

KfK 3336
Mai 1982

Das Trenndüsenverfahren zur Anreicherung des leichten Uranisotops

Beispiel einer technischen Entwicklung

E. W. Becker
Institut für Kernverfahrenstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 3336

DAS TRENNDÜSENVERFAHREN ZUR ANREICHERUNG DES LEICHTEN URANISOTOPS,
BEISPIEL EINER TECHNISCHEN ENTWICKLUNG

E.W. Becker

Beitrag zur Denkschrift der Deutschen Forschungsgemeinschaft:
"Forschung in der Bundesrepublik Deutschland"

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Mit freundlicher Genehmigung der
Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

Druck und Vertrieb:
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Als Beitrag zu einer Denkschrift der Deutschen Forschungsgemeinschaft wird die Entwicklungsgeschichte des Trenndüsenverfahrens zur Anreicherung des leichten Uranisotops beschrieben. Unmittelbarer Anlaß der Arbeiten war ein bei gaskinetischen Grundlagenuntersuchungen beobachteter Effekt. Die Entwicklung bis zur technischen Reife erstreckte sich über einen Zeitraum von mehr als 25 Jahren. Die Durchführung des Projekts im Kernforschungszentrum Karlsruhe erlaubte einen angemessenen finanziellen und technischen Rahmen, wobei die unbefristete Anstellung von leitenden Mitarbeitern für die Kontinuität der Arbeiten von wesentlicher Bedeutung war. Die Verbindung des Instituts mit der Universität und die dadurch gegebene Gelegenheit zur Durchführung von Doktorarbeiten brachte andererseits einen ständigen Zustrom junger hochqualifizierter Wissenschaftler und Ingenieure, aus dem der Nachwuchsbedarf des Instituts optimal gedeckt werden konnte. Obwohl das Zentrum vielfältige Möglichkeiten zur internen technischen Zusammenarbeit bot, wurden wichtige Entwicklungen gemeinsam mit Industriefirmen durchgeführt, die über Erfahrungen auf verwandten Gebieten verfügten. Dadurch wurde nicht nur ein ständiger know-how-Zufluß erreicht, sondern auch die spätere groß-rechnische Anwendbarkeit der gemeinsam erzielten Ergebnisse sichergestellt.

The Separation Nozzle Method for Enrichment of the Light Uranium Isotope.
Example of a Technical Development.

Abstract

The history of the development of the separation nozzle method for enrichment of the light uranium isotope is described as a contribution to a memorandum published by Deutsche Forschungsgemeinschaft. The work was triggered off by an effect which had been observed in fundamental studies on gas kinetics. Development up to the technical maturity covered a period of more than 25 years. The implementation of the project at the Karlsruhe Nuclear Research Center provided an adequate financial and technical framework, the employment of senior staff without limitations in time being of major importance for the continuity of work. The links established between the Institute and the University and the resulting opportunity of having doctoral theses written, on the other hand, gave rise to a permanent flow of young, highly qualified scientists and engineers. Thus the Institut's requirements for junior staff could be satisfied in an optimum way. Although the Center offered a variety of possibilities of internal technical cooperation, important developments were performed jointly with industrial firms experienced in related fields. By this, not only a steady flow of know-how had been accumulated but also the large-scale applicability was ensured at a later date of results jointly obtained.

Einleitung

Die meisten Kernkraftwerke arbeiten mit Uran, dessen Gehalt an leichtem Isotop ^{235}U künstlich erhöht ist. Die Uranisotopentrennung spielt daher in der Kerntechnik eine bedeutende Rolle. Für diese Aufgabe stehen in den U.S.A., der UdSSR und Frankreich große z.T. schon seit mehreren Jahrzehnten betriebene Gasdiffusionsanlagen zur Verfügung, die die unterschiedliche Wanderungsgeschwindigkeit verschieden schwerer Molekeln durch poröse Membranen ausnutzen. Von England, Holland und der Bundesrepublik Deutschland wurden in den letzten 10 Jahren mehrere Anlagen gebaut, die mit Gasultrazentrifugen arbeiten.

Eine dritte Möglichkeit zur großtechnischen Urananreicherung bietet neuerdings das Trenndüsenverfahren, das auf der Zentrifugalkraft in einem gekrümmten Gasstrahl beruht. Es wurde vom Grundkonzept bis zur technischen Reife ausschließlich in der Bundesrepublik Deutschland entwickelt. Seine erste Anwendung findet es in Brasilien. Die Bereitstellung des Trenndüsenverfahrens war eine wesentliche Voraussetzung für den Abschluß der umfassenden Vereinbarung zwischen Brasilien und der Bundesrepublik auf dem Gebiet der friedlichen Nutzung der Kernenergie.

Im folgenden wird die Entwicklung des Trenndüsenverfahrens unter Betonung der für die Denkschrift der DFG wichtig erscheinenden Gesichtspunkte beschrieben.

