeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{\text{St}}$  benötigt wie bei der Gemischtrennkaskade (2/2/2) für die Isotopentrennkaskade 132EUS (Tab. 6). Durch die Verteilung der Zusatzgasanreicherung auf vier Stufen kann jedoch das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{\text{St}}$  der oberen Stufen gegenüber der Gemischtrennkaskade (2/2/2) erhöht werden, so daß die kaskadeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{\text{GTK}}$  und damit die Verdichteransaugvolumina abnehmen.

### 6.3 Optimale Gemischtrennkaskade für Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlensystemen, die in einem Schritt auf einen $^{235}\text{U}$ -Gehalt von 3,2 Mol-% anreichern

Beim Einsatz der Gemischtrennkaskade (2/2/2) für die Isotopentrennkaskade 396EUS wird bei gleichen Betriebsbedingungen auch die gleiche  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration erreicht wie für die Isotopentrennkaskade 132EUS. Infolge des gegenüber der Isotopentrennkaskade 132EUS niederen Produktstromes (Abschn. 5.2), nehmen jedoch bei gleichem  $\text{UF}_6$ -Reststrom die relativen Trennleistungsverluste VT (Tab. 3) und damit nach (20) die normierten spezifischen Investitionskosten und der normierte spezifische Energieverbrauch stark zu. Zur Absenkung der  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration können

- die stufen- und kaskadeninternen Zirkulationsströme vergrößert werden,
- durch Serienschaltung von drei Verdichtern in den oberen Stufen das Expansionsverhältnis  $\pi$  erhöht werden (Gemischtrennkaskade 2/3/3),
- eine weitere Gemischtrennstufe hinzugebaut werden (Gemischtrennkaskade 2/2/2/2).

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen (Tab. 5), daß unter den angegebenen Möglichkeiten die vierstufige Gemischtrennkaskade mit je zwei Verdichtern in allen Stufen ( $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=1$ ) sowohl zu den geringsten spezifischen Investitionskosten ( $\Delta I_s=4,02\%$ ), als auch zu dem geringsten spezifischen Energieverbrauch ( $\Delta E_s=4,44\%$ ) führt. Bei optimaler Betriebsweise dieser Kaskade werden die gleichen stufeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{\text{St}}$  benötigt wie bei der Gemischtrennkaskade (2/2/2) für die Isotopentrennkaskade 132EUS (Tab. 6). Durch die Verteilung der Zusatzgasanreicherung auf vier Stufen kann jedoch das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{\text{St}}$  der oberen Stufen gegenüber der Gemischtrennkaskade (2/2/2) erhöht werden, so daß die kaskadeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{\text{GTK}}$  und damit die Verdichteransaugvolumina abnehmen.

Prinzipiell wäre es auch möglich, die Einzelumlenksysteme wie Doppelumlenksysteme zu betreiben, d. h. einen Teil der schweren Fraktion auf die Ansaugseite des Verdichters der gleichen Stufe zurückzuführen. Hierdurch kann die Abschälerweite wie beim Doppelumlenksystem - bei konstantem Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta_Z^{\text{St}}$  - vergrößert werden, wodurch das  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnis der Stufe und damit die  $\text{UF}_6$ -Endkonzentration der Gemischtrennkaskade geringfügig absinkt. Durch die hohe Konzentration der teilweise zurückgespeisten schweren Fraktion steigt jedoch der Energieverbrauch der Verdichter stark an. Eine solche Betriebsweise der Einzelumlenksysteme wurde daher im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht.

Vergleicht man die Gemischtrennkaskade (2/2/2) für die Isotopentrennkaskade 120DUS mit der entsprechenden Gemischtrennkaskade für die Isotopentrennkaskade 132EUS (Tab. 6), so stellt man fest, daß trotz Erhöhung des stufeninternen Zirkulationsstromes der ersten Stufe sowie der Erhöhung der kaskadeninternen Zirkulationsströme (Erniedrigung von  $\theta(s>1)_Z^{St}$ ) die Verdichteransaugvolumina kleiner geworden sind und damit auch die Investitionskosten. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der in die Gemischtrennkaskade eintretende Volumenstrom bei Isotopentrennkaskaden mit  $\vartheta_U=1/3$ -Schaltung kleiner ist als bei  $\vartheta_U=1/4$ -Schaltung (Tab. 3). Bei einer  $\vartheta_U=1/3$ -Schaltung gelangt der Gasstrom von zwei, bei einer  $\vartheta_U=1/4$ -Schaltung der Gasstrom von drei leichten Fraktionen der Isotopentrennkaskade in die Gemischtrennkaskade (Abb. 8). Da jedoch die  $UF_6$ -Endkonzentration von 0,74 ppm auf 1,4 ppm um fast einen Faktor zwei angestiegen ist, sind die spezifischen Investitionskosten nahezu identisch.

