

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

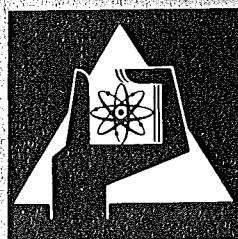
März 1973

KFK 1777

Institut für Kernverfahrenstechnik

**Galvanoplastische Herstellung von Trenndüsen
zur Anreicherung von Uran-235**

P. Happe, F. Weis



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1777

Institut für Kernverfahrenstechnik

GALVANOPLASTISCHE HERSTELLUNG VON TRENNDÜSENELEMENTEN
ZUR ANREICHERUNG VON URAN-235

von

P. Happe +)

F. Weis

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

+) Dissertation; Universität Karlsruhe (T.H.) Januar 1973

Zusammenfassung:

Zur Anreicherung von Uran-235 nach dem Trenndüsenverfahren werden schlitzförmige Trenndüsenelemente benötigt, deren engste Schlitzweiten bei 20 μm liegen. Es wird eine Methode zur Serienfertigung solcher Trenndüsenelemente beschrieben, die aus einer Kombination von Galvanoplastik und spanabhender Diamantbearbeitung besteht. Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der Fertigungsmethode wurde eine Musterreihe von Trenndüsenelementen hergestellt und verfahrensmäßig erprobt. Der hierbei gemessene maximale Elementareffekt der Trennung der Uranisotope betrug 95 % des Wertes eines toleranzfreien Laborelementes. Hieraus wird für die Musterreihe auf eine erzielte Toleranzbreite der Schlitzweiten von etwa $\pm 4 \mu\text{m}$ geschlossen. Bei der abschließenden Abschätzung des zeitlichen und finanziellen Aufwandes für die Serienfertigung wird die optimale Größe einer Fertigungseinheit festgelegt. Ihr Jahresausstoß beträgt etwa 150 Kilometer effektiver Schlitzlänge, womit sich jährlich eine Trennarbeitskapazität von 115 Tonnen Uran pro Jahr installieren lassen.

Electroforming method for production of separation nozzle elements for the enrichment of uranium-235

Abstract:

The separation nozzle process for the enrichment of uranium-235 requires slot-shaped separation nozzle elements with slot-widths of about 20 μm . This paper describes a method for the mass-production of such elements by a combination of electroforming and milling with diamond tools. For demonstration of the efficiency of this method a sample series of nozzle elements was produced and examined under process conditions. The highest elementary effect of separation of the uranium isotopes obtained with the sample series amounted to 95 % of the value reached in a dimensionally exact Laboratory nozzle element. This allows the conclusion that the variation of the slot-widths in the sample series was about $\pm 4 \mu\text{m}$. Finally an estimate of the necessary production time and costs for the mass-production of the separation nozzle elements leads to an optimum size of the manufacturing unit. Its production capacity of a year amounts about 150 km of effective slot-length, which allows yearly to install a separation work capacity of 115 tons uranium per year.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Zusammenfassung	1
2. Grundsätzlicher Aufbau des technischen Trennelementes und vorgesehene Betriebsbedingungen	2
3. Optimales UF_6 -Abschälverhältnis	4
4. Fertigungsprinzip	8
4.1 Einheit aus Düsen- und Abschälerblech	8
4.2 Gasführungsrohr mit eingearbeiteter Umlenkkrille und aufgesetzten Justiernocken	10
5. Herstellung und Erprobung der Fertigungsmuster	13
6. Abschätzung der erzielten Toleranzen	19
7. Ermittlung der voraussichtlichen Kosten bei der Serienfertigung	25
7.1 Fertigungsablauf	25
7.2 Zeittakt der Fertigungsstraße und daraus resultierende Kapazität der Fertigungseinheit	29
7.3 Zusammenstellung der Einzelkosten und Endkalkulation	30
8. Diskussion	31

1. Einleitung und Zusammenfassung

Das Trenndüsenverfahren zur Anreicherung von Uran-235¹⁾ beruht auf der teilweisen räumlichen Entmischung verschieden schwerer Komponenten einer auf gekrümmten Bahnen laufenden schnellen Gasströmung. Bei diesem Verfahren ist der optimale Betriebsdruck umgekehrt proportional zu den kritischen Abmessungen des schlitzförmigen Düsensystems¹⁾²⁾. Aus ökonomischen Gründen strebt man einen möglichst hohen Betriebsdruck an und ist deshalb bemüht, möglichst kleine Trennelementgeometrien herzustellen. Für eine wirtschaftlich arbeitende, technische Anlage werden Trennelemente mit engsten Schlitzweiten von nur ca. 0,02 mm und Schlitzlängen von einigen hundert Kilometern benötigt²⁾. Da Schwankungen der Schlitzweiten zu erheblichen Trennleistungsverlusten führen können³⁾, müssen bei der technischen Herstellung der Trenndüsenelemente Toleranzen im μm -Bereich eingehalten werden.

Zusammen mit der Industrie wurden systematische Untersuchungen über grundsätzliche Möglichkeiten zur Lösung dieser Aufgabe durchgeführt. Als ein gangbarer Weg erwies sich die Kombination von galvanoplastischen Methoden mit spanabhebender Diamantbearbeitung⁴⁾. Nach Abschluß der mit der Industrie auf diesem Gebiet durchgeführten Vorversuche wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein für die Serie geeignetes Fertigungsprinzip entwickelt und erprobt.

-
1. E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel, *Angew. Chemie, Intern. Edit. in English*, 6, 507 (1967). In dieser Arbeit sind die früheren Veröffentlichungen über das Trenndüsenverfahren zitiert.
 2. E.W. Becker, W. Bier, G. Frey, R. Schütte, *Z. Atomwirtschaft* 14, 249 (1969)
 3. W. Bier, F. Weis, *Kerntechnik* 14, 105 (1972)

4) Diese spezielle Entwicklung wurde gemeinsam mit der Firma Klaus D. Weber, Pforzheim, durchgeführt. Wir danken Herrn Klaus D. Weber und seinen Mitarbeitern für ihre Mitwirkung bei der Lösung des Problems.

Nach der Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus des technischen Trennelementes und der Angabe der vorgesehenen Betriebsbedingungen wird im folgenden zunächst die für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens optimale Weite des Abschälerschlitzes aus den zu erwartenden Maßschwankungen abgeleitet. Es folgt eine detaillierte Beschreibung des Fertigungsprinzips. Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Fertigungsprinzips wurden 12 Fertigungsmuster hergestellt und einzeln sowie gemeinsam hinsichtlich ihrer Trennleistung bei der Entmischung der Uranisotope experimentell untersucht. Durch Vergleich mit den bei Laborelementen gemessenen Werten lassen sich die erzielten Fertigungstoleranzen abschätzen. Eine Ermittlung der voraussichtlichen Kosten bei der Serienfertigung zeigt, daß das Verfahren als wirtschaftliche Methode für die großtechnische Herstellung von Trenndüsenelementen in Frage kommt.

2. Grundsätzlicher Aufbau des technischen Trennelementes und vorgesehene Betriebsbedingungen

Abb. 1 zeigt einen Schnitt durch das für die Fertigung vorgesehene schlitzförmige Trenndüsenensystem²⁾. Es besteht aus der halbrunden Umlenkrolle mit dem Radius $R = 0,1$ mm, in die zwei Bleche hineinragen. Das sog. Düsenblech mit seinem Viertelrundbogen bildet mit der Umlenkrolle einen sich öffnenden, gekrümmten Kanal mit einer engsten Schlitzweite a , der sog. Düsenweite, von $0,027$ mm. Das gegenüberliegende Abschälerblech mit einer Schneidenbreite von nur wenigen tausendstel Millimetern bildet mit der Umlenkrolle einen Spalt der Weite f , der sog. Abschälerweite, von etwa $0,015$ mm.