Vorarbeiten in Marburg

Ausgangspunkt des Trenndüsenverfahrens war eine Zufallsbeobachtung im Zusammenhang mit Grundlagenuntersuchungen über den Einfluß der Quantenstatistik auf den gaskinetischen Wirkungsquerschnitt / 1, 2/. Bei der für diese Arbeiten im Physikalischen Institut der Universität Marburg mit Unterstützung der DFG durchgeführten Entwicklung eines Verfahrens zur Erzeugung intensiver Wasserstoff-Molekularstrahlen mit Überschalldüsen /3/ wurde 1954 beim Auswechseln zweier H₂-Druckflaschen eine reproduzierbare Veränderung der Intensitätsangabe des Molekularstrahldetektors beobachtet. Eine Analyse der Flascheninhalte zeigte, daß der zur höheren Intensitätsangabe führende Wasserstoff geringfügig verunreinigt war.

Da die Größe des Effektes auf eine starke Anreicherung der Verunreinigung im Molekularstrahl hindeutete, wurden, neben den geplanten Versuchen mit reinstem Wasserstoff, Untersuchungen über den Einfluß schwerer Zusatzgase auf die scheinbare Intensität von Wasserstoff-Molekularstrahlen durchgeführt. Es zeigte sich, daß ein wesentlicher Teil der vermuteten Trennung bereits im Raum zwischen der Düse und der ersten Abschälblende auftrat. Aus weiteren Experimenten ging hervor, daß die Kombination von Düse und Abschälblende ein praktisch brauchbares Element zur Gas- und Isotopentrennung ist /4/.

Frühere Erfahrungen auf dem Gebiet der Isotopentrennung /5, 6/ führten zu der Erkenntnis, daß die als "Trenndüse" bezeichnete Anordnung Vorteile vor allem bei der Anreicherung von ²³⁵U versprach. Ein Teil der Arbeitsgruppe konzentrierte sich daher auf diese wirtschaftlich besonders interessante, technisch aber auch besonders schwierige Aufgabe.

Die technischen Probleme bei der Uranisotopentrennung beruhen überwiegend darauf, daß die einzige Uranverbindung mit genügend hohem Dampfdruck das chemisch sehr aktive Uranhexafluorid (UF_6) ist. Da UF_6 -feste Kompressoren zunächst nicht zur Verfügung standen, wurde unter Mitwirkung der Fa. Leybold, Köln, eine mit Kühlfallen arbeitende Laborapparatur aufgebaut (Abb.1). Die ersten Isotopenhäufigkeitsbestimmungen wurden mit einem umgebauten Atlas Massenspektrometer durchgeführt, das der Direktor des M.P.I. für Kohlenforschung, Prof. K. Ziegler, zur Verfügung gestellt hatte. Für den Erfolg der Arbeiten war die Unterstützung durch den Direktor des Physikalischen Instituts der Universität Marburg, Prof. W. Walcher, von wesentlicher Bedeutung.

Die Messungen mit dem umgebauten Massenspektrometer bewiesen die grundsätzliche Anwendbarkeit des Trenndüsenprinzips im Fall des Urans /7/. Sie zeigten aber auch, daß eine systematische Optimierung der Betriebsbedingungen nur mit einem speziellen UF_6 -Gerät möglich sein würde, wie es in den U.S.A. für das Diffusionsverfahren unter Geheimhaltung entwickelt worden war. Eine deutsche Importfirma erklärte sich bereit, ein Gerät der auslaufenden Produktionsserie mit einer Sondergenehmigung der U.S.-Atomenergiekommission zu dem damals ungeheuren Preis von etwa 250 000 DM zu beschaffen, wenn die Bestellung innerhalb einer bestimmten, sehr kurzen Frist erfolgen würde. Das Ministerium für Atomkernenergie hatte zwar entsprechende Mittel in Aussicht gestellt, konnte aber in der geforderten kurzen Zeit keine verbindliche Zusage geben. Mit moralischer Unterstützung des Vorstandsvorsitzenden der Farbwerke Höchst, Prof. K. Winnacker, bestellte daraufhin der Verfasser das Gerät auf eigene Rechnung. Es wurde tatsächlich geliefert und, wie erhofft, vom Ministerium bezahlt.

