

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

Oktober 1968

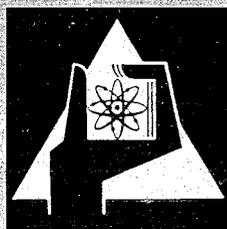
KFK 859

Institut für Kernverfahrenstechnik

Trennung der Uranisotope

Ein Vergleich der heute zur Diskussion stehenden Verfahren

E. W. Becker



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1968

KFK 859

Institut für Kernverfahrenstechnik

Trennung der Uranisotope  
Ein Vergleich der heute zur Diskussion  
stehenden Verfahren

von

E.W. Becker<sup>x</sup>

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

x Plenarvortrag anlässlich der Tagung der  
Deutschen Physikalischen Gesellschaft  
in Karlsruhe am 4.10.1968



## Trennung der Uranisotope

Ein Vergleich der heute zur Diskussion  
stehenden Verfahren

E.W. Becker

Institut für Kernverfahrenstechnik der Universität  
und des Kernforschungszentrums Karlsruhe

Das in der Natur vorkommende Uran besteht bekanntlich nur zu etwa 0,7% aus dem leichten Isotop der Masse 235, das der Hauptträger der Kettenreaktion in thermischen Kernreaktoren ist. Durch seine Anreicherung läßt sich die Leistungsdichte der Reaktoren beträchtlich erhöhen. Außerdem ermöglicht die Anreicherung des Uran 235 den Einsatz technisch besonders günstiger Struktur- und Arbeitsmedien, die wegen ihrer relativ starken Neutronenabsorption einen Natururanreaktor zum Erliegen bringen würden. Die meisten in Betrieb befindlichen oder geplanten Kernreaktoren verwenden daher Uran mit künstlich erhöhtem Uran 235- Gehalt. Bei den für die Zukunft vorgesehenen schnellen Brutreaktoren ist zwar ein laufender Betrieb ohne Uran 235 möglich, doch wird für die Erstausrüstung auch bei diesen Reaktoren Kernbrennstoff mit erhöhtem Uran 235- Gehalt in Erwägung gezogen. Sieht man bei den schnellen Brutreaktoren dagegen eine Erstausrüstung mit Plutonium vor, so muß dieser Stoff, zumindest in den nächsten 20 bis 30 Jahren, überwiegend in thermischen Reaktoren erzeugt werden. Diese werden aber größtenteils wiederum mit angereichertem Uran 235 arbeiten. Die Trennung der Uranisotope wird daher noch für mehrere Jahrzehnte eine wichtige Aufgabe der Kerntechnik sein.

Die Kernreaktoren der westlichen Welt werden überwiegend aus den 3 Gasdiffusionsanlagen der USA mit Uran 235- Konzentrat versorgt, die in Oak Ridge (Tennessee), in Paducah (Kentucky)

und in Portsmouth (Ohio) stehen. Sie haben zusammen, ohne die dazugehörigen Kraftwerke, etwa 2,3 Milliarden Dollar gekostet und verbrauchen bei Vollast im Jahr etwa 50 Milliarden Kilowattstunden<sup>1)</sup>. Dieser Stromverbrauch entspricht etwa einem Drittel des Stromverbrauches der Westdeutschen Bundesrepublik. Wesentlich kleinere Diffusionstrennanlagen stehen in Capenhurst (England) und in Pierrelatte (Frankreich). Über die Isotopentrennanlagen der Sowjetunion und Chinas ist offiziell nichts bekannt. Aber auch die westlichen Länder behandeln die technischen Details ihrer Anlagen zur Trennung der Uranisotope als Staatsgeheimnis.

Die riesige Kapazität der amerikanischen Isotopentrennanlagen ist durch ihre militärische Vorgeschichte bedingt, die weitgehend abgeschlossen zu sein scheint. Da die Anlagen mit dem derzeitigen Bedarf der Kerntechnik an angereichertem Uran noch nicht ausgelastet werden können, arbeiten sie zur Zeit mit reduzierter Last. In 8 bis 10 Jahren wird der Bedarf an Uran 235 für Kernreaktoren aber so stark gestiegen sein, daß die Kapazität auch dieser Riesenanlagen nicht mehr ausreichen wird. Da die Planung und der Bau neuer Trennanlagen mehrere Jahre erfordert, hat man sich schon jetzt mit der Frage zu befassen, ob auch neue Anlagen am wirtschaftlichsten nach dem Gasdiffusionsprinzip arbeiten würden. Neben dem Gasdiffusionsverfahren wurde bisher hauptsächlich das Gaszentrifugenverfahren für eine großtechnische Trennung der Uranisotope in Erwägung gezogen<sup>2)3)4)</sup>.

Wir haben in den letzten Jahren ein weiteres Verfahren zur Anreicherung von Uran 235 entwickelt, das auf der teilweisen räumlichen Entmischung verschieden schwerer Komponenten in einer auf gekrümmten Bahnen laufenden Gasströmung beruht<sup>5)</sup>. Die als Trenndüsenverfahren bezeichnete Methode vermeidet die feinporigen Membranen des Diffusionsverfahrens und die mechanisch hoch belasteten Teile des Zentrifugenverfahrens.

Um einen Vergleich der 3 Verfahren zu ermöglichen, wird im folgenden zunächst der allgemeine Aufbau einer Uranisotopentrennan-

lage beschrieben. Dabei werden die zur Charakterisierung ihrer Leistungsfähigkeit benutzten Begriffe "Wertfunktion" (value function) und "Trennarbeit" (separative work) erläutert. Anschließend werden die technischen Einzelheiten der 3 Verfahren behandelt, soweit sie aus der offenen Literatur bekannt sind. Dabei soll versucht werden, die wirtschaftlichen Aspekte der 3 Verfahren miteinander zu vergleichen.

### Allgemeiner Aufbau einer Uranisotopentrennanlage

Bei allen 3 Verfahren sind die Anlagen aus einer großen Zahl funktionell abgeschlossener Grundeinheiten, den sogenannten Trennelementen, aufgebaut, deren Wirkung sich einheitlich durch das in Abb. 1 dargestellte Schema beschreiben läßt.

Ein Strom  $L$  von gasförmigem Uranhexafluorid tritt in das Element ein und wird in die Ströme  $\vartheta L$  und  $(1-\vartheta)L$  aufgespalten. Die zwischen 0 und 1 variierende unbenannte Zahl  $\vartheta$  bezeichnet man als Aufteilungsverhältnis (cut). Aufgrund der Trennwirkung des Elementes sind die Molenbrüche  $n_2$  und  $n_3$  des  $U^{235}$  in den austretenden Strömen verschieden. Man definiert nun einen Trennfaktor

$$A = \frac{n_2(1-n_3)}{n_3(1-n_2)} \quad (1)$$

der gegenüber anderen möglichen Definitionen (z.B.  $A = n_2/n_3$ ) den Vorteil hat, daß er bei den betrachteten Verfahren praktisch unabhängig vom mittleren Molenbruch  $n$  ist. Besonders

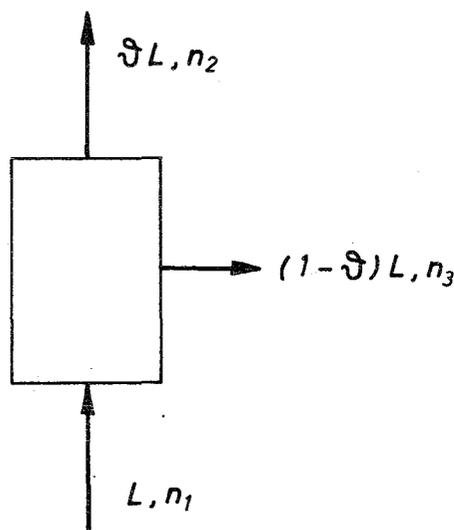


Abb. 1: Schema eines Trennelementes

im Fall des Diffusionsverfahrens und des Trenndüsenverfahrens, bei denen  $A - 1 \ll 1$  ist, benutzt man ferner die Größe

$$\epsilon_A = A - 1 \quad (2)$$

die gewöhnlich "Elementareffekt der Trennung" genannt wird. Beim Diffusionsverfahren beträgt  $\epsilon_A$  weniger als 0,4 %, beim Trenndüsenverfahren etwa 1 % und beim Zentrifugenverfahren etwa 20 - 30%.