Für die Rechteck-Isotopentrennkaskade 240DUS, die in einem Schritt auf einen  $^{235}U$ -Gehalt von 3,2 Mol-% anreichert, führt - wie bei der Isotopentrennkaskade 396EUS - der Einsatz der vierstufigen Gemischtrennkaskade (2/2/2/2) zu den geringsten spezifischen Kosten ( $\Delta E_s=5,38\%$ ,  $\Delta I_s=5,55\%$ , vgl. Tab. 5 u. 6). Durch die Aufteilung der Zusatzgasanreicherung auf vier Stufen kann - wie für die Isotopentrennkaskade mit Einzelumlenksystemen - das Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(s>1)_Z^{St}$  der oberen Stufen gegenüber der Gemischtrennkaskade (2/2/2) wieder etwas erhöht bzw. die kaskadeninternen Zirkulationsströme  $Z(s)^{GTK}$  vermindert werden.

### 6.5 Beitrag der Gemischtrennkaskade zur Isotopentrennung

In Abschn. 3.1 wurde gezeigt (vgl. Abb. 7), daß die Entnahme des angereicherten Urans (Produkt) aus der schweren Fraktion der zweiten Gemischtrennstufe erfolgt. In diesem Abschnitt soll nun der Beitrag der Gemischtrennkaskade zur Isotopentrennung an Beispielen für Isotopentrennkaskaden mit Einzelumlenksystemen quantitativ betrachtet werden.

Abb. 26 zeigt den Einfluß des Düsenvordrucks  $p(1)_0^{\text{Lab}}$  auf den Elementareffekt der Isotopentrennung  $\varepsilon(1)_A^{\text{St}}$  bei typischen Betriebsbedingungen der ersten Gemischtrennstufe. Beim Vergleich mit Abb. 17b erkennt man, daß im Gegensatz zum Gemischtrennfaktor  $A(1)^{\text{St}}$ , der bei ca. 40 mbar ein Maximum erreicht und dann zu höheren Drücken kontinuierlich abfällt, der Elementareffekt der Isotopentrennung  $\varepsilon(1)_A^{\text{St}}$  zwischen 40 mbar und 80 mbar nahezu linear ansteigt. Der Beitrag der ersten Gemischtrennstufe zur Isotopentrennung ist daher - im Gegensatz zur Gemischtrennung - beim Einsatz von Trennelementen mit einem Verhältnis  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=1$  ( $\varepsilon(1)_A^{\text{St}} \approx 3,5 \%$ ) höher als bei Verwendung von kleineren Trennelementen mit einem Verhältnis  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=0,5$  ( $\varepsilon(1)_A^{\text{St}} \approx 2,4 \%$ ). In jedem Fall ist der Elementareffekt der Isotopentrennung in der ersten Gemischtrennstufe größer als in einer mit Einzelumlenksystemen ausgerüsteten Stufe der Isotopentrennkaskade ( $\varepsilon_A \approx 1,9 \%$ ).

Durch die kleinen  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnisse der Gemischtrennstufen ( $\theta(1)_U^{\text{St}}=0,0549$  bei  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=1$  und  $\theta(1)_U^{\text{St}}=0,0503$  bei  $R^{\text{GTK}}/R^{\text{ITK}}=0,5$ ) wird die erreichte Isotopentrennung der ersten Gemischtrennstufe nahezu vollständig für die  $^{235}\text{U}$ -Anreicherung genutzt, da für den Elementareffekt der Isotopenanreicherung  $\varepsilon_\alpha$  gilt:

$$\varepsilon_\alpha^{\text{St}} \approx (1 - \theta_U^{\text{St}}) \cdot \varepsilon_A^{\text{St}}$$