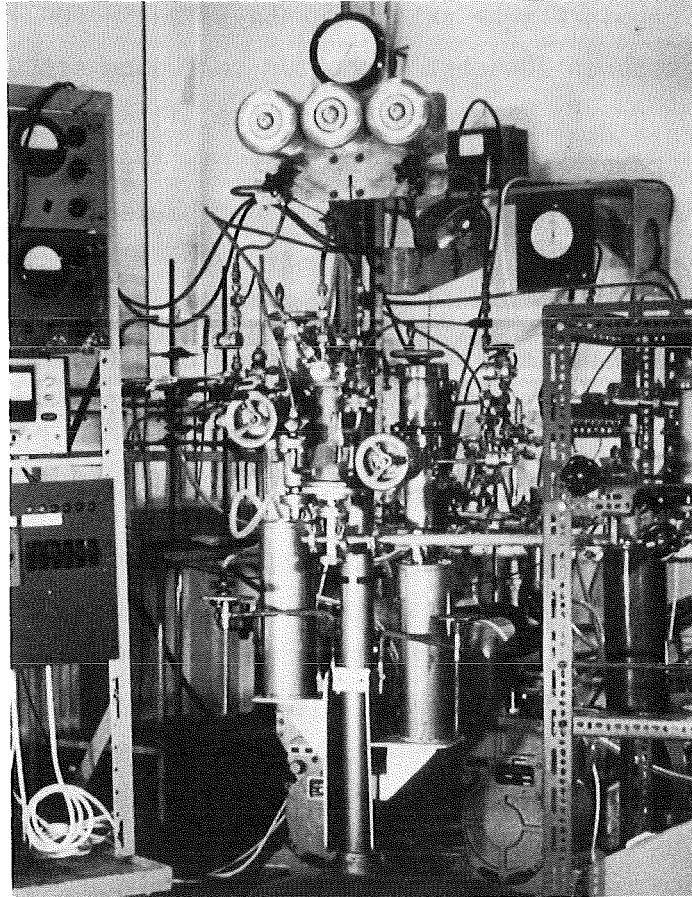


Abb.1: Laborapparatur mit der die erste Anreicherung des leichten Uranisotops nach dem Trenndüsenverfahren durchgeführt wurde (1955).

Noch im selben Jahr wurden die ersten mit diesem Gerät durchgeführten systematischen Meßreihen auf der 2.Genfer Konferenz über die friedliche Nutzung der Atomenergie veröffentlicht /8/. Für die Entwicklung des Trenndüsenverfahrens standen später auch hervorragende deutsche Massenspektrometer zur Verfügung. Die frühe Verfügbarkeit des schon damals ausgereiften amerikanischen Geräts war jedoch für die Entwicklung des Trenndüsenverfahrens von wesentlicher Bedeutung.

Technische Entwicklung in Karlsruhe

Die Berufung des Verfassers zum Leiter des neu gegründeten Instituts für Kernverfahrenstechnik des Kernforschungszentrums und der Universität Karlsruhe brachte 1958 die Möglichkeit, die Trenndüsenarbeiten mit wesentlich größeren Mitteln fortzusetzen.

Nach umfangreichen Voruntersuchungen wurde der technischen Entwicklung das in Abb.2 im Schnitt dargestellte schlitzförmige Trenndüsen-system zugrundegelegt /9/: Ein Gemisch aus UF_6 und einem leichten Zusatzgas (H_2 bzw. He) strömt mit hoher Geschwindigkeit an einer gekrümmten Wand entlang. Am Ende der Umlenkung wird der Gasstrahl mit einem keilförmigen "Abschäler" in eine leichte und eine schwere Fraktion zerlegt, die getrennt abgesaugt werden. Das leichte Zusatzgas verbessert die Trennung der Uranisotope erheblich, was hauptsächlich

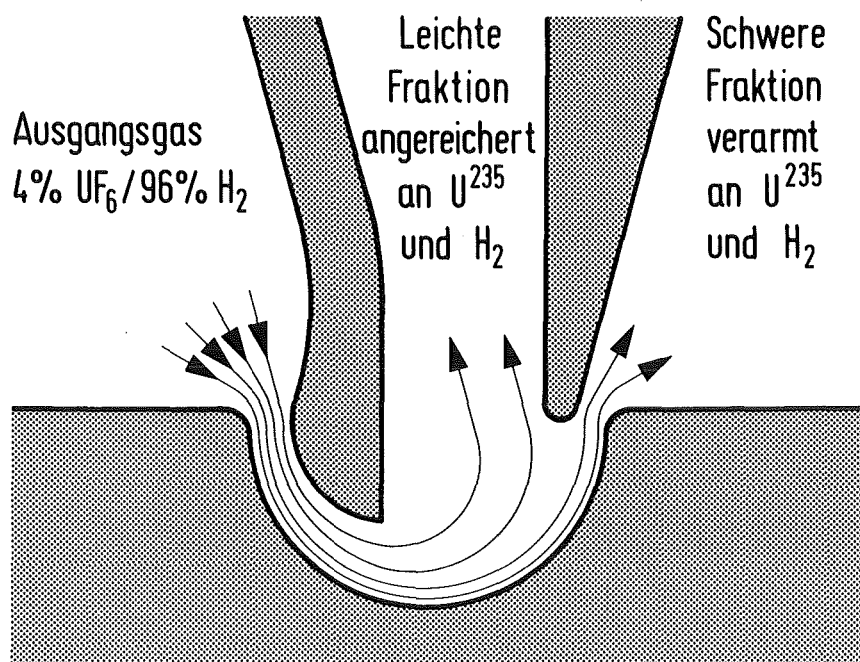


Abb.2: Querschnitt eines schlitzförmigen Trenndüsen-systems.

auf der mit der Verminderung des mittleren Molekulargewichts verbundenen Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit des Gemisches beruht. Um einen möglichst hohen Gasdruck anwenden zu können, werden die charakteristischen Abmessungen des Trenndüsen-systems so klein wie möglich gewählt.