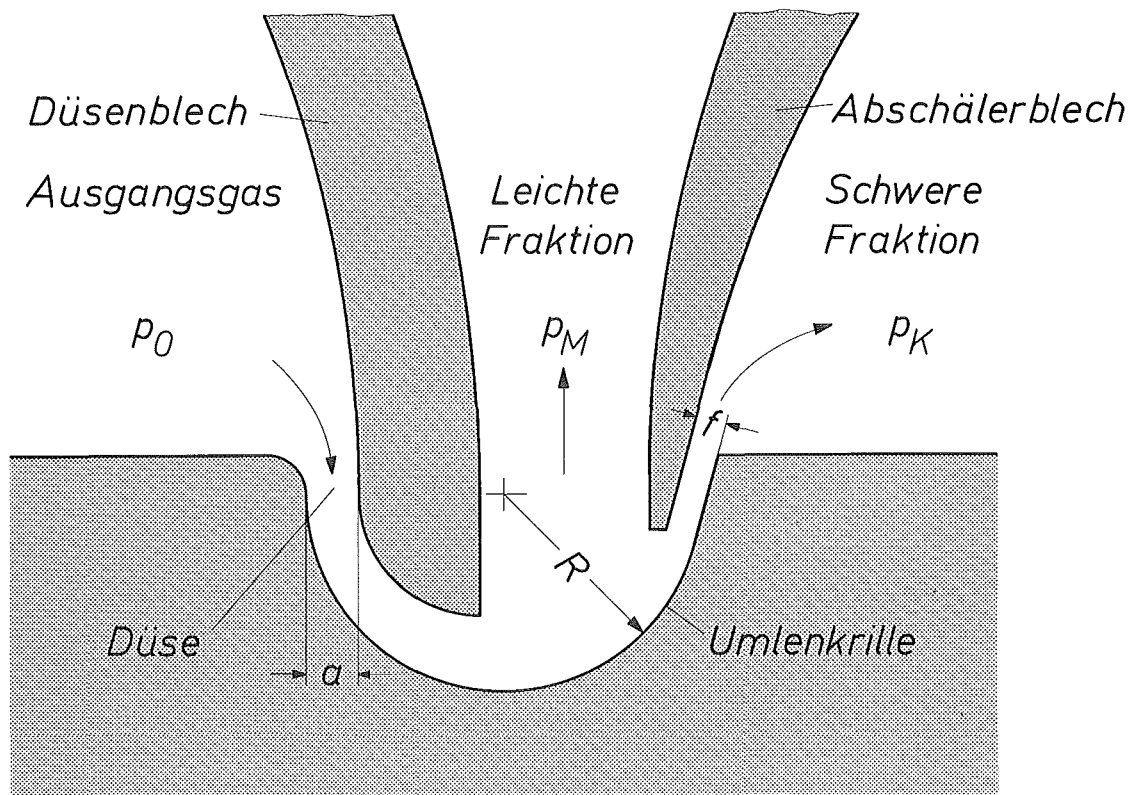


Abb. 1 Schnitt durch das schlitzförmige Trenndüsen-system

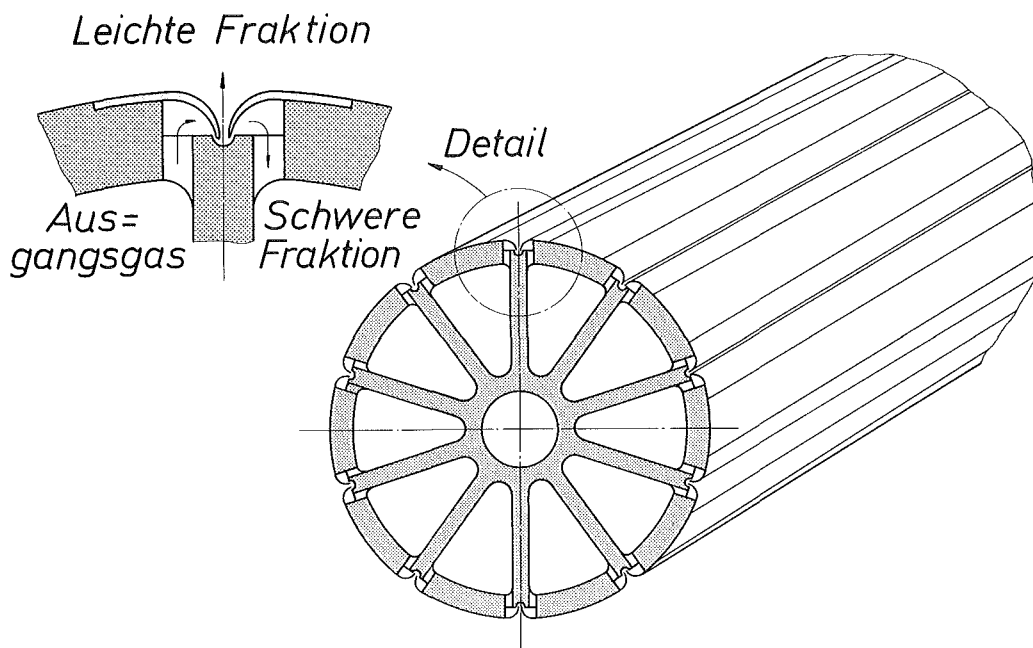


Abb. 2 Anordnung des schlitzförmigen Trenndüsen-systems auf dem Gasführungsrohr

Das aus 5 Mol-% Uranhexafluorid (UF_6) und 95 Mol-% Helium bestehende Ausgangsgas tritt mit dem Düsenvordruck p_0 von etwa 400 Torr in die gekrümmte Düse ein. Der Gasstrom wird durch das Abschälerblech in zwei Fraktionen aufgeteilt, die mit den Drucken $p_K = p_M$ von etwa 100 Torr abgesaugt werden. Infolge des Druckgefälles durchströmt das Gemisch die Düse mit hoher Geschwindigkeit, wobei sich aufgrund von Zentrifugalkräften die schwere Komponente bevorzugt in der Nähe der Umlenk wand ansammelt.

Die Anordnung des schlitzförmigen Trenndüsen systems auf dem Gasführungsrohr zeigt Abb. 2. Jede zweite der 10 Kammern führt das Ausgangsgas, das durch Schlitze den Düsen zuströmt. Während die schwere Fraktion in die restlichen fünf Kammern tritt, wird die leichte Fraktion im Raum um das Rohr gesammelt. Für den Einbau in die Trennelement tanks technischer Trenndüsenstufen sind Rohre dieses Aufbaus in Längen von 1 bis 2 Metern vorgesehen²⁾.

3. Optimales UF_6 - Abschälverhältnis

Um die für Kernreaktoren verwendbaren Uran-235-Konzentrationen zu erreichen, muß der Elementareffekt der Uranisotopentrennung durch Hintereinanderschalten von Trenndüsenstufen in einer Trennkaskade vervielfacht werden. Dabei dürfen sich nur Ströme gleicher Isotopenzusammensetzung vermischen ("Nichtvermischungsbedingung"⁴⁾). Den verschiedenen denkbaren Schaltungen sind über die Nichtvermischungsbedingung bestimmte rationale Werte des UF_6 -Abschälverhältnisses

$$\mathcal{S}_U = \frac{\text{UF}_6\text{-Strom in der leichten Fraktion}}{\text{UF}_6\text{-Strom im Ausgangsgas}}$$

4) K. Cohen, Theory of Isotope Separation as applied to the Large Scale Production of U 235, Mc Graw-Hill New York, 1951

zugeordnet, die grob durch die Wahl der Abschälerweite f und fein durch eine Verschiebung des Druckes p_K gegenüber dem Druck p_M mit einer in der Absaugleitung der schweren Fraktion liegenden Drosselklappe eingestellt werden können.

In einer früheren Arbeit³⁾ wurde gezeigt, daß bei vernachlässigbaren Maßschwankungen des Trenndüsensystems der Wert $\vartheta_U = 0,25$ wirtschaftlich optimal ist, und daß die Trennleistung insbesondere durch Schwankungen der Abschälerweite f stark vermindert wird. Da der Einfluß der Maßschwankungen auf die Trennleistung von ϑ_U abhängt, ist das wirtschaftlich optimale UF_6 -Abschälverhältnis ϑ_{Uopt} eine Funktion der Maßschwankung.

Die Trennleistung δU ist definiert durch⁴⁾

$$\delta U = \frac{L_U}{2} \cdot \epsilon_A^2 \cdot \vartheta_U (1 - \vartheta_U).$$

Darin bedeutet L_U den UF_6 -Durchsatz des Trenndüsensystems und ϵ_A den Elementareffekt der Uranisotopentrennung, der sich aus den Molenbrüchen n_M und n_K des leichten Uranisotopes im UF_6 der leichten und schweren Fraktion zu

$$\epsilon_A = \frac{n_M (1 - n_K)}{n_K (1 - n_M)} - 1$$

ergibt.

Mit der in [3] experimentell bestimmten Abhängigkeit des Elementareffektes ϵ_A und des UF_6 -Abschälverhältnisses ϑ_U von der Abschälerweite f läßt sich bei konstanter Düsenweite, d.h. bei konstantem UF_6 -Durchsatz L_U , die Abhängigkeit der Trennleistung $\delta U \sim \epsilon_A^2 \cdot \vartheta_U \cdot (1 - \vartheta_U)$ von der mittleren Abschälerweite f_m für verschiedene angenommene Maßschwankungen Δf aufgrund von Materialbilanzen berechnen. Abb. 3 zeigt das Ergebnis. In Abb. 4 sind die aus Abb. 3

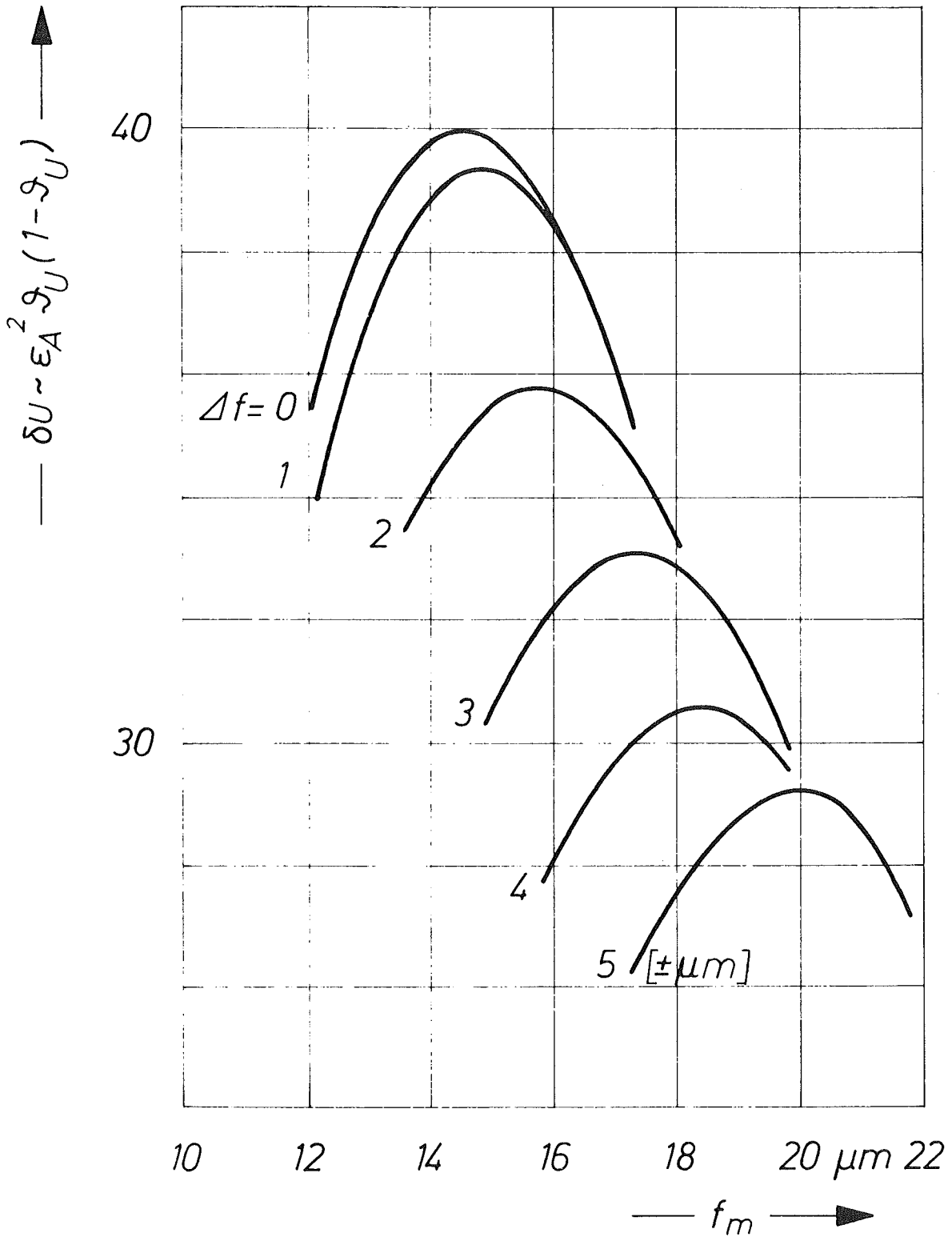


Abb. 3 Die Trennleistung δU in Abhängigkeit von der mittleren Abschälerweite f_m für verschieden angenommene Maßschwankungen Δf

(He/UF₆-Gemisch; 5 Mol-% UF₆; $p_o = 400$ Torr;
 $p_o/p_M = p_o/p_K = 4$)