Bei keinem der 3 Verfahren reicht die im einzelnen Trennelement erzielte Uran 235- Anreicherung für die üblichen kern-technischen Anwendungen aus. Es müssen daher in praktisch allen Fällen Trennelemente hintereinandergeschaltet werden. Dabei wird man sich bemühen, nur Ströme gleicher Isotopenzusammensetzung zu vermischen. Andernfalls würde die Wirkung der Trennelemente mehr oder weniger rückgängig gemacht werden. Eine Kaskade, die diese "Nichtvermischungsbedingung" exakt erfüllt, bezeichnet man als "ideale" Kaskade.

Da das als Ausgangsmaterial benutzte natürliche Uran verhältnismäßig teuer ist, muß sein Uran 235- Gehalt möglichst gut ausgenutzt werden. Das bedeutet, daß eine Uranisotopentrennanlage, neben dem Anreicherungssteil, einen Abstreifteil besitzen muß. Seine Trennelemente werden ausschließlich dazu verwendet, den Uran 235- Gehalt des Abfallmaterials zu vermindern, d.h. im Abfallmaterial das Uran 238 anzureichern.

Abb. 2 zeigt schematisch die Abhängigkeit des Stufendurchsatzes  $L$  einer aus Anreicherungs- und Abstreifteil bestehenden idealen Kaskade von der Stufennummer  $S$  (durchgezogene Kurve)<sup>6)</sup>. Man bemerkt, daß die Stufendurchsätze des Anreicherungs- und Abstreifteils kontinuierlich mit der von der Einspeisungsstelle des natürlichen Materials ("Basis") aus gezählten Stufennummer abnehmen.

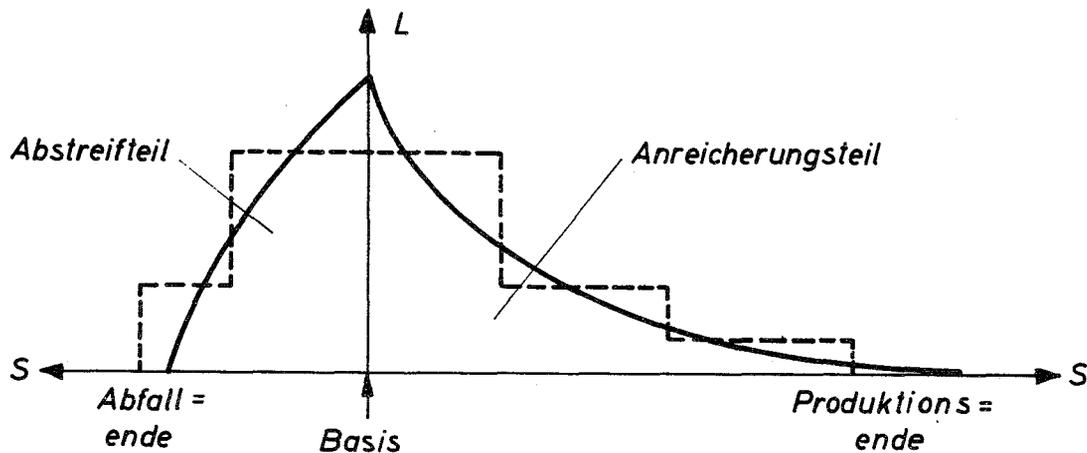


Abb. 2: Abhängigkeit des Stufendurchsatzes L einer idealen Kaskade (ausgezogene Kurve) und einer quadrierten Kaskade (gestrichelte Kurve) von der Stufennummer S

Unter der Voraussetzung eines kleinen elementaren Trenneffektes kann man die Summe der Stufendurchsätze einer idealen Kaskade durch Multiplikation des als Produkt entnommenen Materialstromes P mit einer Funktion V berechnen, die nur von den Uran 235- Molenbrüchen  $n_p$ ,  $n_w$  und  $n_o$  im Produkt, im Abfall- und im Ausgangsmaterial abhängt. Man kann also schreiben:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Summe der Materialdurchsätze} \\ \text{aller Trennstufen einer idealen} \\ \text{Kaskade} \end{array} \right\} = \text{const. } P \cdot V(n_p, n_w, n_o) \quad (3)$$

Die Funktion

$$V(n_p, n_w, n_o) = \frac{n_p - n_o}{n_o - n_w} \left[ (2n_w - 1) \ln \frac{n_w(1 - n_o)}{n_o(1 - n_w)} + \frac{(1 - 2n_o)(n_w - n_o)}{n_o(1 - n_o)} \right] \quad (4)$$

wird Wertfunktion (value function) genannt. Sie beschreibt die Abhängigkeit des durch den Gasdurchsatz charakterisierten Trennaufwandes einer idealen Kaskade von der durch die 3 Molenbrüche festgelegten Trennaufgabe. Tabelle 1 gibt einige Zahlenwerte von V in Abhängigkeit von der Produktionskonzentration für die bei den amerikanischen Anlagen eingestellte Abfallkonzentration von 0,2 Gew. %  $U^{235}$  1).

Gew. % U <sup>235</sup> im Produkt	V
0,711	0,000
1,00	0,380
2,00	2,194
2,60	3,441
3,00	4,306
5,00	8,851
10,0	20,863
20,0	45,747
50,0	122,344
90,0	227,341
98,0	269,982

Tab. 1: Wertfunktion für die Anreicherung von U<sup>235</sup>  
bei einer Abfallkonzentration von 0,2 Gew. % U<sup>235</sup>

Das Produkt aus dem Materialstrom P und der Wertfunktion V wird als Trennleistung (separative capacity) der Anlage bezeichnet. Das Produkt aus der produzierten Materialmenge und der Wertfunktion nennt man Trennarbeit (separative work). Da die Wertfunktion eine unbenannte Zahl ist, ergeben sich Trennleistung und Trennarbeit in den Einheiten in denen der Produktionsstrom bzw. die produzierte Materialmenge gemessen werden, also z.B. in kg U/Jahr bzw. kg U.

Eine der möglichen praktischen Anwendungen des Trennarbeitsbegriffes ergibt sich aufgrund der Tatsache, daß sich die Trennarbeit bei einer idealen Kaskade additiv aus den Trennarbeiten der einzelnen Trennelemente zusammensetzt. Da man die Trennleistung der Elemente ebenfalls mit der Wertfunktion berechnen kann<sup>7)</sup>, weiß man, wieviel Trennelemente eingesetzt werden müssen, wenn die durch den gewünschten Produktionsstrom und die Molenbrüche  $n_p, n_w$  und  $n_o$  des Uran 235 vorgegebene Trennleistung der gesamten Anlage festliegt. Dabei muß allerdings vorausgesetzt werden, daß die Kaskade "ideal" aufgebaut ist.

Beim Diffusionsverfahren und beim Trenndüsenverfahren, bei denen der Durchsatz der einzelnen Trennstufen nahezu beliebig groß gewählt werden kann, wird die ideale Kaskade in der Praxis durch eine relativ kleine Zahl von Kaskadenabschnitten angenähert, die aus vielen Stufen mit jeweils konstantem Materialdurchsatz bestehen. Der Vorteil einer solchen "quadrierten" Kaskade (Abb. 2, gestrichelte Kurve) besteht bei den genannten Verfahren darin, daß mit einer entsprechend kleinen Zahl von Trennelementtypen gearbeitet werden kann, was die Investierungskosten günstig beeinflusst. Die effektive Trennleistung der quadrierten Kaskade wird, wie die Trennleistung einer idealen Kaskade, durch das Produkt  $P \cdot V(n_p, n_w, n_o)$  berechnet. Dividiert man die so berechnete effektive Trennleistung der quadrierten Kaskade durch die Summe der Trennleistungen ihrer Elemente, so erhält man den Kaskadenwirkungsgrad. Er erreicht in der Praxis im allgemeinen Werte über 90%. Definitionsgemäß ist der Kaskadenwirkungsgrad der idealen Kaskade gleich 1.