Zahlreiche der in ihrer Ausdehnung senkrecht zur Zeichenebene der Abb.2 nicht beschränkten Trenndüsen-systeme werden, zusammen mit einem Verdichter, in einer Trenndüsen-stufe untergebracht. Zur Erzielung der für einen Leichtwasser-Reaktor erforderlichen ^{235}U -Konzentration von etwa 3% müssen einige hundert solcher Stufen in einer Trennkaskade hintereinandergeschaltet werden.

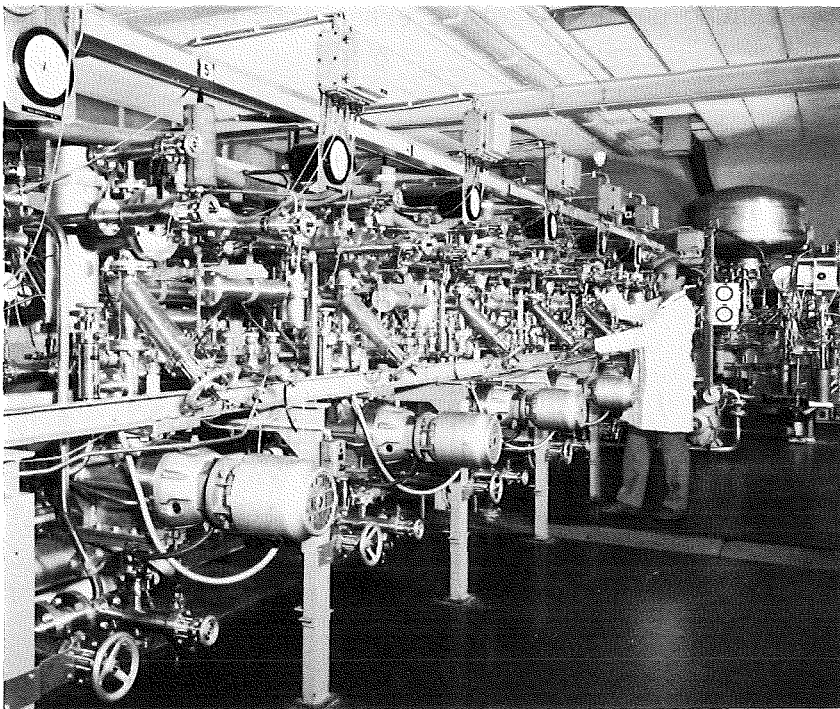


Abb.3: 10-stufige Trenndüsenversuchsanlage (1968)

Die Multiplikation des Trenneffekts und das Verhalten des leichten Zusatzgases in einer Kaskade wurden in einer 10-stufigen Trenndüsen-Versuchsanlage erprobt, bei der der Stufendurchsatz etwa um den Faktor 10 000 kleiner als bei einer technischen Trenndüsenanlage war. Die in Abb.3 dargestellte, von den Firmen W.C. Heraeus und E. Leybold ausgeführte Anlage lieferte auf Anhieb den erwarteten Trennfaktor und zeigte das von der Theorie vorhergesagte stabile Betriebsverhalten /10/.

Daraufhin konnte mit der Planung und dem Bau einer technischen Trenndüsenstufe begonnen werden. Schwierigster Punkt war die Beschaffung des UF_6 -festen Verdichters, dessen Ansaugleistung auf 100 000 m³/h festgelegt worden war. Nach erfolglosen Versuchen in Deutschland