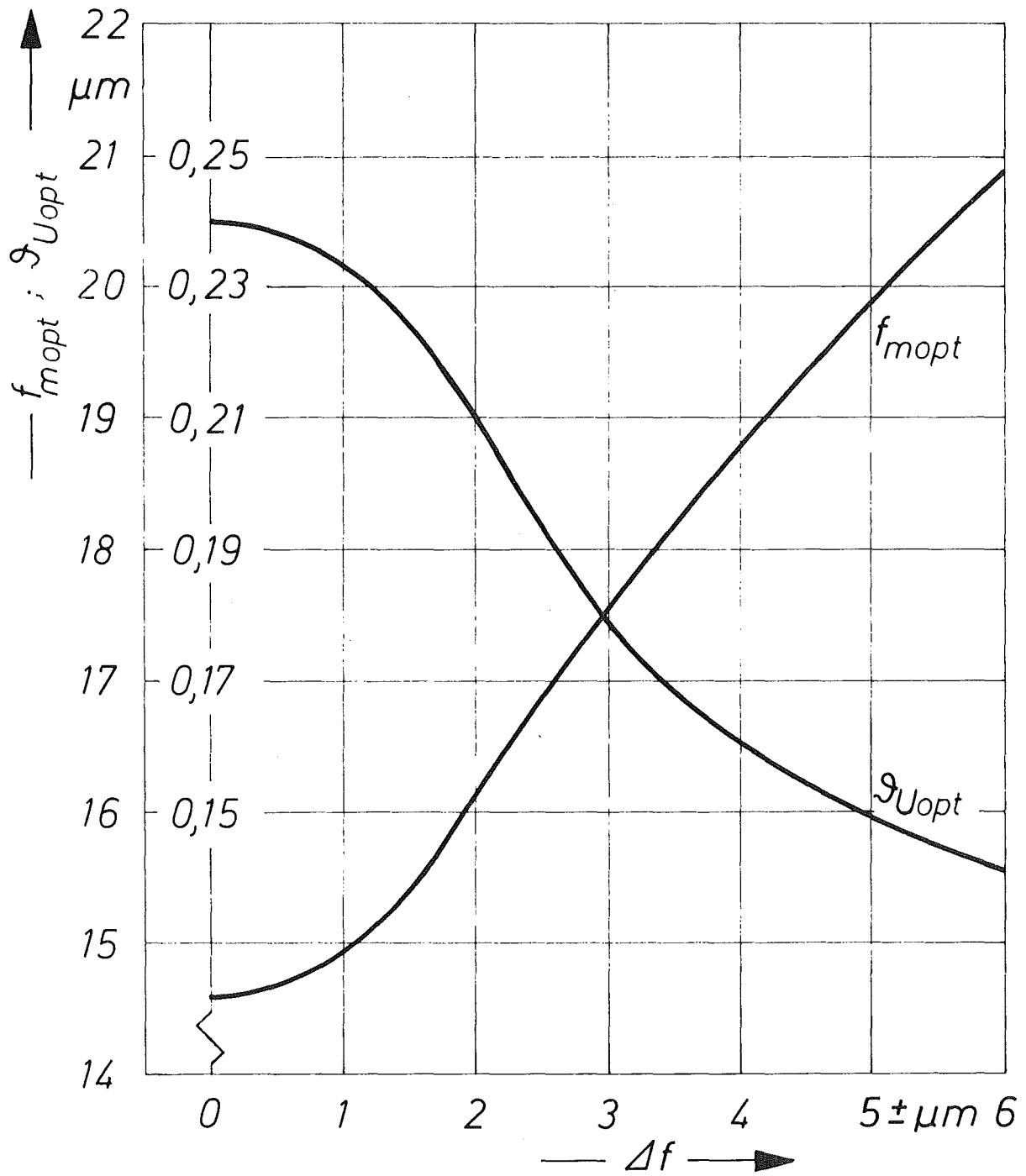


Abb. 4 Die optimale mittlere Abschälerweite f_{mopt} und das zugehörige optimale UF_6 -Abschälverhältnis S_{Uopt} in Abhängigkeit von der Schwankung Δf der Abschälerweite

(He/ UF_6 -Gemisch; 5 Mol-% UF_6 ; $p_o = 400$ Torr;

$p_o/p_M = p_o/p_K = 4$)

entnommenen, zu den Maximalwerten von δU gehörenden Optimalwerte der mittleren Abschälerweite f_{mopt} und der dazugehörigen Optimalwerte des UF_6 -Abschälverhältnisses $\mathfrak{J}_{U\text{opt}}$ in Abhängigkeit von der angenommenen Maßschwankung Δf der Abschälerweite aufgetragen. Da nach Vorversuchen mit Δf -Werten von ± 4 bis 5 um gerechnet werden mußte, wurde für die Herstellungsmuster aufgrund von Abb. 4 eine mittlere Abschälerweite von $20 \mu\text{m}$ vorgesehen. Dem entspricht nach Abb. 4 ein zu erwartendes UF_6 -Abschälverhältnis von etwa 0,15.

4. Fertigungsprinzip

4.1 Einheit aus Düsen- und Abschälerblech

Bei dem entwickelten Herstellungsverfahren wird das Material für das Düsen- und Abschälerblech auf einer vorgeformten Matrize galvanoplastisch abgeschieden, wobei sich in dafür vorgesehenen Schlitzten der Matrize Verbindungsstege bilden. Nach der Endbearbeitung mit Formwerkzeugen wird die Matrize herausgelöst, wonach die beiden Bleche durch die Stege verbunden als Einheit vorliegen.

Die wesentlichen Bearbeitungsschritte sind in Abb. 5 zusammengestellt. Nach dem Profilieren der als Matrize vorgesehenen Aluminiumleiste in Form eines flachen T-Profiles (Abb. 5a) werden in den kurzen Schenkel mit einem Satzfräser in Abständen von 5 mm die etwa 0,2 mm breiten Schlitzte eingebracht (Abb. 5b). Bei dem sich nun anschließenden Feinbearbeitungsgang wird das geschlitzte T-Profil von 2 auf einer Trägerscheibe montierten $1/4$ -Radiusdiamanten in der Form des Absaugkanals für die leichte Fraktion bearbeitet (Abb. 5c). Bei der galvanischen Beschichtung mit Kupfer (Abb. 5d) baut sich auch in den Querschlitzten Material auf,

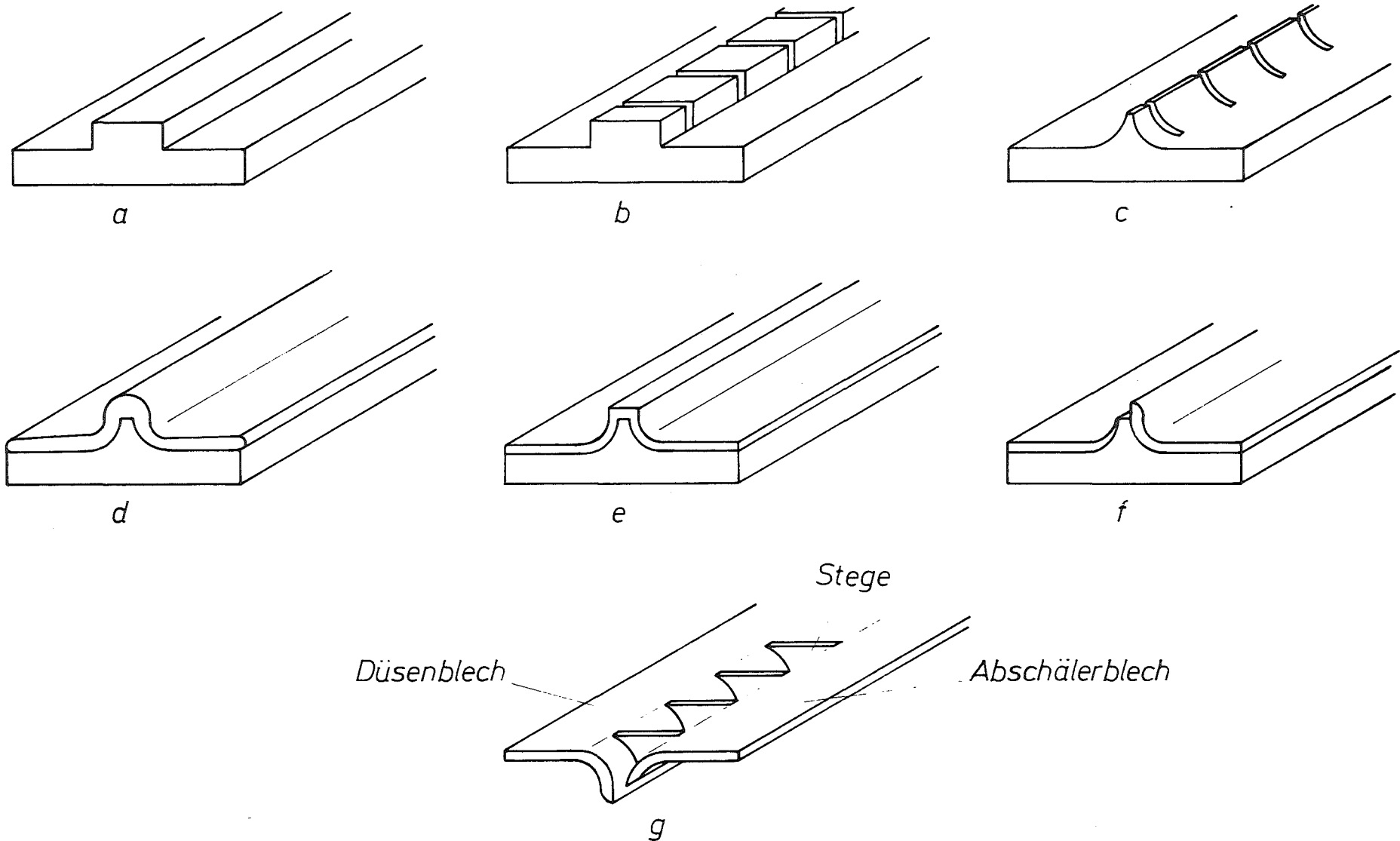


Abb. 5 Die wesentlichen Bearbeitungsschritte bei der Fertigung der Einheit aus Düsen- und Abschälerblech

das als Stege die Verbindung der beiden Bleche übernimmt. Nach dem Egalisieren der Kupferschicht mit einem weiteren Diamant-Formwerkzeug (Abb. 5e) folgt die Endbearbeitung (Abb. 5f). Als Werkzeug wird eine am Umfang mit drei Formdiamanten bestückte Diamantträgerscheibe verwendet. Abb. 6 zeigt Form und gegenseitige Lage der 3 Einzeldiamanten. Bei dem abschließenden chemischen Bearbeitungsschritt wird die Aluminiummatrize mit Natronlauge entfernt. Abb. 5g zeigt die fertige Einheit aus Düsen- und Abschälerblech.