Eine weitere Anwendung des Trennarbeitsbegriffes ist die Definition der Größen

$$\zeta = \text{spezif. Energieverbrauch} = \frac{\text{tatsächlicher Energieverbrauch}}{\text{erzeugte Trennarbeit}} \quad (5)$$

$$\xi = \text{spezif. Investierung} = \frac{\text{investiertes Kapital}}{\text{erzeugte Trennarbeit/Zeit}} \quad (6)$$

Wir werden von diesen Größen beim Vergleich der Wirtschaftlichkeit der 3 Verfahren Gebrauch machen.

### Das Gasdiffusionsverfahren

Die Gasdiffusion durch poröse Membranen unter Verwendung einer Kaskadenschaltung wurde schon 1932 von G. Hertz zur Trennung der Neon Isotope im Labormaßstab benutzt<sup>8)</sup>. In den USA wurde sie während des 2. Weltkrieges erstmals erfolgreich zur Trennung der Uranisotope im technischen Maßstab herangezogen<sup>9)</sup>.

Abb. 3 zeigt eine Darstellung des Aufbaus der amerikanischen Diffusionsanlagen, die einem in diesem Jahr erschienenen Bericht der U.S.A.E.C. entnommen wurde<sup>1)</sup>.

Gasförmiges Uranhexafluorid wird in Axialkompressoren verdichtet und den sogenannten "Convertern"

zugeleitet. Sie enthalten einen Kühler, der die Kompressionswärme abführt, und eine größere

Zahl poröser Rohre, von denen in der Zeichnung nur 2 dargestellt sind. Im Raum um die porösen Rohre wird vom Kompressor der nächsten Trennstufe ein Unterdruck aufrechterhalten, aufgrund dessen ein Teil des  $UF_6$  durch die porösen Rohrwandungen diffundiert. Dabei reichern sich die leichteren Molekeln aufgrund ihrer größeren mittleren gaskinetischen Geschwindigkeit im Diffusat an. Voraussetzung ist dabei, daß die Molekeln bei ihrer Wanderung durch die Membranporen im wesentlichen mit der Wand und nicht miteinander zusammenstoßen. Bei Zusammenstößen miteinander würden sich die schweren und leichten Molekeln in den Poren voreinander herschieben, was eine Trennung unmöglich machen würde. Während der an Uran 235 angereicherte Teil nach der Kompression dem Converter der nächsten Stufe zugeführt wird, strömt der an Uran 235 verarmte Rest zum Kompressor einer vorher-

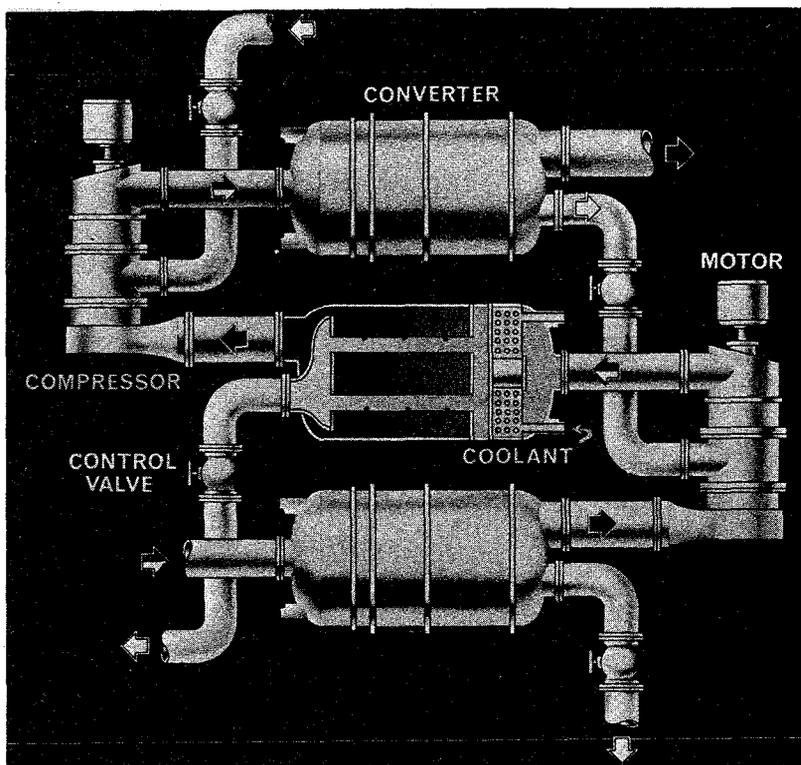


Abb. 3: Aufbau der amerikanischen Diffusionsanlagen, entnommen aus dem in 1) zitierten Bericht der U.S.A.E.C.

gehenden Stufe. Da sich die Restfraktion auf einem höheren Druckniveau befindet, als die durch die poröse Rohrwand hindurchgetretene, besitzen die Kompressoren zwei auf verschiedenen Druckniveaus liegende Sauganschlüsse.

Über das Material, aus dem die heute verwendeten Diffusionsrohre hergestellt sind, liegen keine verbindlichen Angaben vor. Aus verschiedenen Veröffentlichungen ist jedoch zu entnehmen, daß zumindest zeitweilig gesintertes Nickelpulver verwendet worden ist. Es gilt als sicher, daß die amerikanischen Diffusionsanlagen heute bei Vollast auf der Hochdruckseite mit annähernd Atmosphärendruck arbeiten. Das bedeutet, daß die Porendurchmesser der Diffusionsrohre in der Größenordnung von  $10^{-5}$  mm liegen müssen. Da Uranhexafluorid bei Zimmertemperatur nur einen Dampfdruck von etwa 100 Torr besitzt, müssen die Anlagen bei erhöhter Temperatur gefahren werden. Die mit  $UF_6$  gefüllten Anlagenteile befinden sich daher in Temperierboxen. Die Luft in diesen Boxen ist getrocknet, da in die Anlage eindringende Feuchtigkeit  $UF_6$  zersetzen würde. Man fürchtet vor allem die festen Zersetzungsprodukte des  $UF_6$ , die die Membranporen verstopfen können.

Zur Herstellung des für Leichtwasserreaktoren benötigten 3-5%igen Materials müssen etwa 1500 - 1800 Diffusionsstufen hintereinandergeschaltet werden<sup>1)</sup>. Die Trenneinheiten lassen sich beim Diffusionsverfahren so groß bauen, daß eine Parallelschaltung i.a. nicht erforderlich ist. Eine Trenneinheit in der Basis der amerikanischen Anlagen erzeugt pro Jahr mehrere tausend kg Uran Trennarbeit. Der verwendete Axialverdichter dürfte eine Ansaugleistung von mehreren  $100\ 000\ m^3/h$  haben.

Als spezifische Aufwandsgrößen (5) und (6) erhält man mit den für die Summe der 3 amerikanischen Diffusionsanlagen

angegebenen Zahlen<sup>1)</sup> bei Vollast:

$$\xi = \frac{5,25 \cdot 10^{10} \text{ kWh/Jahr}}{1,7 \cdot 10^7 \text{ kg U/Jahr}} = \underline{\underline{3100 \text{ kWh/kgU}}}$$

$$\xi = \frac{2,33 \cdot 10^9 \text{ \$}}{1,7 \cdot 10^7 \text{ kg U/Jahr}} = \underline{\underline{137 \text{ \$/kgU/Jahr}}}$$

Dabei ist zu beachten, daß die spezifische Investierung beim Diffusionsverfahren nach Untersuchungen von Fréjacques und Galley<sup>10)</sup> sowie von Mårtensson<sup>11)</sup> mit kleiner werdender Anlagengröße stark zunimmt.