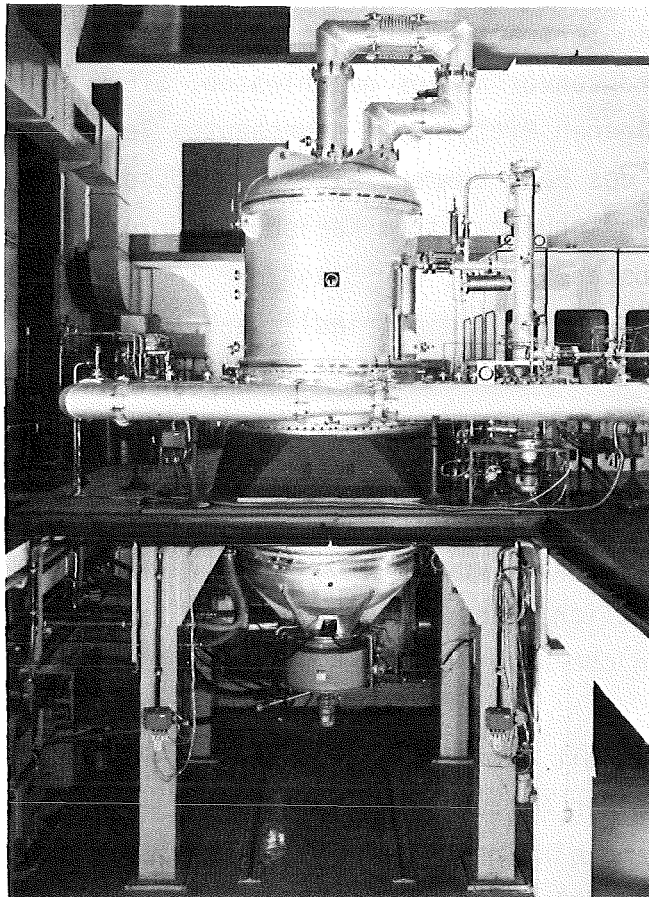


Abb.4: Technische Trenndüsenstufe für die Anreicherung des leichten Uranisotops (1971)

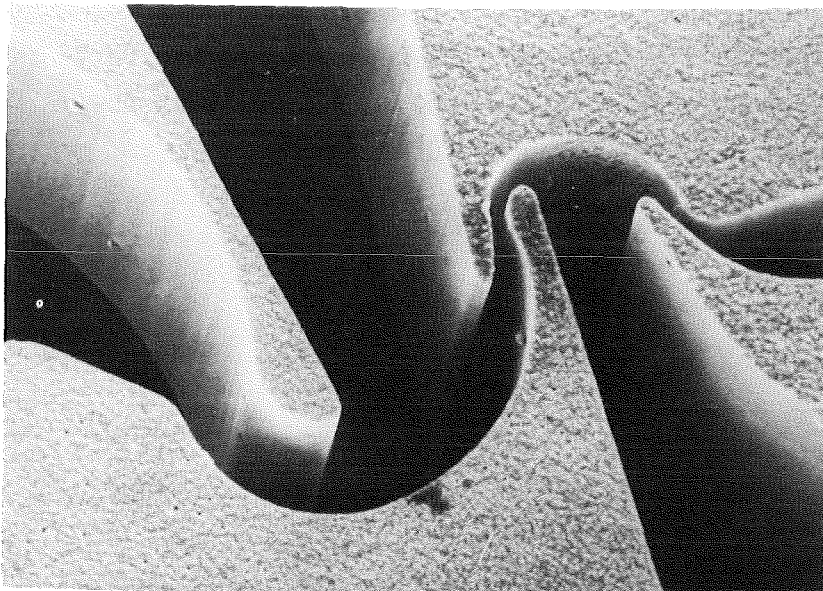
wurde vom Angebot der französischen Firma Hispano-Suiza Gebrauch gemacht, den Verdichter samt Kühler zu entwickeln und für den Aufbau der gesamten Trennstufe die Tätigkeit eines Industriearchitekten zu übernehmen. Die Stufe wurde in der vorgesehenen Zeit fertiggestellt und ohne größere Probleme in Betrieb genommen (Abb.4).

Durch die Zusammenarbeit mit der französischen Firma, die aufgrund ihrer Mitwirkung am Bau der Diffusionsanlage in Pierrelatte über einschlägige Erfahrungen verfügte, konnte die Technik des Trenndüsenverfahrens in relativ kurzer Zeit soweit vorangetrieben werden, daß ernsthaft an eine praktische Anwendung zu denken war. Nach erfolglosen Verhandlungen mit anderen Industriegruppen wurde vom Kernforschungszentrum Karlsruhe im März 1970 mit der STEAG-Aktiengesellschaft, Essen, ein Vertrag über die Weiterentwicklung und kommerzielle Nutzung des Trenndüsenverfahrens geschlossen. STEAG führt seitdem mit beträchtlichen eigenen Mitteln ein sogenanntes Technologieprogramm zur Vorbereitung des Baus kommerzieller Trenndüsenanlagen durch, während das Kernforschungszentrum Karlsruhe für die Weiterentwicklung des Verfahrens zuständig ist. Der Stand der Technik wurde 1971 auf der 4.Genfer Konferenz über die friedliche Nutzung der Atomenergie erstmals gemeinsam dargestellt /11/.

Ein Hauptziel der Weiterentwicklung in Karlsruhe war die Absenkung der spezifischen Investierungskosten durch Steigerung des optimalen Gasdrucks. In der Praxis bedeutete das die Entwicklung von Verfahren für die wirtschaftliche Massenproduktion von Trenndüsenanlagen mit möglichst kleinen charakteristischen Abmessungen.