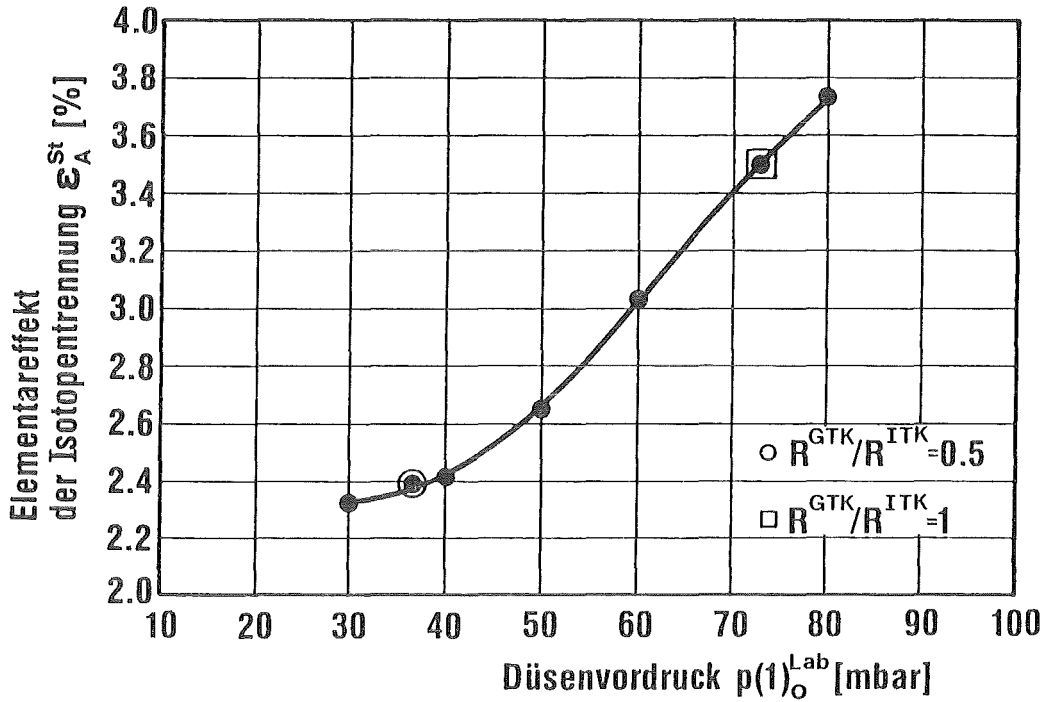


Abb. 26: Einfluß des Düsenvordrucks  $p(1)_o^{\text{Lab}}$  auf den Elementareffekt der Isotopentrennung  $\epsilon(1)_A^{\text{St}}$  der ersten Gemischtrennstufe.

Betriebsbedingungen:

$N_0=1$  Mol-%  $\text{UF}_6$  in Helium,  $\pi=3,7$ ,  $\theta_Z^{\text{St}}=0,94$ ,  $f^{\text{I}}=150\mu\text{m}$

Daraus ergibt sich beispielsweise mit der Gemischtrennkaskade (2/2/2) (siehe Tab. 6) für die Isotopentrennkaskade 132EUS mit den oben genannten Werten ein Elementareffekt der Isotopenanreicherung  $\epsilon(1)_\alpha^{\text{St}}=3,3$  %. Entnimmt man das Produkt der schweren Fraktion der zweiten Gemischtrennstufe, so wird die  $^{235}\text{U}$ -Konzentration des Produkts um etwa den Elementareffekt der Isotopenabreicherung  $\epsilon_\beta$  dieser Stufe reduziert. Aufgrund der sehr kleinen  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnisse ist dieser Wert jedoch sehr gering, da

$$\epsilon_\beta^{\text{St}} \approx \theta_U^{\text{St}} \cdot \epsilon_A^{\text{St}}$$

Setzt man die für die zweite Gemischtrennstufe gemessenen Werte ein ( $\epsilon(2)_A^{St}=1,7\%$ ,  $\theta(2)_U^{St}=0,038$ ), so ergibt sich ein Isotopenanreicherungs-effekt  $\epsilon(2)_\beta^{St}=0,06\%$ . Die Entnahme des Produkts aus dem Düsengas der zweiten Stufe wäre also mit einer nur unwesentlichen Erhöhung der  $^{235}\text{U}$ -Konzentration aber mit einer Vergrößerung der Abscheider verbunden, da der  $\text{UF}_6$ -Partialdruck im Düsengas halb so groß ist wie in der schweren Fraktion.

Eine vollständige Produktentnahme aus der dritten Stufe ist dagegen nicht möglich, da hier alle  $\text{UF}_6$ -Ströme kleiner sind als der Produktstrom. Die prinzipiell mögliche Erhöhung der Trennleistung durch eine Teilentnahme des Produkts aus der dritten Stufe wird hier jedoch nicht berücksichtigt, da erst zu überprüfen wäre, ob der Gewinn nicht durch den Aufwand einer zusätzlichen Entnahmestelle bei sehr niedriger  $\text{UF}_6$ -Konzentration überkompensiert wird.

Infolge der kleinen  $\text{UF}_6$ -Abschälverhältnisse der Gemischtrennstufen und des etwas geringen  $\text{UF}_6$ -Stufendurchsatzes  $L(1)_U^{St}$  der ersten Gemischtrennstufe ist die Trennleistung  $\delta U(1) / 16 /$

$$\delta U(1) = \frac{1}{2} \cdot L(1)_U^{St} \cdot (1 - \theta(1)_U^{St}) \cdot \theta(1)_U^{St} \cdot (\epsilon(1)_A^{St})^2$$

der ersten Gemischtrennstufe trotz des wesentlich höheren Trenneffekts  $\epsilon_A^{St}$  geringer als die Trennleistung einer Stufe der Isotopentrennkaskade.

Bei der Bewertung des Beitrags dieser Gemischtrennstufe zur Isotopentrennung ist jedoch zu berücksichtigen, daß durch die im Verhältnis zur Isotopentrennkaskade hohe Isotopenanreicherung in der ersten Gemischtrennstufe bei im Verhältnis zur Isotopentrennkaskade vermindertem  $\text{UF}_6$ -Stufendurchsatz sowie durch die Änderung der Kaskadenschaltung eine quasi abgestufte Isotopentrennkaskade entsteht. Hierdurch wird der Kaskadenwirkungsgrad verbessert und die Trennleistung der Gesamtanordnung aus Gemisch- und Isotopentrennkaskade wird durch die Gemischtrennstufe wesentlich mehr erhöht als die Summe der Trennleistungen der einzelnen Stufen.