Für die von der U.S.A.E.C ab 1969 vorgesehene Lohnanreicherung ist ein Preis von 26 \$/kg U Trennarbeit festgesetzt worden<sup>1)</sup>. Er beruht auf einer Abschreibungszeit für die Anlagen von etwa 35 Jahren und einem Strompreis von 4 Mills/kWh.

Wenn die von den amerikanischen Trennanlagen erzeugte Trennleistung von  $1,7 \cdot 10^7$  kg U/Jahr vollständig zur Produktion von 2,6 %igem  $U^{235}$  eingesetzt werden könnte, würden die Anlagen pro Jahr  $1,7 \cdot 10^7$  kg U/3,441  $\approx$  5000 t Uran mit 2,6 %  $U^{235}$  liefern (3,441 = Wertfunktion für 2,6 % nach Tab. 1). Mit diesem Material könnten in Leichtwasserreaktoren fortlaufend etwa 130 GW an elektrischer Leistung produziert werden. Da die Anlagen selber 6 GW benötigen, verbrauchen sie also etwa 4,6 % des Stromes, der mit dem von ihnen produzierten Material in Leichtwasserreaktoren erzeugt werden kann.

#### Das Gaszentrifugenverfahren

Das Gaszentrifugenverfahren wurde schon während des letzten Weltkrieges sowohl in Deutschland als auch in den USA im Labormaßstab zur Trennung der Uranisotope benutzt. In Deutschland waren es Gruppen um Harteck, Groth, Bayerle und Martin<sup>12)</sup>, in den USA Gruppen um Beams und Urey<sup>13)</sup>, die erste erfolgreiche Trennversuche mit Uran durchführten.

Nach einer längeren Pause wurden die Arbeiten an verschiedenen Stellen in der Welt fortgesetzt. Die heute laufenden Untersuchungen über Gaszentrifugen stehen in den meisten Ländern unter Geheimhaltung, was eine objektive Beurteilung der wirtschaftlichen Aussichten des Verfahrens sehr erschwert.

Beim Gaszentrifugenverfahren befindet sich gasförmiges Uranhexafluorid in einem schnell rotierenden Hohlzylinder (Abb. 4). Da die Zentrifugalkraft proportional zur Molekelmasse ist,

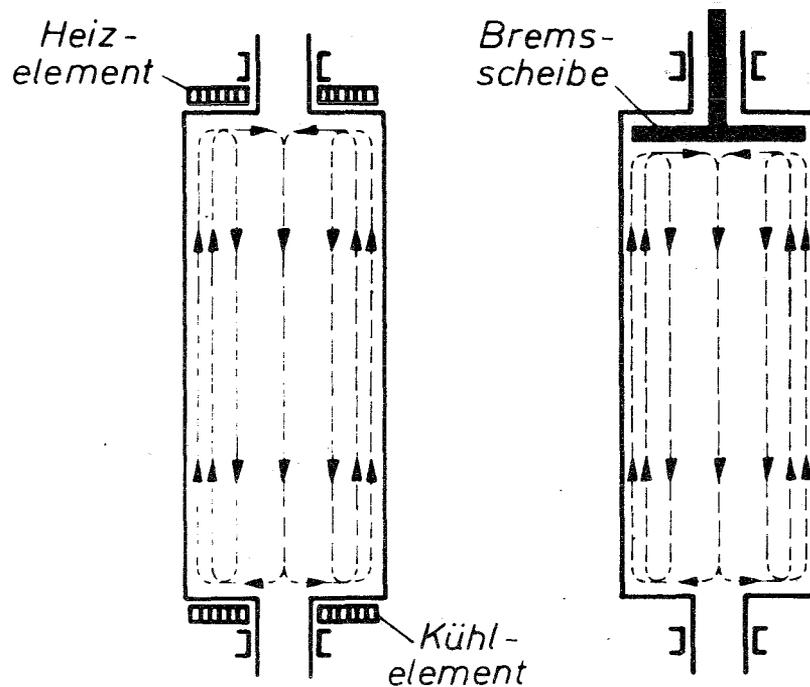


Abb. 4: Schema einer Gaszentrifuge, in der der elementare Trenneffekt durch die gestrichelt eingezeichnete Konvektionsströmung des  $UF_6$  vervielfacht wird.  
links: Konvektionserzeugung durch außen angebrachte Heiz- und Kühlelemente  
rechts: Konvektionserzeugung durch eine innen angebrachte Brems-scheibe

stellt sich für die schwere Komponente des Isotopengemisches in radialer Richtung ein größerer relativer Druckanstieg ein als für die leichte. Die Folge ist eine teilweise Entmischung der beiden Isotopenkomponenten, bei der die leichte in der Umgebung der Rotorachse und die schwere in der Nähe der inneren Rotoroberfläche angereichert ist.

Erzeugt man in der  $UF_6$ -Füllung des Zentrifugenrotors eine Konvektionsströmung, wie dies in Abb. 4 angedeutet ist, so wird der in radialer Richtung auftretende Elementareffekt durch den Gegenstrom, wie in einer Rektifikationssäule, vervielfacht. Bei der in der Abbildung gewählten Konvektionsrichtung reichert sich das schwere Isotop am oberen und das leichte am unteren Rotorende an. Im linken Teil der Abbildung wird die Konvektion mit außen angebrachten Temperierelementen, im rechten mit einer innen angebrachten Bremsscheibe oder einer äquivalenten Einrichtung erzeugt.

Abb. 5 zeigt eine von Zippe während seines Aufenthaltes in den USA veröffentlichte Zentrifugenkonstruktion, die er während seines Aufenthaltes in Rußland zusammen mit Steenbeck entwickelt hat<sup>4)</sup>. Der Zentrifugenrotor steht auf einer Stahl-nadel und wird am oberen Ende berührungsfrei durch zwei axial einander gegenüberstehende Ringmagnete gehalten. Dadurch kann die bei anderen Zentrifugenkonstruktionen auftretende beträchtliche Lagerreibung weitgehend vermieden werden. Der Rotor wird am unteren Ende durch einen Wirbelstrommotor angetrieben. Das Innere des Rotors steht am oberen Ende über die Ringspalte zwischen den Magneten mit dem umgebenden Raum in Verbindung. Da der  $UF_6$ -Druck in der Nähe der Achse des Zentrifugenrotors sehr gering ist, ist auch der  $UF_6$ -Druck im Außenraum sehr klein. Um die dennoch auftretende äußere Gasreibung des Rotors so niedrig wie möglich zu halten, wird das  $UF_6$  durch eine Molekularpumpe vom unteren Rotorteil ferngehalten. Das  $UF_6$  wird durch ein feststehendes, von oben in den Zentrifugenrotor berührungsfrei hineinragendes Rohrsystem zu- und abgeführt. Die Abführleitungen für die schwere

und leichte Fraktion sind als Staurohre ausgebildet. Der Druckunterschied zwischen dem Gas in den Staurohren und in der zentralen Zuführungsleitung wird zum Fördern des  $UF_6$  im äußeren Leitungssystem ausgenutzt. Das obere Staurohrsystem dient gleichzeitig, statt einer Bremscheibe, zur Erzeugung der Konvektionsströmung. Eine entsprechende Wirkung des unteren Staurohres wird durch eine mit dem Rotor umlaufende Abschirmplatte verhindert.