Bei einer zusammen mit der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB), München, entwickelten Methode werden Metallteile mit Formdiamanten bearbeitet, während eine gemeinsam mit der Firma Siemens-AG, München, durchgeführte Entwicklung auf der Stapelung photogeätzter Metallfolien beruht /12/. Mit beiden Verfahren lassen sich heute Trenndüsenanlagen mit dem in Abb.2 gezeigten Querschnitt bei einem Radius der Umlenkrolle von 50 μm wirtschaftlich herstellen.

Neuerdings wurde vom Kernforschungszentrum Karlsruhe die Entwicklung eines Verfahrens eingeleitet, bei dem ein lithographisch hergestelltes Kunststoffnegativ galvanisch mit Nickel ausgefüllt wird ("LIGA") /13/. Die Arbeiten werden gemeinsam mit der Siemens-AG, München, über Interatom, und der Fraunhofer-Gesellschaft (IFT), München, durchgeführt. Abb.5 zeigt eine Nickelfolie mit der Struktur eines Doppelumlenktrenndüsen-systems, wie es für kommerzielle Trenndüsenanlagen vorgesehen ist. Die mittleren Radien der Umlenkrollen betragen 20 bzw. 10 μm . Der optimale Einlaßdruck liegt bei 1,5 bar.



30 μm

Abb.5: Durch Kombination von Röntgen-Lithographie und Mikrogalvanik hergestelltes Trenndüsen-system mit zweifacher Strahlumlenkung. Die mittleren Radien der Umlenkrollen betragen 20 bzw. 10 μm (1981).

Das Kunststoffnegativ wurde mit Synchrotronstrahlung des Speicherrings DORIS, Hamburg, unter Verwendung einer mit dem Elektronensynchrotron

Bonn II hergestellten Maske erzeugt. Es wird angestrebt, die mit dem LIGA-Verfahren gewonnene Metallstruktur lediglich als Werkzeug zur Erzeugung weiterer Kunststoffnegative durch Abformen zu verwenden /14/. Auf diese Weise würde die Massenproduktion der Trennelemente von den relativ kostspieligen Strahlenquellen weitgehend unabhängig werden.

Der zunächst verhältnismäßig hohe spezifische Energieverbrauch des Trenndüsenverfahrens konnte durch systematische Optimierung der Form des Trenndüsen systems und der Betriebsbedingungen auf einen Wert abgesenkt werden, der zwischen dem der älteren und neueren Diffusionsanlagen liegt /14/. Es ist damit zu rechnen, daß die Fortsetzung der Optimierungsarbeiten zu einer erheblichen weiteren Absenkung des spezifischen Energieverbrauchs führt.

Anwendung in Brasilien

Im Jahre 1975 hat Brasilien das Trenndüsenverfahren als Grundlage für die Anreicherung seiner Uranvorräte gewählt. Da mit einem größeren Bedarf an Kernbrennstoff erst gegen Ende dieses Jahrzehnts zu rechnen ist, wurde beschlossen, in Brasilien zunächst eine Trenndüsen-Demonstrationsanlage zu bauen und das Verfahren parallel dazu gemeinsam weiterzuentwickeln. Auf deutscher Seite ist an den Arbeiten, neben dem Kernforschungszentrum Karlsruhe und der STEAG, die Fa. Interatom, Bensberg, beteiligt. Der brasilianische Partner ist NUCLEBRAS /15/.

Seit 1979 ist in Brasilien eine aus 24 Trenndüsenstufen bestehende sogenannte Vorlaufkaskade im Bau (Abb.6). Der Ausbau zur Demonstrationsanlage erfolgt in zwei Schritten, wobei vorgesehen ist, daß ab 1986 ein Kernkraftwerk und ab 1988 drei Kernkraftwerke mit Leistungen von je 1000 MWe fortlaufend mit Kernbrennstoff versorgt werden können.