Der relative Gewinn an Trennleistung hängt also nicht nur von der Isotopentrennung in der ersten Gemischtrennstufe, sondern auch von der Stufenzahl und dem Betriebspunkt der Isotopentrennkaskade ab. Eine exakte Berechnung der Trennleistung von Gemisch- und Isotopentrennkaskade über ein iteratives Materialbilanzierungsverfahren ergab mit den oben angegebenen Trenneffekten der Gemischtrennstufen beispielsweise, daß der Gewinn an Trennleistung mit einer Gemischtrennkaskade mit gleich großen Trennelementen wie in der Isotopentrennkaskade ( $R^{GTK}/R^{ITK}=1$ ) bei der Isotopentrennkaskade 132EUS (Gemischtrennkaskade (2/2/2), Tab. 6) 3,1 % beträgt, während er bei der Isotopentrennkaskade 396EUS (Gemischtrennkaskade (2/2/2/2), Tab. 6) aufgrund der höheren Stufenzahl mit 1,1 % erwartungsgemäß kleiner ist. Bei kleinen Isotopentrennkaskaden die im Recycling-Betrieb arbeiten und bei denen der Kostenbeitrag der Gemischtrennkaskade relativ groß ist, ist somit auch der Gewinn an Trennleistung durch die Gemischtrennkaskade relativ groß.

Beim Einsatz von Gemischtrennkaskaden mit kleineren Trennelementen ( $R^{GTK}/R^{ITK}=0,5$ ) ergibt sich ein kleinerer Elementareffekt der Isotopentrennung (Abb. 26) und daher auch ein kleinerer Gewinn an Trennleistung durch die Gemischtrennkaskade. Der Gewinn an Trennleistung durch die erste Gemischtrennstufe hängt dabei nahezu linear von dem Elementareffekt der Isotopentrennung ab, da hier nicht die Trennleistung dieser Stufe ausschlaggebend ist, sondern im wesentlichen die Reduzierung der von der Isotopentrennkaskade zu erzeugenden Isotopenverschiebung.

Der Gewinn an Trennleistung durch die Gemischtrennkaskade führt zu einer entsprechend großen Absenkung der spezifischen Aufwandsgrößen unter die in Tab. 6 angegebenen Werte. Für die Isotopentrennkaskade 132EUS beträgt die Erhöhung der spezifischen Investitionskosten bei Berücksichtigung des Gewinns an Trennleistung noch  $\Delta I_s=5,9$  %, für die Isotopentrennkaskade 396EUS noch  $\Delta I_s=2,9$  %.

## 7. Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Richtlinien für den Aufbau und die Betriebsweise von Gemischtrennkaskaden zur gasdynamischen Trennung von  $UF_6$  und Zusatzgas zu erarbeiten. Hierzu wurde zunächst der Einfluß der verschiedenen Betriebsparameter auf die Gemischtrennung der in der Gemischtrennkaskade eingesetzten Doppelumlenksysteme experimentell untersucht. Basierend auf den Versuchsergebnissen konnte gezeigt werden, daß sich mit nur zwei bis vier Gemischtrennstufen für alle in Betracht gezogenen Isotopentrennkaskaden  $UF_6$ -Endkonzentrationen unter 1,5 ppm erreichen lassen. Diese Reinheit des Zusatzgasrückstromes wird erreicht durch die Ausnutzung von stufen- und kaskadeninternen Zirkulationsströmen, die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für die einzelnen Isotopen- und Gemischtrennkaskaden optimiert wurden.

Die Optimierungen in dieser Arbeit wurden unter der Randbedingung durchgeführt, daß die Umlenkradien der Trennelemente in allen Stufen einer Gemischtrennkaskade gleich sind. Dabei wurde sowohl der Einsatz von Trennelementen mit gleich großen, als auch mit halb so großen Umlenkradien wie in der Isotopentrennkaskade untersucht. Unter dieser Randbedingung waren stets Gemischtrennkaskaden mit zwei hintereinander geschalteten Verdichtern in jeder Stufe und Trennelementen mit gleich großen Umlenkradien wie in der Isotopentrennkaskade am wirtschaftlichsten.

Der Aufbau sowie die optimale Betriebsweise einer Gemischtrennkaskade hängen stark von den durch die Isotopentrennkaskade gestellten Anforderungen ab. Der Anteil der Gemischtrennkaskade an den Trennarbeitskosten einer Rechteck-Isotopentrennkaskade liegt je nach Stufenzahl der Isotopentrennkaskade zwischen 3 % und 6 %, wenn man den Beitrag der Gemischtrennkaskade zur Isotopentrennung berücksichtigt. Für eine einfach abgestufte Isotopentrennkaskade, die aus zwei Stufentypen aufgebaut ist, kann daraus ein Anteil der Gemischtrennkaskaden an den Trennarbeitskosten von etwa 6 % bis 7 % abgeleitet werden.