4.2 Gasführungsrohr mit eingearbeiteter Umlenkrolle und aufgesetzten Justiernocken

Die Umlenkrolle wird längs einer Mantellinie des aus einer Aluminiumlegierung⁺ stranggepreßten Gasführungsrohres (vgl. Abb. 2) im Grund einer Rechtecknut eingefräst. Sie wird in regelmäßigen den Stegabständen entsprechenden Intervallen von Justiernocken unterbrochen, die bei der Montage die Einheit aus Düsen- und Abschälerblech gegenüber der Umlenkrolle fixieren.

Die wesentlichen Bearbeitungsschritte sind in Abb. 7 dargestellt. Das Gasführungsrohr wird durch Fräsen in einem Arbeitsgang mit dem in Abb. 7a gezeigten Profil versehen. Die große Mittennut dient zur Aufnahme der Umlenkrolle und der Justiernocken. Die Flächen beiderseits der Nut sind als Klebeflächen zur Montage der Einheit aus Düsen- und Abschälerblech vorgesehen. Die kleinen Nuten in der Nähe der Mittennut nehmen den dabei anfallenden überschüssigen Kleber⁺⁺ auf.

⁺) Verwendet wird AlMgSi 0,5

⁺⁺) Als Kleber wurde UHU-plus der Fa. UHU-Werke H.u.M. Fischer GmbH, Bühl, verwendet, der sich in Vorversuchen als ausreichend UF₆-beständig erwies.

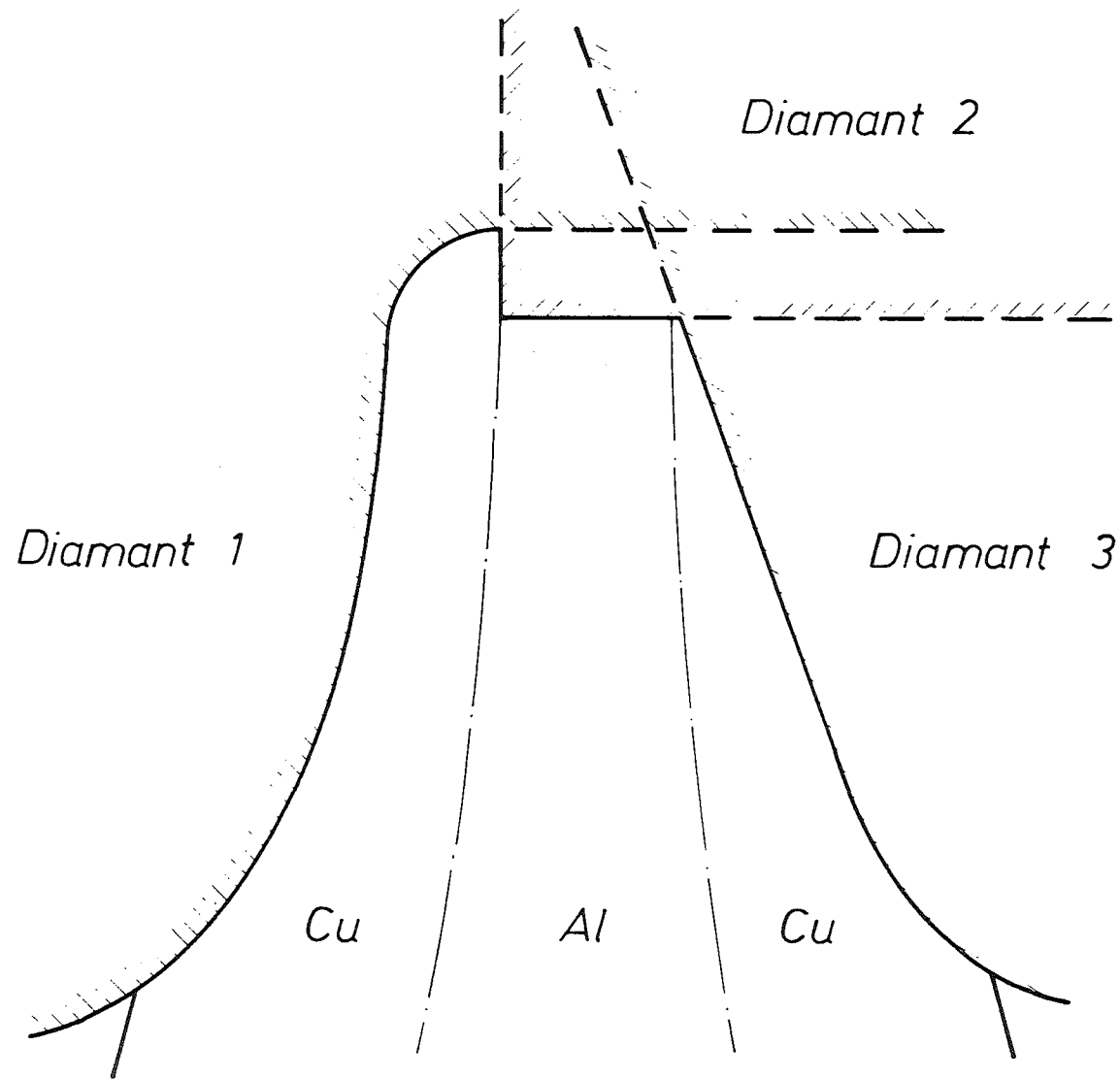


Abb. 6 Form und gegenseitige Lage der drei Einzeldiamanten zur Bearbeitung der Einheit aus Düsen- und Abschälerblech

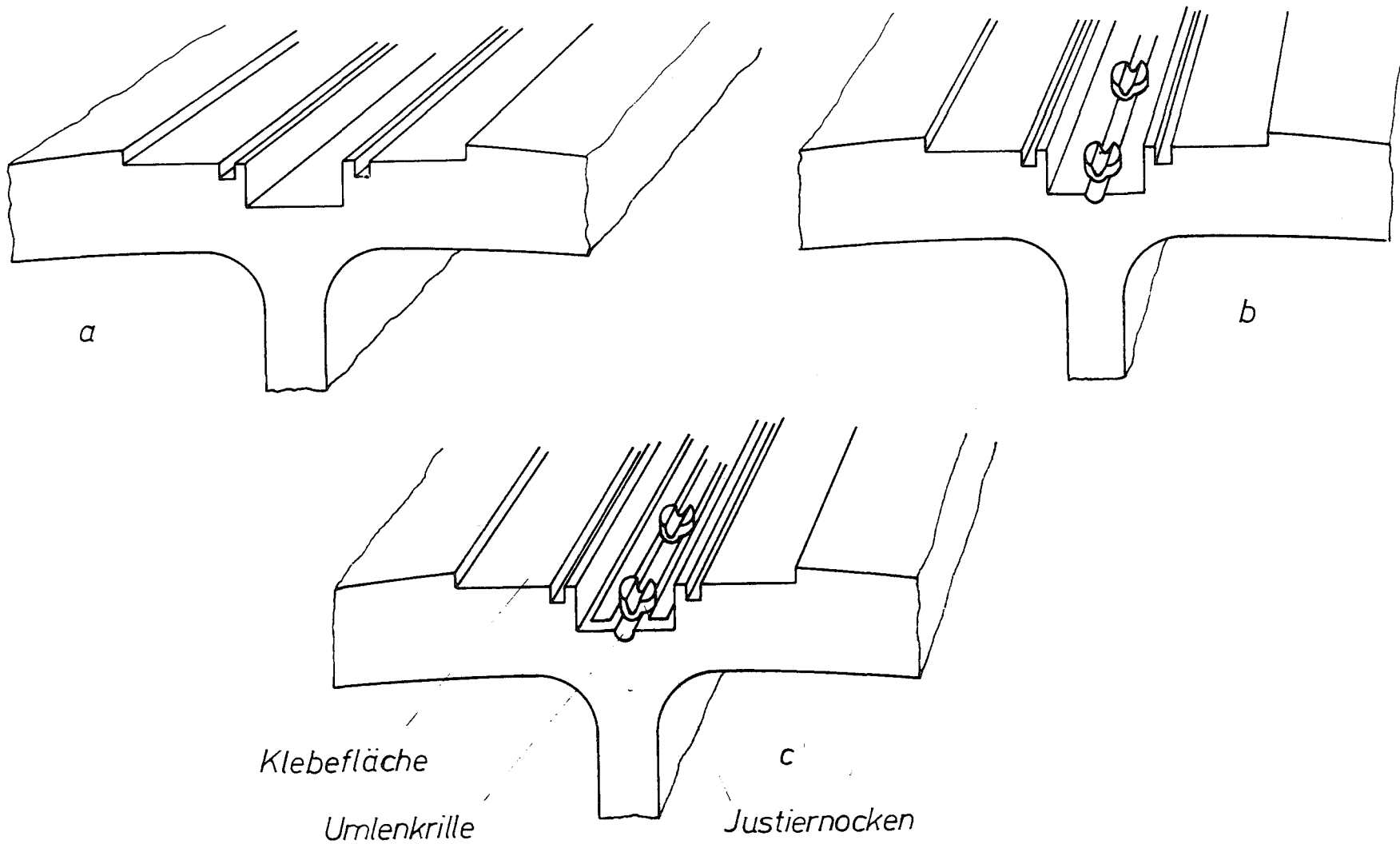


Abb. 7 Die wesentlichen Bearbeitungsschritte bei der Fertigung des Gasführungsrohres mit eingearbeiteter Umlenkrille und aufgesetzten Justiernocken

Das Profilieren der Umlenkrolle, das Setzen der Justier-nockenrohlinge und das anschließende Bearbeiten der Nocken (Abb. 7b) erfolgt in einer Einspannung auf einer mit zwei Spindeln bestückten Präzisionsfräsmaschine⁺). Zur Befestigung der Nocken befindet sich zwischen den beiden mit Form-diamantwerkzeugen ausgerüsteten Spindeln ein Ultraschall-schweißkopf⁺⁺).

In einem sich anschließenden Arbeitsgang werden im Grund der Mittennut beiderseits der Umlenkrolle Schlitze getaucht, die die Verbindungen zu den angrenzenden Kammern des Gas-führungsrohres herstellen (Abb. 7c). Abb.8 zeigt einen Schnitt durch das fertig montierte Trenndüsen-system.

5. Herstellung und Erprobung der Fertigungsmuster

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Fertigungs-prinzips wurden 12 Stück 100 mm lange Fertigungsmuster mit einer Maschineneinstellung hergestellt. Um die spätere Fehler-analyse zu erleichtern, wurde jeder Rohrabschnitt nur mit einem Trenndüsen-element versehen. Abb. 9 zeigt die stirn-seitige Ansicht eines Trenndüsen-systems der Musterserie, auf-genommen mit einem Rasterelektronenmikroskop⁺⁺⁺).