Der theoretische Maximalwert der Trennleistung einer Zentrifuge beträgt<sup>6)</sup>

$$\delta U_{\max} = \varrho D \left( \frac{\Delta m v^2}{2RT} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{2} Z \quad (7)$$

( $\varrho$  Gasdichte,  $D$  Diffusionskonstante,  $\Delta m$  Molgewichtsdifferenz der isotopen Molekeln,  $v$  Umfangsgeschwindigkeit

der inneren Rotoroberfläche,  $R$  Gaskonstante,  $T$  absolute Temperatur,  $Z$  Rotorlänge). Mit den bekanntgewordenen Rotormaterialien, d.h. mit den bekanntgewordenen möglichen Umfangsgeschwindigkeiten  $v$ , sind bei einer Rotorlänge von einem Meter theoretische Trennleistungen in der Größenordnung von einigen kg U/Jahr zu erwarten. Da die Summe von Antriebs- und Steuerleistung einer solchen Zentrifuge nur in der Größenordnung von einigen 100 Watt zu liegen braucht, kann der spezifische Energieverbrauch beim Gaszentrifugenverfahren merklich kleiner gemacht werden, als beim Diffusionsverfahren. Problematisch

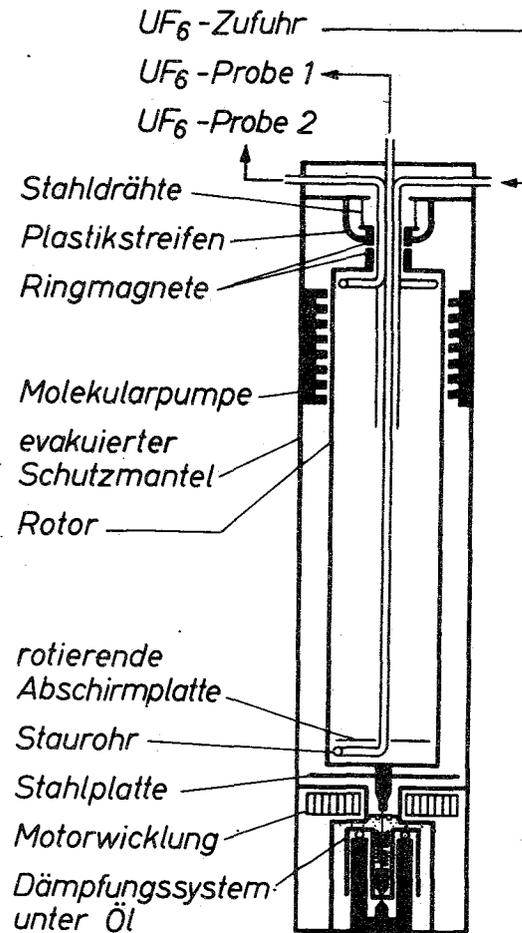


Abb. 5: Gegenstromzentrifuge mit Spitzenlagerung am unteren und magnetischer Halterung am oberen Rotorende<sup>4)</sup>

scheint dagegen die spezifische Investierung zu sein, da pro kg Trennarbeit/Jahr nur 137 \$ für die Zentrifugen einschließlich Zubehör, Gebäude usw. verbraucht werden dürfen, wenn die oben erwähnte spezifische Investierung der amerikanischen Diffusionsanlagen nicht überschritten werden soll. Günstig ist bei der Zentrifuge, daß eine Verkleinerung der Anlagenkapazität wegen der ohnehin kleinen Trenneinheiten, im Gegensatz zum Diffusionsverfahren, nur ein sehr geringes Anwachsen der spezifischen Investierung zur Folge hat<sup>10)</sup>. Das Zentrifugenverfahren wird daher vor allem für relativ kleine Trennanlagen in Erwägung gezogen. Es ist bemerkenswert, daß zur Produktion von 3%igem Material, wie es für Leichtwasserreaktoren benötigt wird, nur 10 bis 20 Gegenstromzentrifugen hintereinandergeschaltet zu werden brauchen. Wegen des sehr kleinen Materialdurchsatzes müssen dagegen sehr viele Zentrifugen parallel geschaltet werden, wenn für die Reaktortechnik interessante Materialströme erzeugt werden sollen. Um die Trennleistung einer einzelnen amerikanischen Diffusionsanlage zu erreichen, müßten von den oben in Erwägung gezogenen Zentrifugen größenordnungsmäßig 1 Million Stück installiert werden. Die Wartungskosten einer solchen, aus sehr vielen Einzelelementen bestehenden Anlage sind schwer abzuschätzen.

Nach der angegebenen Formel (7) für die maximale Trennleistung der Zentrifuge sind große Verbesserungen von einer Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit, d.h. vom Einsatz neuartiger Werkstoffe zu erhoffen. Entsprechende Überlegungen müssen aber genau geprüft werden, da ein in (7) zu 100 % angenommener Wirkungsgrad stark vom Strömungsprofil und damit von der Umfangsgeschwindigkeit abhängt<sup>14)</sup>.

Eine andere Möglichkeit zur Steigerung der Trennarbeitsleistung ist die Vergrößerung der Rotorlänge Z. Hier sind aber Grenzen durch das Schwingungsverhalten des Zentrifugenrotors gegeben. Wenn ein unterkritischer Betrieb des Zentrifugenrotors beibehalten werden soll, muß mit der Länge auch

der Durchmesser des Zentrifugenrotors vergrößert werden. Da die Trennleistung der Zentrifuge vom Rotordurchmesser unabhängig ist, würde dies aber zu einer problematischen Erhöhung des auf die Trennleistung bezogenen Rotorgewichtes führen. Eine Vergrößerung der Rotorlänge ohne entsprechende Vergrößerung des Rotordurchmessers, also ein überkritischer Betrieb, ist immer wieder in Erwägung gezogen worden. Bis heute sind aber keine entsprechenden wirtschaftlich interessanten Ergebnisse bekannt geworden.

Kürzlich haben M. Bogaardt und F.H. Theyse einen Bericht über die holländische Zentrifugentechnik veröffentlicht<sup>15)</sup>, der zu einem für die Zentrifuge sehr günstigen Ergebnis kommt. Leider enthält der Bericht keine Angaben über die technischen Details und die Trennleistung der den Berechnungen zugrundeliegenden Zentrifuge. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Gaszentrifuge vor allem wegen ihres möglichen kleinen spezifischen Energieverbrauches ein interessantes Instrument für die Uranisotopentrennung ist. Eine Entscheidung über die wirtschaftliche Anwendbarkeit dürfte sich aber erst nach Inbetriebnahme einer größeren Modellanlage treffen lassen.

#### Das Trenndüsenverfahren

Die von uns heute verwendete Anordnung ist in Abb. 6 im Schnitt dargestellt<sup>16)</sup>. Sie besteht aus einem Düsenblech, einer Umlenkwand und einem Abschälblech. Als Ausgangsgas dient ein Gemisch aus 5 Mol %  $UF_6$  und 95 Mol % He, das auf der linken Seite der Anordnung zugeführt wird. In den Räumen rechts vom Düsenblech wird ein um etwa den Faktor 1/4 kleinerer Druck aufrechterhalten. Aufgrund des Druckgefälles strömt das Gemisch durch die aus Düsenblech und Umlenkwand gebildete gekrümmte Lavaldüse, wobei sich infolge der massenabhängigen Zentrifugalkraft die schweren Komponenten an der inneren Oberfläche der Umlenkrinne anreichern. Das Abschälblech teilt den Strom in eine schwere und eine leichte Fraktion auf, die getrennt abgesaugt werden.