Ein Vergleich der absoluten Kosten einer Gemischtrennkaskade mit denen für das Verfahren der  $UF_6$ -Vorabtrennung in einer besonderen Trenndüsenstufe und einer Feinabscheidung des  $UF_6$  in nachgeschalteten Tieftemperaturabscheidern ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Grundsätzlich ergibt sich jedoch, daß der Vorteil für eine Gemischtrennkaskade mit steigendem Verfahrensgasdruck, wie er für kommerzielle Trenndüsenanlagen angestrebt wird, zunimmt. Würde man die  $UF_6$ -Abscheidung wie in der First Cascade mit Tieftemperaturabscheidern durchführen, so müßten z. B. in einer kommerziellen Trenndüsenanlage mit einem Düsenvordruck von 1,5 bar /8/ stündlich ca. zwei Tonnen  $UF_6$  zyklisch ausgefroren und wieder in die Kaskade zurückgespeist werden. Im Gegensatz dazu erfolgt die  $UF_6$ /Zusatzgas-Trennung in einer Gemischtrennkaskade kontinuierlich, so daß keine Zwischenpufferung von angereichertem Material notwendig ist und die damit verbundenen Regelungsprobleme entfallen. Das Verfahren einer gasdynamischen  $UF_6$ /Zusatzgas-Trennung ist daher insbesondere für kommerzielle Trenndüsenanlagen wirtschaftlich attraktiv.

Bei allen im Rahmen der Arbeit untersuchten Gemischtrennkaskaden mit nur einer Stufe im Abstreifteil (Abb. 7) ist der Abreicherungsfaktor dieser ersten Gemischtrennstufe durch die Gemischtrennung in der Isotopentrennkaskade fest vorgegeben. Bei Isotopentrennkaskaden mit Doppelumlenkssystemen oder beim Einsatz von Einzelumlenkssystemen in der Gemischtrennkaskade ist dann der zur Zusatzgasanreicherung verbleibende Anreicherungsfaktor sehr klein. Bei der Einregelung der ersten Gemischtrennstufe einer Gemischtrennkaskade für eine Isotopentrennkaskade mit Doppelumlenkssystemen könnten sich eventuell Schwierigkeiten ergeben, da hier ein Zusatzgasabschälverhältnis  $\theta(1)_Z^{St} = 0,984$ , also sehr nahe bei 1, eingestellt werden muß. Trennversuche zeigen, daß zur Einregelung dieses Zusatzgasabschälverhältnisses der Druck in der schweren Fraktion so stark erhöht werden muß, daß er nahe bei dem Wert liegt, bei dem kein Gas mehr in die schwere Fraktion strömt. Bei der Einregelung dieses Zusatzgasabschälverhältnisses in einer Trennstufe kann es dadurch infolge des Druckgefälles im Trennrohr bzw. durch Toleranzen der Abschälerweite dazu kommen, daß - zumindest in Teilbereichen des schlitzförmigen Trennsystems - kein Gas in die schwere Fraktion strömt und daher keine Gemischtrennung mehr erfolgt.

In beiden Fällen könnte eine Gemischtrennkaskade mit zwei Stufen im Abstreifeteil, wie sie Abb. 27 zeigt, Abhilfe schaffen. Durch die Verteilung der Zusatzgasanreicherung auf zwei Stufen würde einerseits bei konstantem Gemischtrennfaktor der Anreicherungsfaktor der ersten Gemischtrennstufe im Abreicherungssteil zunehmen, andererseits wäre in den beiden Abreicherungsstufen nur noch ein deutlich von 1 verschiedenes Zusatzgasabschälverhältnis von etwa 0,85-0,90 einzuregulieren. Die zusätzliche Stufe im Abstreifeteil der Gemischtrennkaskade, die nur die schwere Fraktion der ersten Gemischtrennstufe im Abreicherungssteil erhält, besitzt infolge des geringen Molstromes dieser schweren Fraktion ein wesentlich kleineres Ansaugvolumen als die übrigen Stufen der Gemischtrennkaskade (Abb. 27). Da die Düsengaskonzentration dieser Stufe höher als die der übrigen Stufen der Gemischtrennkaskade ist, ist ein zweistufiger Verdichter ausreichend. Diese Stufe im Abstreifeteil könnte daher den Stufen der Isotopentrennkaskade sehr ähnlich oder sogar mit ihnen identisch sein.

Bei Isotopentrennkaskaden, die in einem Schritt Reaktormaterial erzeugen, könnte diese zusätzliche Stufe im Abstreifeteil eventuell die vierte Gemischtrennstufe (mit zwei großen Verdichtern) der untersuchten Gemischtrennkaskade (2/2/2/2) ersetzen.