+) Als Präzisionsfräsmaschinen haben sich Precicomb-Maschinen der Fa. Ernst Leitz, Wetzlar, gut bewährt.

++) Die Ultraschallschweißanlage wurde von der Fa. KLN Ultra-schall GmbH, Heppenheim, geliefert.

+++) Die in Abb. 9 gezeigte Aufnahme wurde von Dr. R. Schill im Institut für systematische Botanik der Universität Heidelberg gemacht.

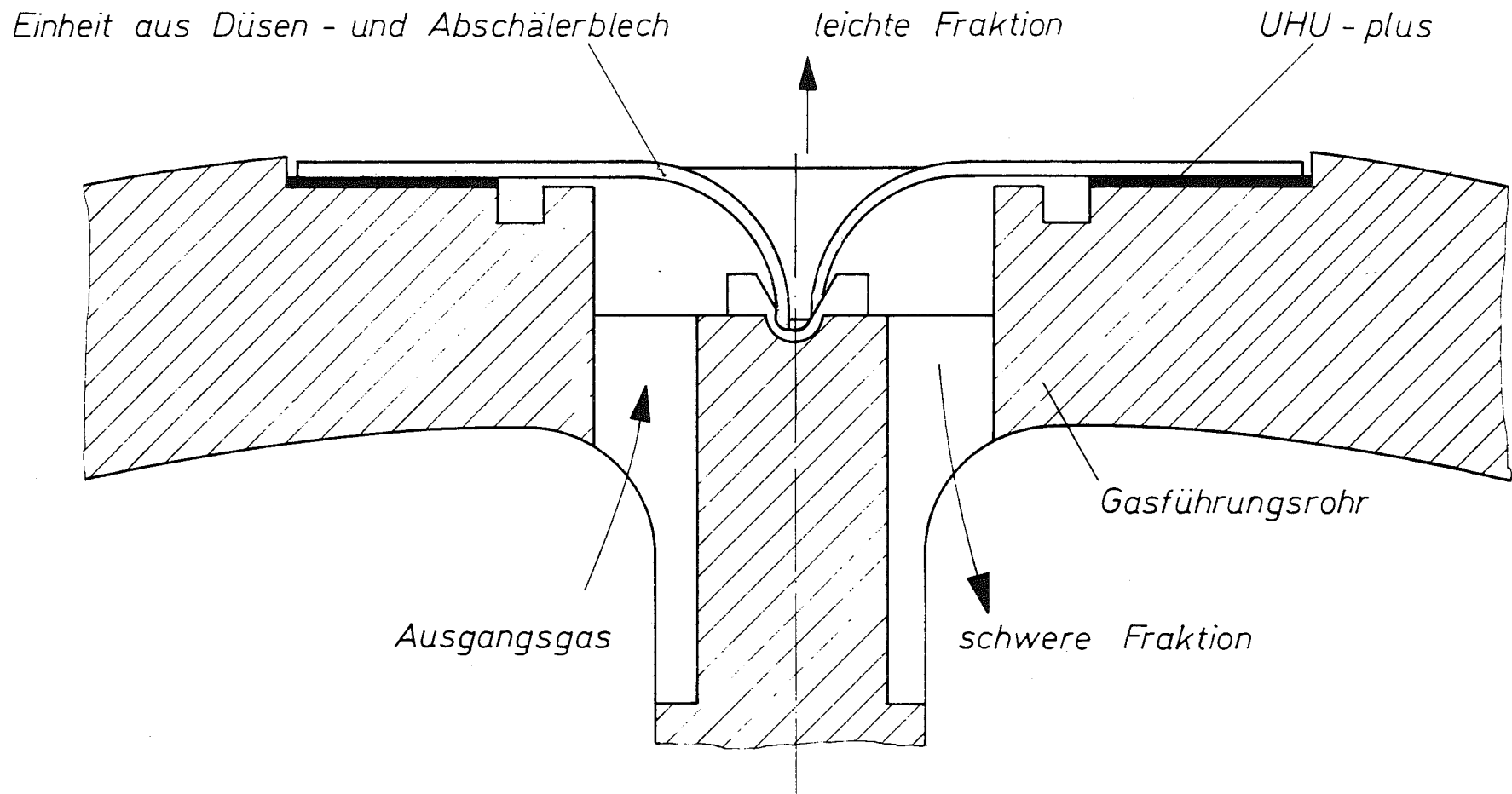
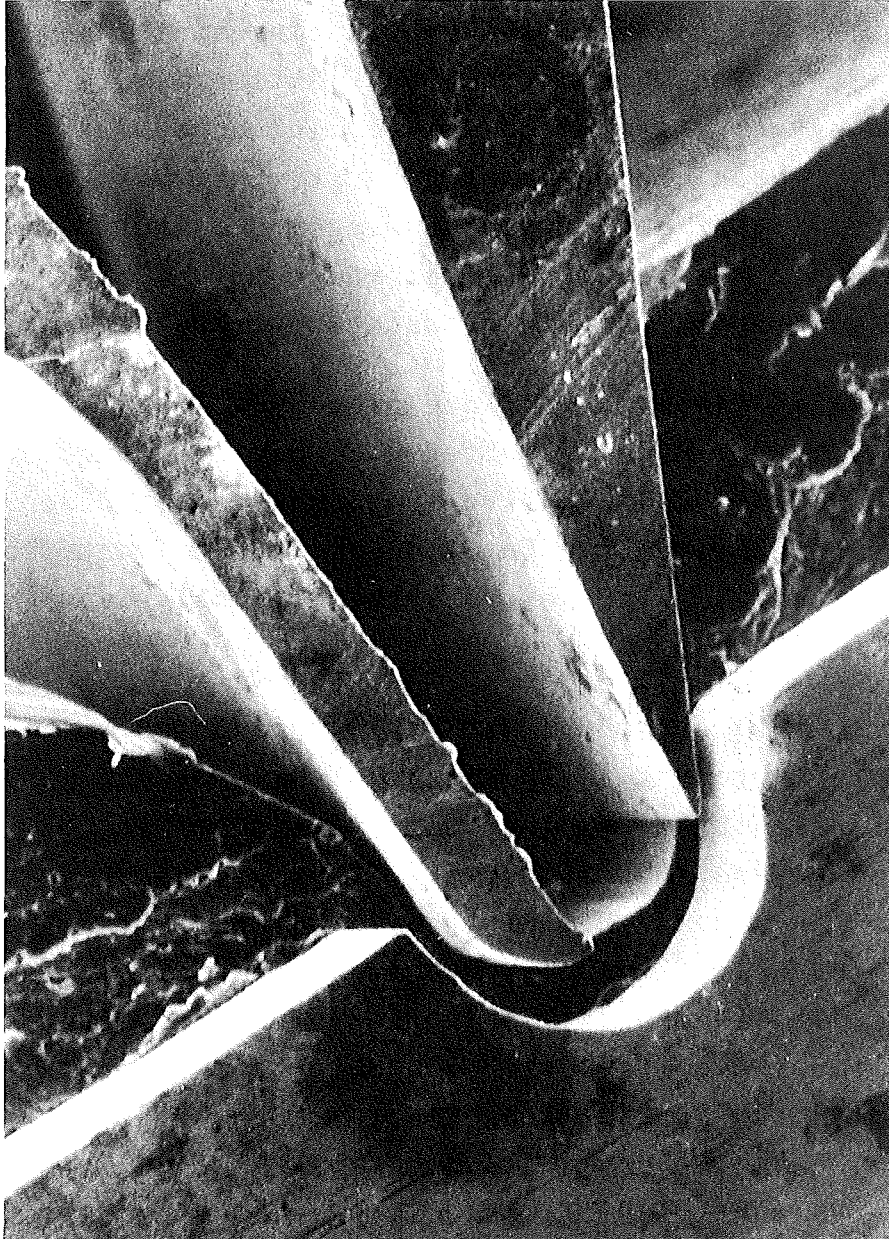


Abb. 8 Schnitt durch das fertig montierte Trenndüsenystem

Abschälerblech

*Düsen-
blech*

*Justier-
nocken*



*Justier-
nocken*

*Umlenk-
ritze*

—|—|—
0,1 mm

Abb. 9 Stirnseitige Ansicht eines Trenndüsen-
systems der Musterserie, aufgenommen mit einem Raster-
elektronenmikroskop

Die Technik bei der Einzelerprobung war die gleiche wie bei der Erprobung von Laborelementen³⁾: Das 5%-ige UF_6/He -Gemisch wird einem Vorratstank entnommen, wobei der Düsen-vordruck p_0 mit einem Drosselventil eingestellt werden kann. Das UF_6 der leichten und schweren Fraktion wird in Kühlfallen ausgefroren, während das verbleibende Helium mit normalen Drehschieberpumpen abgesaugt wird. Das UF_6 -Abschälverhältnis ergibt sich durch Auswiegen der in Pipetten übergefrorenen UF_6 -Mengen. Die Molenbrüche n_M und n_K des leichten Uranisotops werden mit einem Massenspektrometer bestimmt.

Abb. 10 zeigt die bei der Einzelerprobung gemessenen Abhängigkeiten der Elementareffekte ϵ_A der Trennung der Uranisotope und der UF_6 -Abschälverhältnisse \mathfrak{U}_U vom Düsen-vordruck p_0 . Im Maximum der Entmischung werden Trenneffekte von 15,3 bis 17,7 ‰ bei UF_6 -Abschälverhältnissen von 0,10 bis 0,15 erreicht.

Neben der Einzelerprobung der Fertigungsmuster wurde eine gemeinsame Erprobung im Trennelementtestloop der technischen Prototyptrennstufe⁵⁾ durchgeführt. Die dabei angewendete Technik geht aus Abb. 11 hervor: Es wird ähnlich verfahren wie beim Einzeltest. Die mit einem Zuganker unter Verwendung von Abschlußflanschen, Dichtungen und einem Verlängerungsrohr zu einem etwa 2 m langen Trennelementrohr verbundenen 12 Fertigungsmuster werden in den rohrförmigen Rezipienten des Testloops eingesetzt. Das vom Verdichter kommende, auf p_0 gedrosselte Ausgangsgas tritt in das Trennelementrohr ein. Die leichte und die schwere Fraktion, deren Druck p_M und p_K mit Drosselklappen durch Stau weitgehend variiert werden können, werden nach Vermischung vom

5) 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, Vortrag auf der vierten internationalen Konferenz der Vereinten Nationen über die friedliche Nutzung der Kernenergie, Genf 1971.