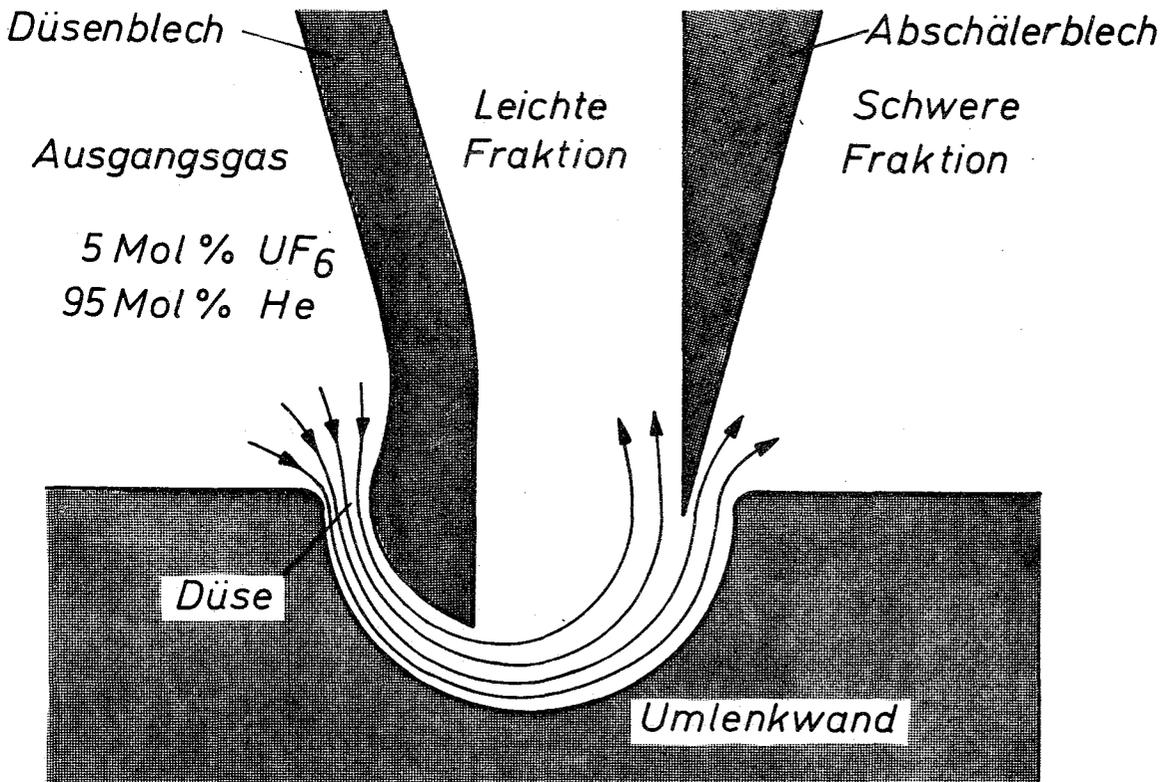


Abb. 6: Querschnitt durch eine Trenndüsenanordnung mit schematisch eingezeichneten Stromflächen

In der leichten Fraktion ist das He gegenüber dem  $UF_6$  und im  $UF_6$  das leichte gegenüber dem schweren Uranisotop angereichert. Das umgekehrte gilt für die schwere Fraktion. Durch den Heliumzusatz wird die Strömungsgeschwindigkeit des  $UF_6$  stark erhöht, was die Trennung der Uranisotope entsprechend verbessert. Es ergibt sich ein Elementareffekt für die Trennung der Uranisotope, der rund 3 mal so groß wie beim Diffusionsverfahren ist.

Für praktische Zwecke muß der Elementareffekt, wie bei den anderen Verfahren, in einer Kaskadenschaltung vervielfacht werden. Beim Zusammenschalten der Trennelemente wird durch entsprechende Wahl des  $UF_6$ -Abschälverhältnisses dafür gesorgt, daß die Trennarbeit für die Entmischung der Uranisotope erhalten bleibt, während die Trennarbeit für die Entmischung von He und  $UF_6$  weitgehend vernichtet wird. Das restliche zum Kaskadenkopf transportierte Helium wird dort vom  $UF_6$  abgetrennt und dem Kaskadenfuß wieder zugeführt.

Zum experimentellen Nachweis der gasdynamischen Stabilität einer mit He/UF<sub>6</sub>-Gemisch arbeitenden Trenndüsenkaskade wurde in Karlsruhe eine 10-stufige Pilot-Anlage mit einem UF<sub>6</sub>-Aufteilungsverhältnis  $\vartheta_{\text{UF}_6} = 0,5$  gebaut, die erstmals im November 1967 voll in Betrieb genommen werden konnte<sup>17)</sup>.

Abb. 7 zeigt diese Anlage vom Kontrollraum aus gesehen. Da sie im Grundriß U-förmig angeordnet ist, erkennt man nur die Hälfte der Trennstufen. In Abb. 8 ist der Verlauf des gegen das eine Kaskadenende gemessenen Anreicherungs-faktors dargestellt. Der Gesamtanreicherungs-faktor  $A = 1,082$  stimmt innerhalb der Fehlergrenze mit dem aufgrund des Stufentrennfaktors für  $\vartheta_{\text{UF}_6} = 0,5$  und für das gewählte Expansionsverhältnis 3,5 vorausberechneten Wert überein. Die Anlage arbeitet erwartungsgemäß inhärent stabil. Man kann daher davon ausgehen, daß bei einer technischen Realisierung des Trenndüsenverfahrens keine ernstlichen Regelprobleme auftreten werden.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Pilot-Anlage wurden Entwicklungs- und Planungsarbeiten für eine technische Trennstufe durchgeführt<sup>16)</sup>. Da beim Trenndüsenverfahren ein umso höherer Gasdruck angewendet werden kann, je kleiner die kritischen Abmessungen der schlitzförmigen Düsensysteme sind, und da aus wirtschaftlichen Gründen ein möglichst hoher Gasdruck angestrebt werden muß, wurden Trenndüsensysteme mit besonders kleinen kritischen Abmessungen gebaut und experimentell erprobt. In Tab. 2 sind die für die technischen Trenndüsensysteme vorgesehenen kritischen Abmessungen, die dazugehörigen optimalen Betriebsbedingungen und die Ergebnisse für  $\vartheta_{\text{UF}_6} = 1/3$  zusammengestellt. Die Verminderung des UF<sub>6</sub>-Aufteilungsverhältnisses von 1/2 auf 1/3 verbessert die spezifischen Aufwandsgrößen des Trenndüsenverfahrens um etwa 30%<sup>5)</sup>.