Die hier beschriebenen Trennversuche wurden stets an separaten Labortrennelementen durchgeführt, die mit den Betriebsbedingungen betrieben werden, wie sie sich in einer Gemischtrennkaskade ergeben, wobei diese Betriebsbedingungen sowohl durch die Trennung in den Trenndüsen selbst als auch durch die Wahl der Verdichteranzahl festgelegt sind. Eine erste Erprobung einer Hintereinanderschaltung von Trenndüsen zur Gemischtrennung ist in einer 10-stufigen Versuchsanlage /19/ im brasilianischen Forschungszentrum CDTN (Belo Horizonte) vorgesehen. Hierbei soll nicht nur der experimentelle Nachweis einer geringen  $UF_6$ -Endkonzentration erbracht werden, sondern auch gezeigt werden, daß sich eine Gemischtrennkaskade leicht einregulieren läßt und sich im Zusammenspiel mit der Isotopentrennkaskade keine Schwierigkeiten ergeben. Die Auslegung der hierfür notwendigen Gemischtrennkaskade wurde entsprechend den in dieser Arbeit entwickelten Richtlinien durchgeführt.

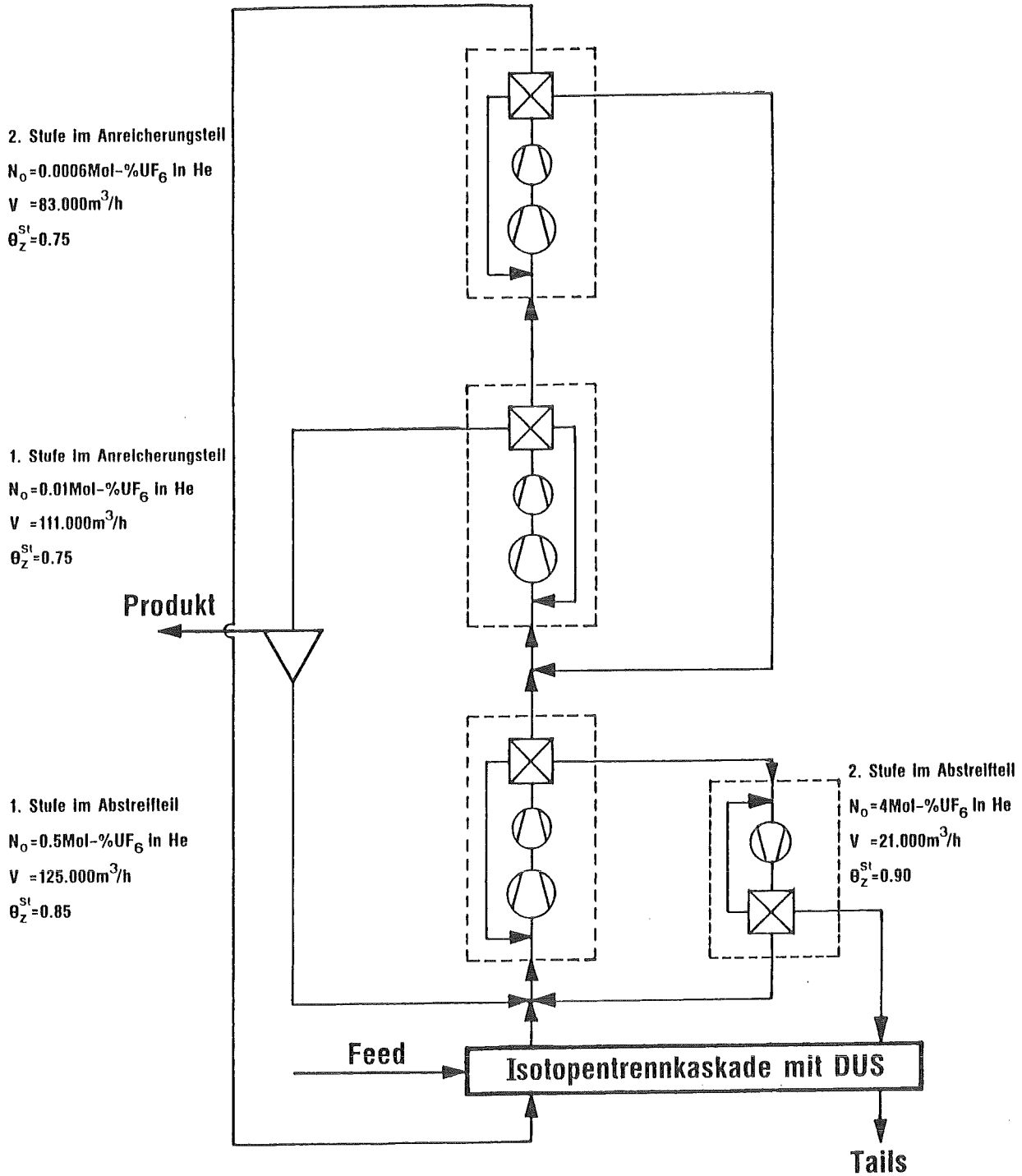


Abb. 27: Blockschaltbild einer vierstufigen Gemischtrennkaskade mit zwei Stufen im Abstreifteil. Die angegebenen Verdichtersaugvolumina beziehen sich auf den jeweils ersten Verdichter einer Gemischtrennstufe.