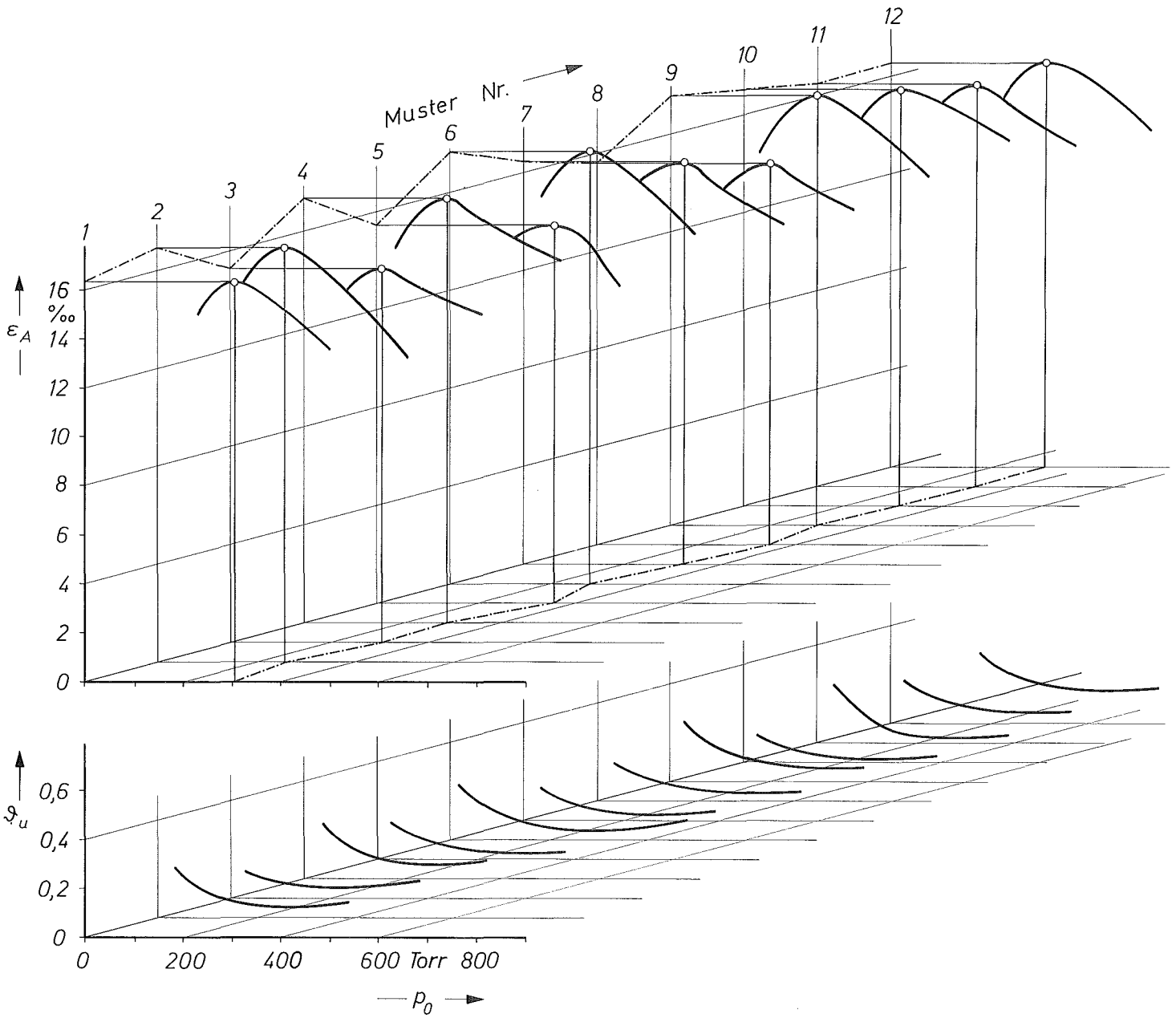


Abb. 10

Die bei der Einzelerprobung der Fertigungsmuster gemessenen Abhängigkeiten der Elementareffekte ϵ_A der Trennung der Uranisotope und der UF_6 -Abschälverhältnisse S_U vom Düsenvordruck p_0

(He/ UF_6 -Gemisch; 5 Mol-% UF_6 ; $p_0/p_M = p_0/p_K = 4$)

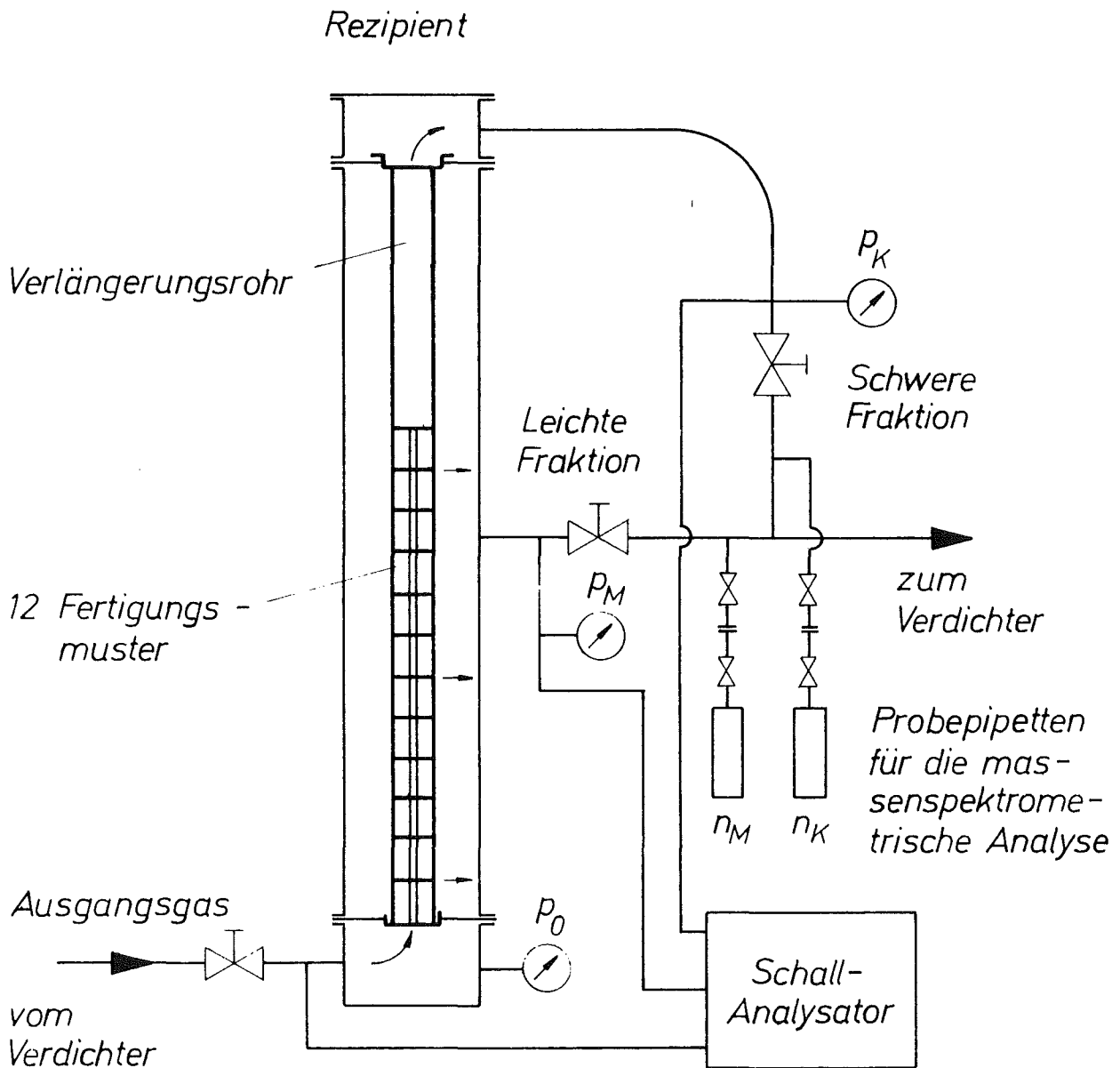


Abb. 11 Gemeinsame Erprobung der Fertigungsmuster im Trennelementtestloop der technischen Prototyp-trennstufe

Verdichter wieder angesaugt. Durch Messen der UF_6 -Konzentrationen im Ausgangsgas sowie in den beiden Fraktionen mit einem Schallanalysator wird das UF_6 -Abschälverhältnis \mathfrak{J}_U bestimmt. Der Elementareffekt ϵ_A der Isotopentrennung wird wie bei der Einzelerprobung massenspektrometrisch ermittelt.

In Abb. 12 ist die bei der gemeinsamen Erprobung gemessene Abhängigkeit des Elementareffektes ϵ_A der Trennung der Uranisotope und des UF_6 -Abschälverhältnisses \mathfrak{J}_U vom Düsenvordruck p_0 dargestellt. Man erkennt, daß der maximale Elementareffekt der Trennung 15,8 ‰ bei einem UF_6 -Abschälverhältnis \mathfrak{J}_U von 0,17 beträgt.

6. Abschätzung der erzielten Toleranzen

Aus der Arbeit [3] über den Einfluß der geometrischen Parameter auf die Leistung von Trenndüsenelementen geht hervor, daß sich Fertigungstoleranzen auf die Trennleistung hauptsächlich über Schwankungen der Abschälerweite auswirken.

Grundlage für die Abschätzung der erzielten Toleranzen ist daher der mit einem praktisch toleranzfreien Laborsystem durch Variation der Abschälerweite f und des Düsenvordrucks p_0 im Rahmen einer anderen Arbeit⁶⁾ gewonnene Zusammenhang zwischen maximalem ϵ_A und \mathfrak{J}_U .