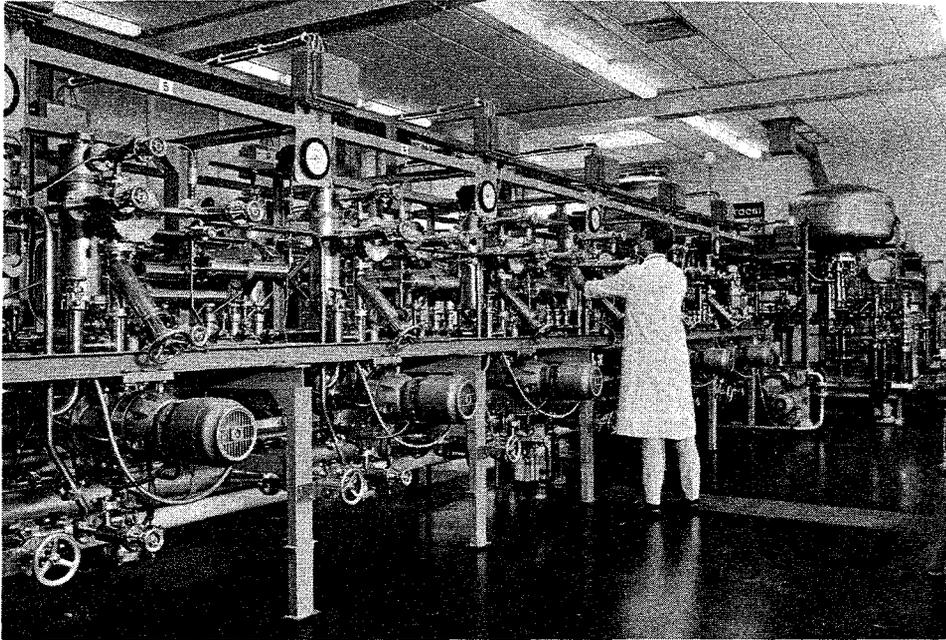


Abb. 7: 10 stufige Pilotanlage für das Trenndüsenverfahren

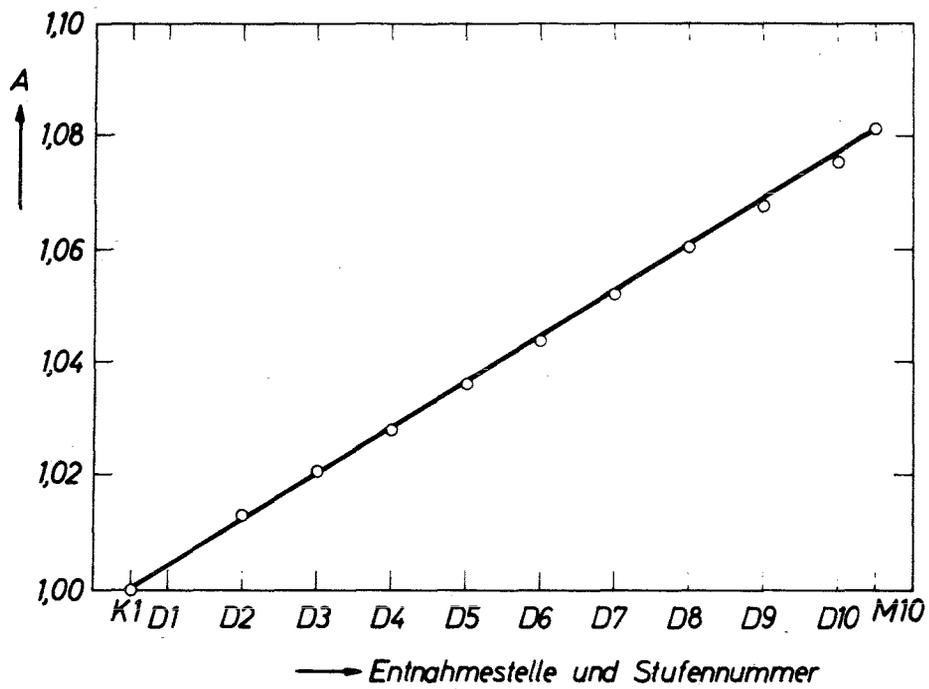


Abb. 8: Der Verlauf des gegen das eine Kaskadenende gemessenen  $U^{235}$ -Anreicherungsfaktors A längs der Kaskade.

Entnahmestellen: K, M schwere bzw. leichte Fraktion, D Düsengas

Durchmesser der Umlenkrinne (mm)	0,2
Düsenweite an der engsten Stelle (mm)	0,03
Einlaßdruck des He/UF <sub>6</sub> -Gemisches (mm Hg)	600
Inneres Expansionsverhältnis	4
UF <sub>6</sub> -Aufteilungsverhältnis $\vartheta_{\text{UF}_6}$	1/3
Elementareffekt der Trennung $\varepsilon_A \cdot 10^2$	1,18
UF <sub>6</sub> Durchsatz $\left( \frac{\text{g-Mol UF}_6/\text{Stunde}}{\text{m Schlitzlänge}} \right)$	27

Tab. 2: Die für die technischen Trenndüsenysteme vorgesehenen kritischen Abmessungen und optimalen Betriebsbedingungen sowie die für  $\vartheta_{\text{UF}_6} = 1/3$  erzielten Ergebnisse

Abb. 9 zeigt den Aufbau der in der technischen Trennstufe benutzten rohrförmigen Trennelemente: Auf der Mantelfläche eines 2 m langen Aluminiumrohres mit etwa 10 cm äußerem Durchmesser sind 10 schlitzförmige Trenndüsenysteme angeordnet. Das Innere des Rohres ist durch Zwischenwände in 10 Kanäle unterteilt. Durch 5 dieser Kanäle wird das Ausgangsgemisch zugeführt. Durch die restlichen 5 Kanäle wird die schwere Fraktion abgeleitet. Die leichte Fraktion strömt radial nach außen in einen Trennelementtank.

In Abb. 10 ist die gesamte Trennstufe dargestellt. Der Trennelementtank, der 100 der beschriebenen Trennelementrohre enthält, bildet, zusammen mit einem zweistufigen zwischen- und endgekühlten Radialkompressor von 100 000 m<sup>3</sup>/h Ansaugleistung, eine bauliche Einheit, die als Ganzes erprobt und gegebenenfalls ausgewechselt werden kann. Bei Vollast ist eine Trennleistung von 1700 kg U Trennarbeit/Jahr zu erwarten, die annähernd einem Drittel der Trennleistung der größten amerikanischen Diffusionsstufen<sup>1)</sup> entspricht. Die bei der Industrie in Auftrag gegebene Einzelstufe soll Ende 1969 zur Erprobung bereitstehen.

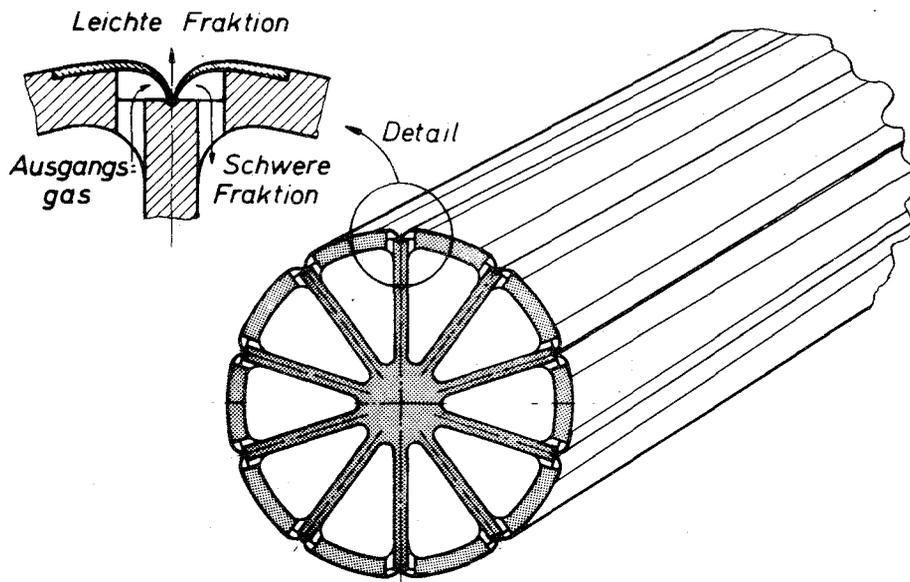


Abb. 9: Aufbau der für die technische Trennstufe vorgesehenen rohrförmigen Trennelemente

Eine Abschätzung der spezifischen Aufwandsgrößen des Trenndüsenverfahrens<sup>16)</sup> aufgrund der bis heute vorliegenden Unterlagen läßt erwarten, daß die spezifischen Investierungskosten beim Trenndüsenverfahren merklich kleiner als beim Diffusionsverfahren sein werden. Dagegen ist der zu erwartende spezifische Energieverbrauch im Augenblick noch um etwa den Faktor 2,2 höher als beim Diffusionsverfahren. Eine Trenndüsenanlage würde also nach der vorliegenden Abschätzung z.Zt etwa 10% des Stromes verbrauchen, der mit dem von ihr produzierten Material in Leichtwasserreaktoren erzeugt werden könnte.