In dieser Arbeit wurde nur die gasdynamische Trennung von  $\text{UF}_6$  und Helium beschrieben. Da es möglich ist, aus diesen  $\text{UF}_6/\text{He}$ -Trennfaktoren die in den Trenndüsen auftretenden Zentrifugalkräfte zu berechnen, können hierüber auch die Trennfaktoren anderer Gasgemische abgeschätzt werden /20/. Damit kann der technische Aufwand für eine gasdynamische Trennung beliebiger Gasgemische erfaßt und die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens für andere Anwendungen abgeschätzt werden. Neben der Anwendung für die Trennung von  $\text{UF}_6$  und Zusatzgas in Trenndüsenkaskaden zur  $^{235}\text{U}$ -Anreicherung ist eine industrielle Anwendung der hier beschriebenen gasdynamischen Gemischtrennung überall dort denkbar, wo bei großen Volumenströmen eine oder mehrere schwere Gemischkomponenten aus einem leichten Trägergas abgetrennt werden sollen.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] E. W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel: "Separation of the Isotopes of Uranium by the Separation Nozzle Process." *Angewandte Chemie, Int. Edition*, **6** (1967) 507-518
- [2] E. W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte, D. Seidel: "Physics and Technology of the Separation Nozzle Process." *Nucl. Energy Maturity, Proc. Europ. Nucl. Conf., Paris, Invited Sessions*, Oxford: Pergamon Press, (1975) 172-180
- [3] E. W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte, D. Seidel: "Uranium Enrichment by the Separation-Nozzle Process." *Naturwissenschaften*, **63** (1976) 407-411
- [4] E. W. Becker: "Separation Nozzle." *Topics in Applied Physics* **35**, (1979) 246-268, Berlin, Heidelberg, New-York, Springer-Verlag
- [5] E. W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, D. Seidel: "Entwicklung und technische Anwendung des Trenndüsenverfahrens zur Anreicherung von Uran-235." *KfK-Nachrichten*, **13** (1981) 50-57
- [6] E. W. Becker, P. Nogueira Batista, H. Völcker: "Uranium Enrichment by the Separation Nozzle Method within the Framework of German/Brazilian Cooperation." *Nucl. Technol.*, **52** (1981) 105-114
- [7] E. W. Becker, W. Bier, P. Bley, W. Ehrfeld, K. Schubert, D. Seidel: "Development and Technical Implementation of the Separation Nozzle Process for Enrichment of Uranium-235." Paper presented at the AIChE Winter Meeting, Orlando, Florida, U. S. A., February 28 - March 3, 1982, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Bericht KfK 3310 (1982)
- [8] E. W. Becker, W. Bier, P. Bley, W. Ehrfeld, K. Schubert, D. Seidel: "Developing Double Deflection Systems for Advanced Nozzle Enrichment." *Nuclear Engineering International*, **28** (1983) 33-37

- [9] E. W. Becker, W. Bier, P. Bley, U. Ehrfeld, W. Ehrfeld, G. Eisenbeiß, F.-J. Rosenbaum, E. Schmid: "Die physikalischen Grundlagen der Uran<sup>235</sup>-Anreicherung nach dem Trenndüsenverfahren. IV. Trenndüsenysteme mit zweifacher Strahlumlenkung und trifraktionärer Gasabsaugung." Z. Naturforsch. **32a** (1977) 401-410
- [10] H. J. Fritsch, R. Schütte: "Trennung von UF<sub>6</sub> und Zusatzgas bei Trenndüsenanlagen mit einer Kombination von Vorabscheidungs-Trenndüse und Tieftemperatur-Feinabscheidung." Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Bericht KfK **1437** (1971)
- [11] H. J. Pfriem: "Helium-Abtrennung mittels idealer Trenndüsenkaskaden." Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (1968)
- [12] P. Bley, W. Ehrfeld, B. Maciejewski: "Minimierung von Trennleistungsverlusten beim Betrieb einer Trenndüsenanlage mit Doppelumlenkssystemen zur Anreicherung von Uran-235." Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Bericht KfK **3662** (1984)
- [13] P. Bley, W. Ehrfeld, F. M. Jäger, U. Knapp: "Entwicklung und Erprobung einer Versuchsapparatur für die Optimierung von Trenndüsenystemen zur Anreicherung von Uran-235." Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Bericht KfK **2092** (1975)
- [14] P. Bley, W. Ehrfeld, U. Knapp, G. Krieg: "Entwicklung von Gasanalysatoren für das Trenndüsenverfahren in Zusammenarbeit mit der Industrie." KfK Nachrichten **11** (1979) 48-57
- [15] W. Berkahn, P. Bley, G. Krieg, D. Schmidt: "Erprobung des SPECTRAN Prozeßphotometers zum Spurennachweis korrosiver Gase." Technisches Messen **12** (1984) 421-426
- [16] K. Cohen: "The Theory of Isotope Separation as Applied to Large-Scale Production of U-235." McGraw-Hill, New York (1951)