6) G. Heeschen, Experimenteller Vergleich von H_2 , D_2 und He als leichtes Zusatzgas zum UF_6 bei einer UF_6 -Konzentration von jeweils 5 Mol-%, gemessen am Laborelement XIII (Radius = 0,75 mm). Institut für Kernverfahrenstechnik, Karlsruhe, interner Bericht, vom 8.11.1971 (unveröffentlicht)

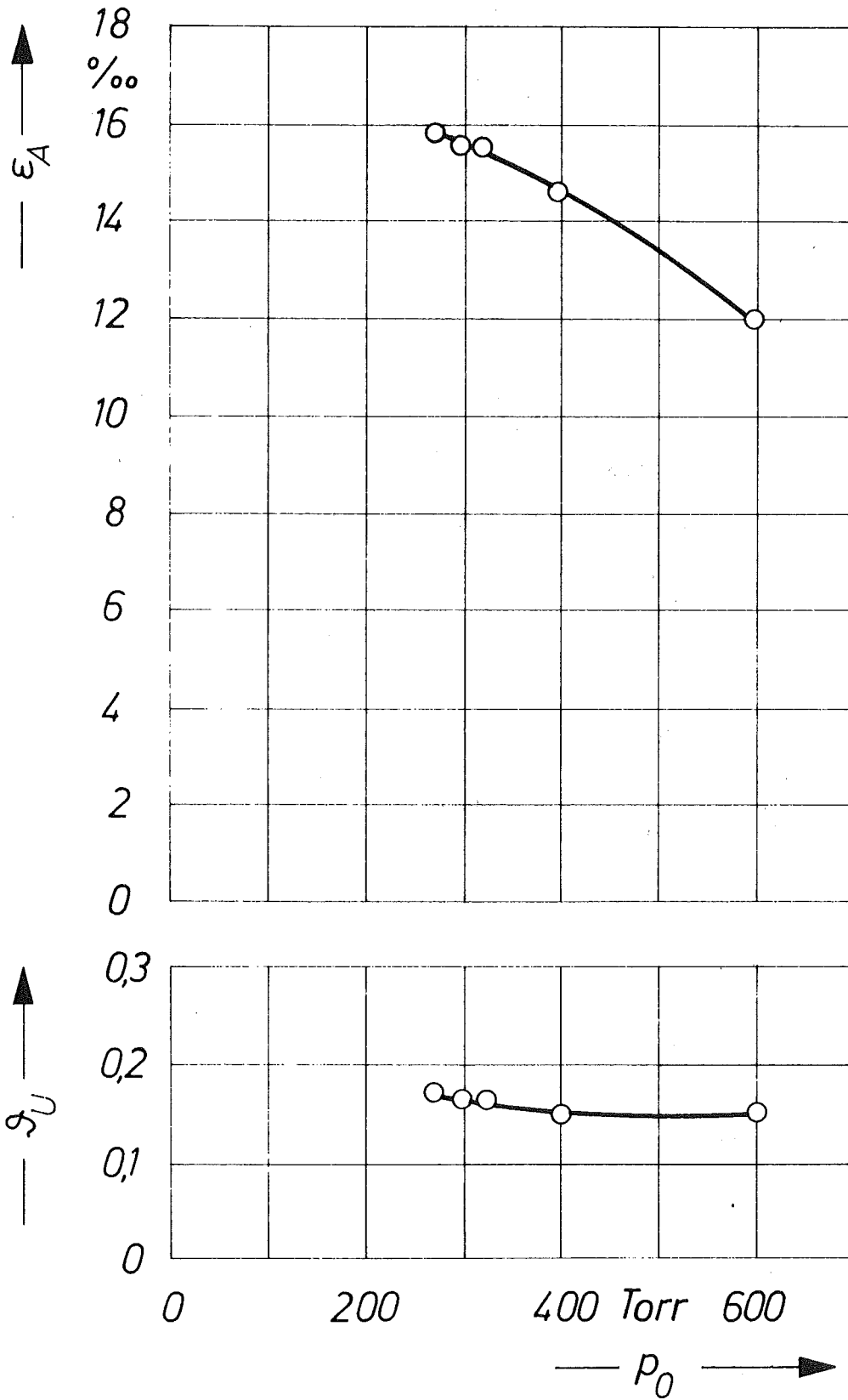


Abb. 12 Die bei der gemeinsamen Erprobung der Fertigungsmuster gemessene Abhängigkeit des Elementareffektes ϵ_A der Trennung der Uranisotope und des UF_6 -Abschälverhältnisses ϑ_U vom Düsenvordruck p_0 (He/UF_6 -Gemisch; 5 Mol-% UF_6 ; $p_0/p_M = p_0/p_K = 4$)

In Tabelle 1 sind die bei den Herstellungsmustern erzielten, aus Abb. 10 entnommenen ϵ_{Amax} -Werte auf die beim Laborsystem nach Abb. 13 für gleiches ϑ_U erreichten Werte bezogen. Es zeigt sich, daß mit den Herstellungsmustern zwischen 90 und 100% der Laborwerte erreicht werden⁺⁾ .

Muster-Nr.	ϵ_{Amax} [°/°]	ϑ_U	$\frac{\epsilon_{Amax}(\text{Muster})}{\epsilon_{Amax}(\text{Labor})}$ [°/°]
1	16,3	0,15	96,6
2	17,0	0,14	98,5
3	15,3	0,15	91,0
4	17,4	0,13	99,4
5	15,5	0,13	90,0
6	17,7	0,12	100,0
7	16,4	0,13	93,7
8	15,7	0,14	91,4
9	17,6	0,10	97,3
10	17,0	0,11	95,0
11	16,4	0,14	95,7
12	16,5	0,15	97,0

Tabelle 1 Die bei den Herstellungsmustern erzielten Maximalwerte des Elementareffektes der Trennung der Uranisotpe ϵ_{Amax} bezogen auf die beim Laborelement für gleiche UF_6 -Abschälverhältnisse ϑ_U erreichten Werte.

⁺⁾ Toleranzfreie technische Trenndüsensysteme dürften etwas höhere ϵ_{Amax} -Werte liefern, als das in [6] benutzte praktisch toleranzfreie Laborelement, da sie ein größeres Verhältnis von zusammenhängender Düsen-schlitzlänge zu Düsenweite haben.

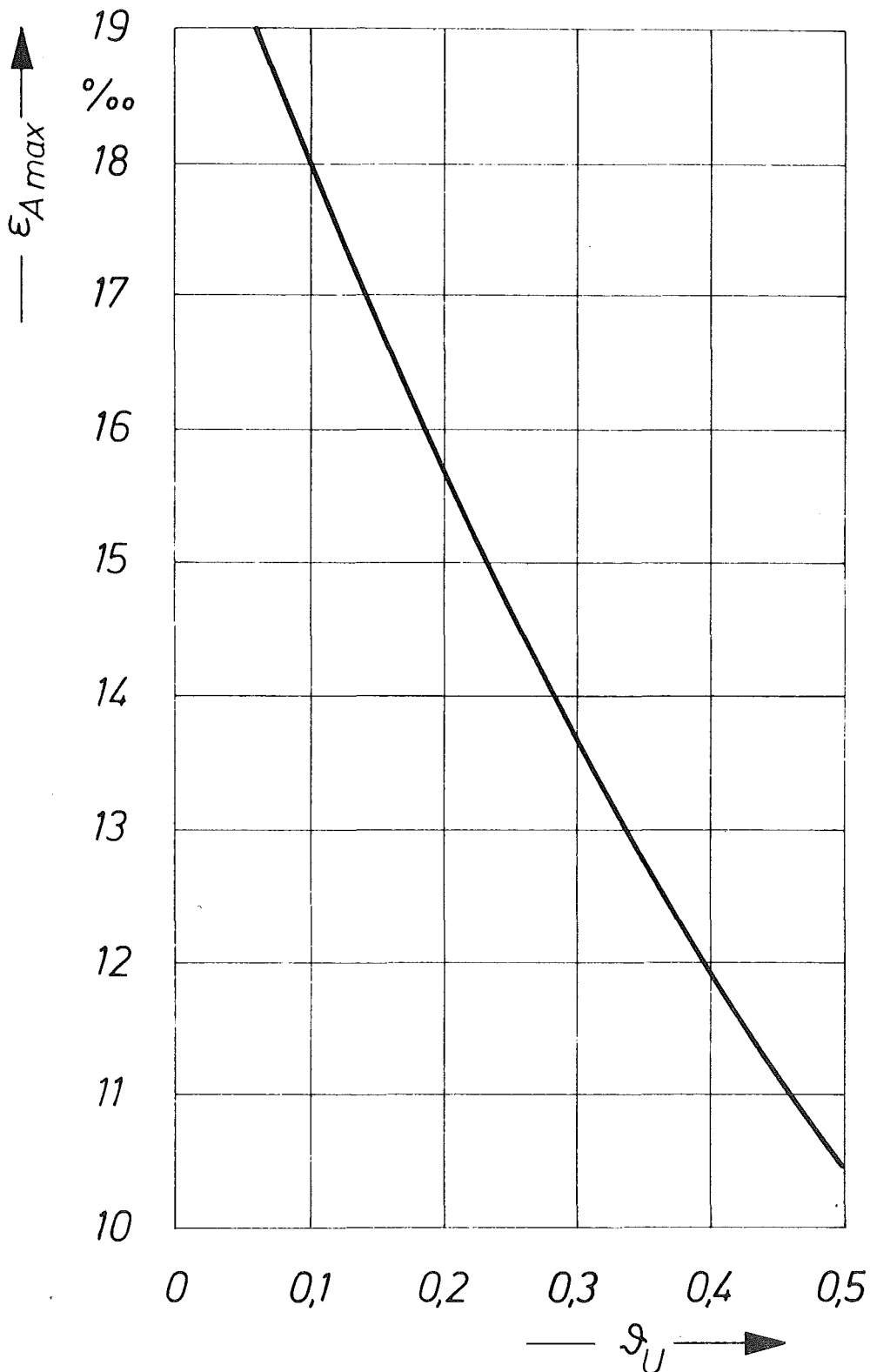


Abb. 13 Mit einem praktisch toleranzfreien Laborelement durch Variation der Abschälerweite und des Düsenvordruckes gewonnener Zusammenhang zwischen dem maximalen Elementareffekt ϵ_{Amax} der Trennung der Uranisotope und dem UF_6 -Abschälverhältnis S_U (He/ UF_6 -Gemisch; 5 Mol-% UF_6 ; $p_O/p_M = p_O/p_K = 4$)

Bezieht man den bei der gemeinsamen Erprobung erreichten maximalen ϵ_A -Wert von 15,8 ‰ auf den beim zugehörigen \mathfrak{D}_U -Wert mit dem Laborelement erzielten Wert, so ergeben sich 95 %. Bezüglich ϵ_A liefert die gemeinsame Erprobung also praktisch den Mittelwert der Einzeltests. Dagegen liegt das zum maximalen ϵ_A der gemeinsamen Erprobung gehörige UF_6 -Abschälverhältnis von 0,17 deutlich höher als der entsprechende Mittelwert der Einzeltests. Die Diskrepanz dürfte auf bevorzugte UF_6 -Verluste in der leichten Fraktion beim Ausfrieren in den Kühlfallen (vgl. Abschnitt 5) zurückzuführen sein. Da angenommen werden kann, daß die mit dem Schallanalysator durchgeführte \mathfrak{D}_U -Bestimmung eine wesentlich kleinere Fehlergrenze hat, werden die Fertigungstoleranzen aus dem Ergebnis der gemeinsamen Erprobung abgeschätzt.