Bei der Berechnung der Trennarbeitskosten wird der noch vorhandene Nachteil des größeren Stromverbrauches, außer durch die kleineren Investierungskosten, z.T. dadurch ausgeglichen, daß wegen der außerordentlich kurzen Kaskadeneinstellzeit, im Gegensatz zum Diffusionsverfahren, keine Ersatzstromquelle zur Verfügung stehen muß. Außerdem dürfte die kleinere erforderliche

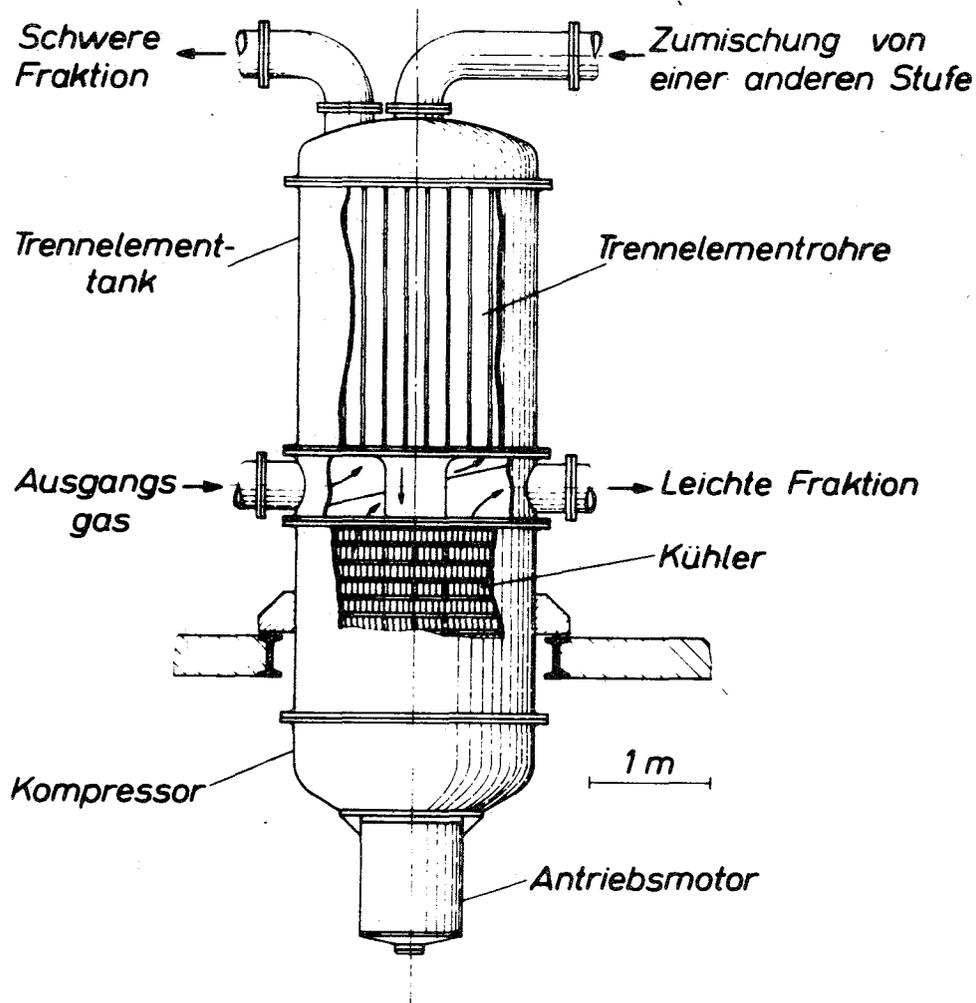


Abb. 10: Aufbau der technischen Trennstufe

Trennstufenzahl und die Vermeidung der feinporigen Membranen zu einer merklichen Verminderung der Wartungskosten führen.

Beim Trenndüsenverfahren brauchen, wie beim Diffusionsverfahren, keine Trennstufen parallel geschaltet zu werden, um den für die wirtschaftliche Herstellung von Reaktorbrandstoff erforderlichen Produktionsstrom zu erzeugen. Eine im Rahmen eines Nonproliferations-Vertrages genehmigte Trenndüsenanlage kann daher nicht durch Umschalten von Trennelementen auf eine wesentlich höhere als die bei der Genehmigung vorgesehene Produktionskonzentration gebracht werden. Eine Trenn-

düsenanlage ist also in diesem Sinn, wie eine Diffusionsanlage, "proliferationssicher".

Abschließend glauben wir sagen zu können, daß das Trenndüsenverfahren schon heute eine interessante Alternative zum Gasdiffusionsverfahren darstellt. Wir sind davon überzeugt, daß die laufenden Entwicklungsarbeiten seine wirtschaftlichen Aussichten weiter verbessern werden.

Literaturverzeichnis

- 1) U.S.A.E.C. Report ORO-658, 1968.  
Zusammenfassung in deutscher Sprache:  
R. Wünsche, Atom und Strom Jahrg. 14 (1968), Folge 10.
- 2) K. Beyerle, W. Groth, H. Ihle, A. Murrenhoff, E. Nann, K.H. Welge, Proc. Symp. Isotope Separ. Amsterdam 1957, North Holland Publ. Comp. Amsterdam 1958, S. 667.
- 3) J. Kistemaker, J. Los, E.J.J. Veldhuyzen, Proc. 2. United Nations Conf. Peacef. Uses of Atomic Energy, Vol. 4, Geneva 1958, S. 435.
- 4) G. Zippe, Rep. No. E.P. - 4420 - 101 - 60 U, Univ. Virginia, U.S.A. (1960).
- 5) E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel, Angew. Chemie, Intern. Edition, 6, 507 (1967). Diese Arbeit enthält auch eine Zusammenstellung der früheren Veröffentlichungen über die Anreicherung der Uranisotope nach dem Trenndüsenverfahren.
- 6) Vgl. z.B. K. Cohen, The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of U<sup>235</sup>, McGraw Hill, New York 1951.
- 7) Im Fall des Diffusionsverfahrens und des Trenndüsenverfahrens ( $\epsilon_A \ll 1$ ) läßt sich die Trennleistung eines Trennelementes einfacher mit der Näherungsformel 
$$\delta U = L \epsilon_A^2 \frac{\delta(1-\delta)}{2}$$
 berechnen.  $\delta U$  wird in der angelsächsischen Literatur als "separative power" des Trennelementes bezeichnet.
- 8) G. Hertz, Z. Physik 79, 108 (1932).
- 9) Vgl. z.B. R.G. Hewlett, O.E. Anderson, Jr., The New World 1939/1946, Vol. I A History of the United States Atomic Energy Commission, The Pennsylvania State University Press, University Park, Pennsylvania 1962.
- 10) C. Fréjacques, R. Galley, 3. United Nations Conf. Peacef. Uses of Atomic Energy, Geneva 1964, Paper Nr. 89.
- 11) M. Mårtensson, IAEA Symp. on Economics of Nuclear Fuels, Gottwaldov, CSSR, 27-31 Mai 1968.
- 12) K. Beyerle, W. Groth, P. Harteck, H. Jensen, Beihefte zu "Angew. Chemie" u. "Chemie Ing. Technik", Nr. 59, Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr. (1950).
- 13) J.W. Beams, A.C. Hagg, E.V. Murphree, U.S.A.E.C. Rep. TID-5230 (1951) Declass. 29.10.1959.

- 14) J. Shacter, E. Von Halle, R.L. Hoglund, Diffusion Separation Methods, Encycl. Chemic. Technol. Vol. 7, S. 164, John Wiley & Sons Inc. (1965).
- 15) M. Bogaardt, F.H. Theyse, Some considerations regarding the design and the operation of an Ultra-Centrifuge Enrichment Facility, Sympos. on the "Problems Bearing on the Isotope Separation of Uranium", Turin, 1-2 Oktober 1968.
- 16) E.W. Becker, W. Bier, R. Schütte, Principles and Economic Aspects of the Separation Nozzle Process, Sympos. on the "Problems Bearing on the Isotope Separation of Uranium", Turin, 1-2 Oktober 1968. KFK Bericht 853, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1968.
- 17) E.W. Becker, G. Frey, R. Schütte, D. Seidel, Atomwirtschaft, 13, 359 (1968). Siehe auch: Operation of a 10-Stage Separation Nozzle Pilot-Plant, Sympos. on the "Problems Bearing on the Isotope Separation of Uranium", Turin, 1-2 Oktober 1968. KFK Bericht 854, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1968.