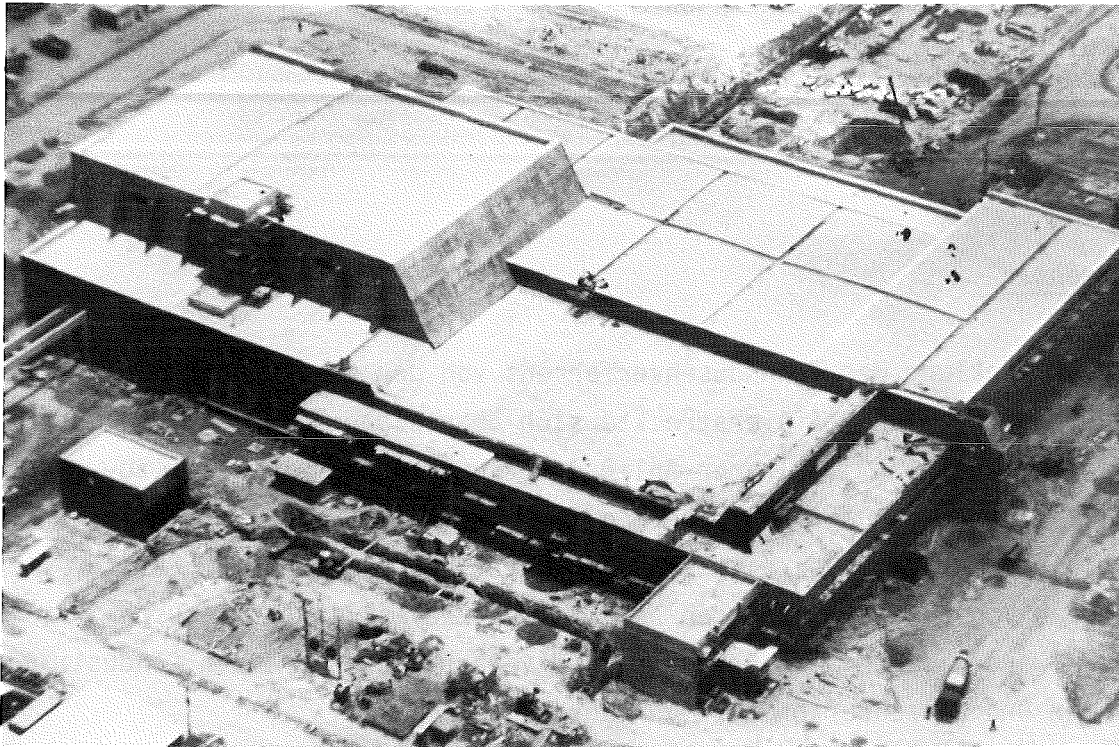


Abb.6: Zentralgebäude der Trenndüsendemonstrationsanlage in Resende, Brasilien (1982).

Parallel zu den Arbeiten für die Demonstrationsanlage in Brasilien werden in Karlsruhe zwei größere Trenndüsenstufen für den Bau kommerzieller Anlagen erprobt, die eine wirtschaftliche Urananreicherung mit relativ niedrigem Kapitaleinsatz ermöglichen /14/.

Die Anwendung des Trenndüsenverfahrens in Brasilien wird aufgrund eines Regierungsabkommens von der Internationalen Atomenergiebehörde in Wien überwacht. Die Aufgabe dieser Behörde wird dadurch erleichtert, daß die Entwicklung und Anwendung des Trenndüsenverfahrens keinen Geheimhaltungsbeschränkungen unterliegt. Es wird damit gerechnet, daß das Trenndüsenverfahren langfristig einen erheblichen Beitrag zur Versorgung der Welt mit Kernbrennstoff leisten wird.

Kommentar

Die Entwicklung des Trenndüsenverfahrens von den ersten Anfängen bis zur industriellen Reife erstreckte sich über einen Zeitraum von mehr als 25 Jahren. Unmittelbarer Anlaß der Arbeiten war eine sich zufällig abzeichnende technische Möglichkeit. Daß für die Entwicklung ausreichende Mittel bereitgestellt wurden, obwohl in den U.S.A. für den Bau von Diffusionsanlagen bereits mehrere Milliarden \$ ausgegeben worden waren, ist der Weitsicht verschiedener Gremien, Industriefirmen und Einzelpersonen zu verdanken.

Bei Berufung des Verfassers nach Karlsruhe im Jahre 1958 wurden der gesamten, mit dem Trenndüsenprojekt befaßten, Gruppe angemessene Arbeitsmöglichkeiten im Kernforschungszentrum bzw. an der Universität Karlsruhe geboten. Die umfangreichen, vor allem vom Atomministerium, der DFG und der DEGUSSA finanzierten Spezialeinrichtungen konnten von Marburg nach Karlsruhe überführt und dort nach relativ kurzer Zeit in einem neuen Institut großzügig wieder aufgebaut werden.

Die Verbindung des Instituts mit der Universität und die dadurch gegebene Möglichkeit der Durchführung von Doktorarbeiten brachte einen ständigen Zustrom junger hochqualifizierter Wissenschaftler

und Ingenieure. Die Verbindung mit dem Kernforschungszentrum gestattete es andererseits, den leitenden Mitarbeitern des Projektes zeitlich unbefristete Anstellungen zu bieten, die eine natürliche Voraussetzung für langfristiges Engagement sind.