- [17] K. J. Müller: "Thermische Strömungsmaschinen, Auslegung und Berechnung." Springer Verlag, Wien (1978)
- [18] Al-Omari: "Optimierung von Trenndüsenystemen zur Anreicherung von Uran-235 in einer Trenndüsenkaskade mit vorgegebener Stufenzahl und Stufengröße." Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (1985)
- [19] P. Bley, A. S. Camara, R. Consiglio, H. Hein, G. Linder, R. Yadoya: "Untersuchungen zum Betriebsverhalten von Trenndüsenkaskaden zur Anreicherung von Uran-235 an einer 10-stufigen Versuchsanlage." Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Bericht KfK **3665** (1984)
- [20] P. Bley, W. Ehrfeld, D. Schmidt: "Effective Separation of Disparate Mass Mixtures in a Single Stage by Double Deflection Separation Nozzles." H. Oguchi (Hrsg.) Proc. of the 14th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Tsukuba Science City (Japan), Juli 16-20, 1984, Tokyo: Univ. of Tokyo Pr. 1984 S. 645-54

## NOMENKLATUR

$UF_6$	Uranhexafluorid
$k$	Boltzmann Konstante
$R$	allgemeine Gaskonstante
$x$	Verhältnis der spezifischen Wärmen
$T$	Gastemperatur
$l$	optische Weglänge
$\alpha_{UF_6}$	$UF_6$ -Absorptionskoeffizient
$\nu_{UF_6}$	$UF_6$ -Teilchendichte
$p_{UF_6}$	$UF_6$ -Partialdruck
$p_{Ges}$	Gesamtdruck
$S$	Stufenzahl der Gemischtrennkaskade
$s$	Stufennummer der Gemischtrennkaskade
$m$	mittlere Masse des Gasgemisches
$\pi_{Kom}$	Kompressionsverhältnis der Verdichter einer Trenndüsenanlage
$\pi$	Expansionsverhältnis an den Trenndüsen
$\eta_{pol}$	polytroper Wirkungsgrad
$H_{pol}$	polytrope Kompressionsarbeit
$V$	Ansaugvolumen der Verdichter einer Trenndüsenanlage
$p_a$	Ansaugdruck der Verdichter einer Trenndüsenanlage
$p_0^{tech}$	Düsenvordruck der Trennelemente einer Trenndüsenanlage
$p_0^{Lab}$	Düsenvordruck des Labortrennelements
$p_0^+(A^k)$	optimaler Düsenvordruck für die Gemischtrennung
EUS	Einzelumlenksystem
DUS	Doppelumlenksystem

$R^k$	Umlenkradius
$R^{GTK}/R^{ITK}$	Verhältnis der Umlenkradien der Trennelemente der Gemisch- und Isotopentrennkaskade
$f^k$	Abschälerweite
$\alpha^k$	Zusatzgas-Anreicherungsfaktor
$\beta^k$	Zusatzgas-Abreicherungsfaktor
$A^k$	Gemischtrennfaktor
$\varepsilon_\alpha^k$	Elementareffekt der Isotopenanreicherung
$\varepsilon_\beta^k$	Elementareffekt der Isotopenabreicherung
$\varepsilon_A^k$	Elementareffekt der Isotopentrennung
$Z^k$	intern zirkulierter Gasstrom
$p_j$	Druck
$N_j^k$	UF <sub>6</sub> -Konzentration
$\vartheta_i^k$	Abschälverhältnis für Isotopentrennung
$\theta_i^k$	Abschälverhältnis für Gemischtrennung
$L_i^k$	Gasstrom

<b>Index k:</b>	<b>I</b>	Erste Trenndüse eines Doppelumlenksystems
	II	Zweite Trenndüse eines Doppelumlenksystems
	St	Stufenwerte eines Doppelumlenksystems
	GTK	Gemischtrennkaskade
	ITK	Isotopentrennkaskade

<b>Index i:</b>	G	Gemisch
	Z	Zusatzgas
	U	Uranhexafluorid

<b>Index j:</b>	ein	Eingangskonzentration in die Gemischtrennkaskade
	end	Endkonzentration der Gemischtrennkaskade
	O	Düsengas
	L	leichte Fraktion
	S	schwere Fraktion
	M	mittlere Fraktion

S <sub>l</sub>	Trennelement-Schlitzlänge
I	normierte Investitionskosten einer Gemischtrennkaskade
E	normierter Energieverbrauch einer Gemischtrennkaskade
I <sub>s</sub>	normierte spezifische Investitionskosten einer Trenndüsenanlage bestehend aus Gemisch- und Isotopentrennkaskade
ΔI <sub>s</sub>	Erhöhung der spezifischen Investitionskosten
E <sub>s</sub>	normierter spezifischer Energieverbrauch einer Trenndüsenanlage bestehend aus Gemisch- und Isotopentrennkaskade
ΔE <sub>s</sub>	Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs
δU	Trennleistung einer Trennstufe
ΔU	Trennleistung der Isotopentrennkaskade
VT	relative Verluste an Trennleistung durch UF <sub>6</sub> -Restströme