Obwohl das Zentrum vielfältige Möglichkeiten zur internen technischen Zusammenarbeit bot, wurden wichtige Entwicklungen gemeinsam mit Industriefirmen durchgeführt, die über Erfahrungen auf verwandten Gebieten verfügten. Dadurch wurde nicht nur ein ständiger know-how-Zufluß erreicht, sondern auch die spätere großtechnische Anwendbarkeit der gemeinsam erzielten Ergebnisse sichergestellt. Die Entwicklung wurde stets voll vom Kernforschungszentrum bezahlt. Dadurch wurde gewährleistet, daß das Kernforschungszentrum uneingeschränkt über die Entwicklungsergebnisse verfügen konnte.

Zwei Jahre vor Abschluß der deutsch-brasilianischen Vereinbarungen empfahl der Aufsichtsrat des Kernforschungszentrums Karlsruhe,

"die Trenndüsenarbeiten verstärkt mit dem Ziel der Bereitstellung einer wirtschaftlichen, exportfähigen Anreicherungstechnologie fortzusetzen und einen nächsten Schritt in der technischen Erprobung zu tun."

Nachdem sich Brasilien 1975 entschloß, das Trenndüsenverfahren anstelle des aus politischen Gründen nicht verfügbaren Zentrifugenverfahrens für die Absicherung des Brennstoffkreislaufs der von der Bundesrepublik zu liefernden Kernkraftwerke zu akzeptieren, wurde die Weiterentwicklung und technische Anwendung des Trenndüsenverfahrens zu einer Aufgabe von nationaler und internationaler Bedeutung.

Literatur

- /1/ E.W. Becker, O. Stehl, "Ein Zähigkeitsunterschied von Ortho- und Para-Wasserstoff bei tiefen Temperaturen", Z. Physik 133, S. 615-628 (1952).
- /2/ E.W. Becker, R. Misenta, F. Schmeissner, "Zähigkeit von gasförmigem ^3He und ^4He zwischen 1,3°K und 4,2°K", Z. Physik 137, S. 126-136 (1954).
- /3/ E.W. Becker, K. Bier, "Die Erzeugung eines intensiven, teilweise monochromatisierten Wasserstoff-Molekularstrahles mit einer Laval-Düse", Z. Naturforschung 9a, S. 975-986 (1954).
- /4/ E.W. Becker, K. Bier, H. Burghoff, "Die Trenndüse, Ein neues Element zur Gas- und Isotopentrennung", Z. Naturforschung 10a, S. 565-572 (1955).
E.W. Becker, W. Beyrich, K. Bier, H. Burghoff, F. Zigan, "Das Trenndüsenverfahren. II. Die physikalischen Grundlagen des Trenneffektes und die spezifischen Aufwandsgrößen des Verfahrens", Z. Naturforschung 12a, S. 609-621 (1957).
- /5/ K. Clusius, E.W. Becker, "Anreicherung von ^{15}N nach dem chemischen Austauschverfahren", Z. phys. Chemie 193, S. 64-76 (1943).
- /6/ E.W. Becker, K. Bier, S. Scholz, W. Vogell, "Erfahrungen mit einer chemischen Austauschanlage zur Anreicherung von ^{13}C ", Z. Naturforschung 7a, S. 664-668 (1952).
- /7/ E.W. Becker, R. Schütte, "Entmischung der Uranisotope mit der Trenndüse", Z. Naturforschung 11a, S. 679-680 (1956).

- /8/ E.W. Becker, K. Bier, H. Burghoff, O. Hagen, P. Lohse, R. Schütte, P. Turowski, F. Zigan, "Separation of the Uranium Isotopes by the Nozzle Process", Proc. 2. United Nations Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 4, S.455-457 (1958).
- /9/ E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel, "Separation of the Isotopes of Uranium by the Separation Nozzle Process", Angew. Chemie, intern. ed., 6, S. 507-518 (1967).
- /10/ E.W. Becker, G. Frey, R. Schütte, D. Seidel, "Entmischung der Uranisotope in einer zehnstufigen Trenndüsen-Versuchsanlage", Atomwirtschaft 8, S. 359-362 (1968).
- /11/ E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, G. Eisenbeiss, G. Frey, H. Geppert, P. Happe, G. Heeschen, R. Lücke, D. Plesch, K. Schubert, R. Schütte, D. Seidel, U. Sieber, H. Völcker, F. Weis, "The Separation Nozzle Process for Enrichment of U-235", 4. United Nations Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Genf 6.-16.9.1971, A/Conf. 49/P.383.
- /12/ E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte, D. Seidel, "Uranium Enrichment by the Separation Nozzle Process", Naturwiss. 63, S. 407-411 (1976).
- /13/ 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, 1-2, S. 50-57 (1981).

- /14/ 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", KfK-Bericht 3310, März 1982.
- /15/ E.W. Becker, P. Nogueira Batista, H. Völcker, "Uranium Enrichment by the Separation Nozzle Method within the Framework of German/Brazilian Cooperation", Nuclear Technology 52, S. 105-114 (1981).