In gleicher Weise wie in Abschnitt 3 wurde aufgrund von Materialbilanzen der Einfluß der Schwankung Δf der Abschälerweite auf den maximalen Elementareffekt ϵ_{Amax} der Trennung der Uranisotope für das zu maximaler Entmischung bei der gemeinsamen Erprobung gehörige UF_6 -Abschälverhältnis $\mathfrak{D}_U = 0,17$ rechnerisch ermittelt. Hierbei wurde die in [6] gezeigte Abhängigkeit des maximalen Elementareffektes der Uranisotopentrennung und des UF_6 -Abschälverhältnisses von der Abschälerweite zugrunde gelegt. Das Ergebnis zeigt Abb. 14. Man erkennt, daß die bei der gemeinsamen Erprobung erreichten 95% des Elementareffektes der Trennung eines toleranzfreien Laborsystems auf eine erzielte Fertigungstoleranz von $\pm 3 \mu m$ schließen lassen.

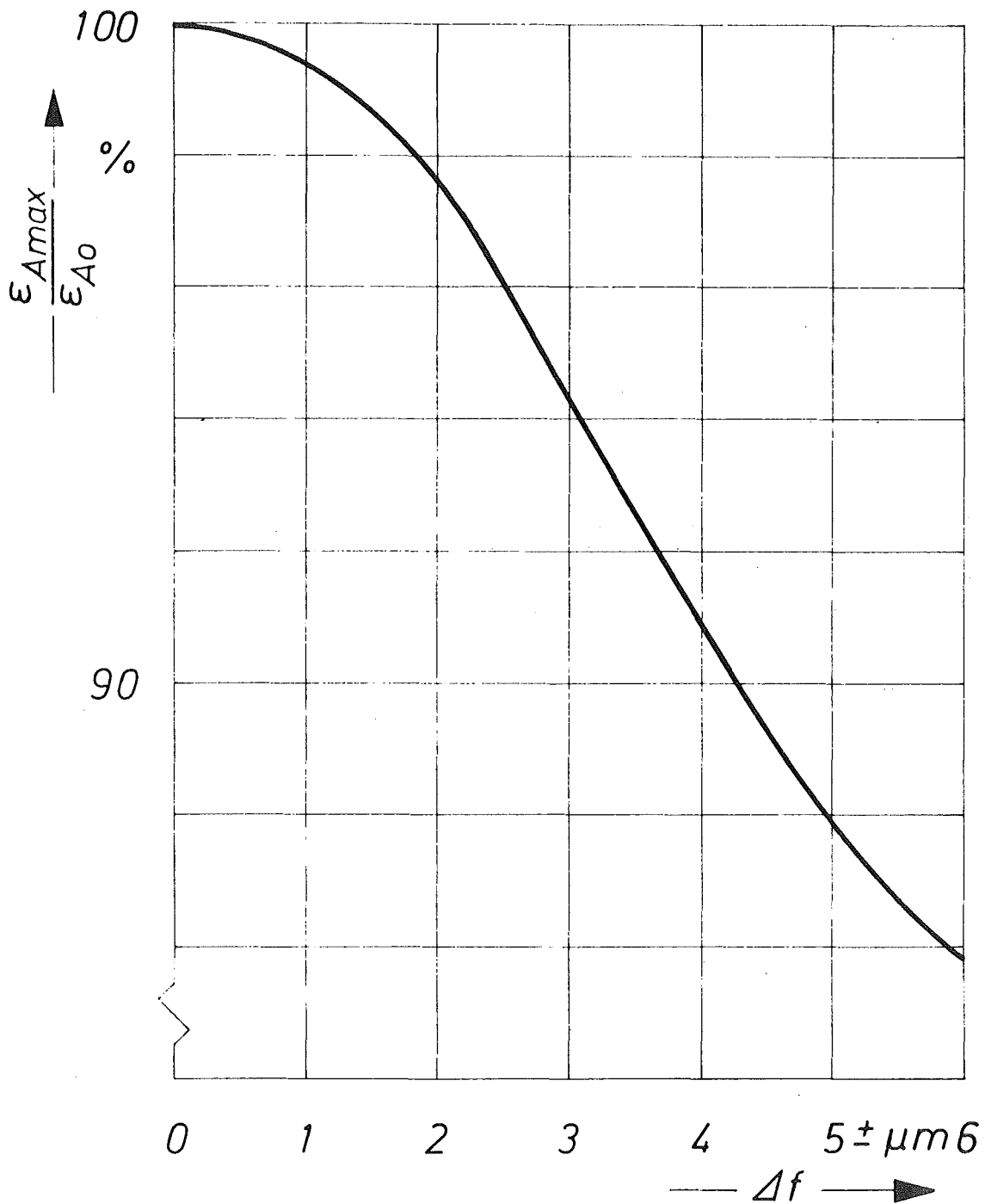


Abb. 14 Rechnerisch ermittelter Einfluß der Schwankung Δf der Abschälerweite auf den maximalen Elementareffekt ϵ_{Amax} der Trennung der Uranisotope bezogen auf den beim toleranzfreien Laborsystem gemessenen Wert ϵ_{A0} für das bei der gemeinsamen Erprobung erzielte UF_6 -Abschälverhältnis $\mathfrak{D}_U = 0,17$
(He/ UF_6 -Gemisch; 5 Mol-% UF_6 ; $p_O/p_M = p_O/p_K = 4$)

7. Ermittlung der voraussichtlichen Kosten bei der Serienfertigung

7.1 Fertigungsablauf

Das Schema des für die Serienfertigung von Trennelementrohren vorgesehenen Fertigungsablaufs ist in Abb. 15 dargestellt. Für die Herstellung der beiden Trenndüsen Einzelteile sind 2 Fertigungsstraßen vorgesehen.

Auf der in der Abbildung oben dargestellten Fertigungsstraße werden die Einheiten aus Düsen- und Abschälerblech hergestellt. Dabei geht man von Aluminium-Stangenmaterial mit T-förmigem Querschnitt aus. Bei der Materialvorbereitung werden die Matrizenrohlinge in einem Arbeitsgang mit Satzfräsern auf ca. 250 mm abgelängt und mit den Stegschlitzen versehen. In einem Vorbearbeitungsgang erfolgt das Anfräsen der Anschlagflächen, auf denen bei den folgenden Feinbearbeitungsschritten⁺⁾ wegen der erforderlichen Reproduzierbarkeit der Einspannung mit Vakuum gespannt wird. Nach dem ersten Feinbearbeitungsschritt, dem Profilieren der Matrizen in der Form des Absaugkanals für die leichte Fraktion, werden diese in Vorrichtungen, die die Anschlagflächen abdecken, galvanisch mit Kupfer beschichtet. Daran schließen sich zwei weitere Feinbearbeitungsschritte an, das Egalisieren und das Endprofilieren der Kupferschicht (vgl. Abb. 5). Nach dem Herauslösen der Aluminium-Matrizen mit Natronlauge werden die gereinigten Einheiten aus Düsen- und Abschälerblech stichprobenweise optisch kontrolliert.

^{+) Feinbearbeitungsschritte werden stets mit Formdiamantwerkzeugen auf Präzisionsfräsmaschinen in klimatisierten Räumen durchgeführt.}

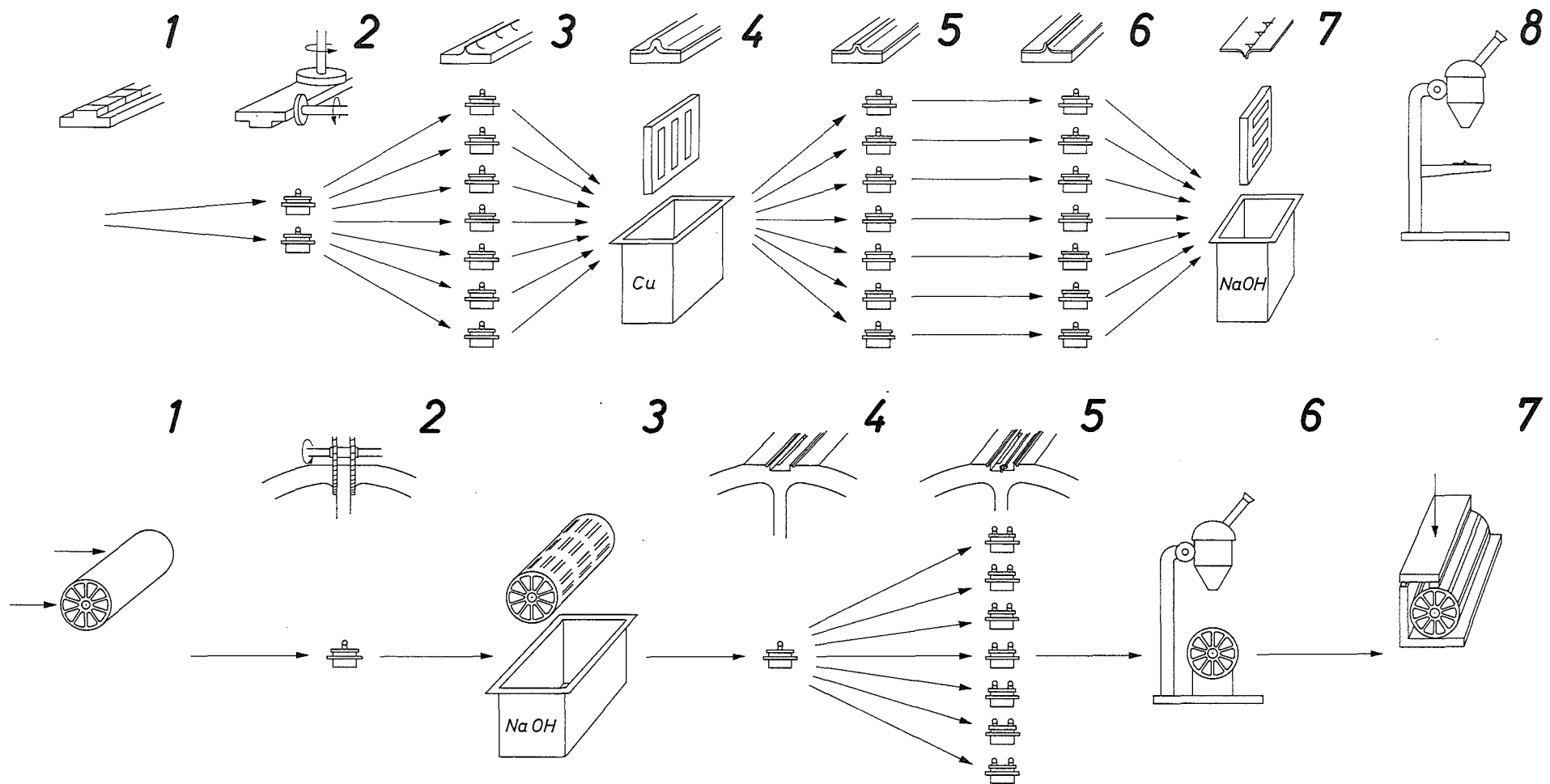


Abb. 15 Schema des für die Serienfertigung von Trennelementrohren vorgesehenen Fertigungsablaufs

oben

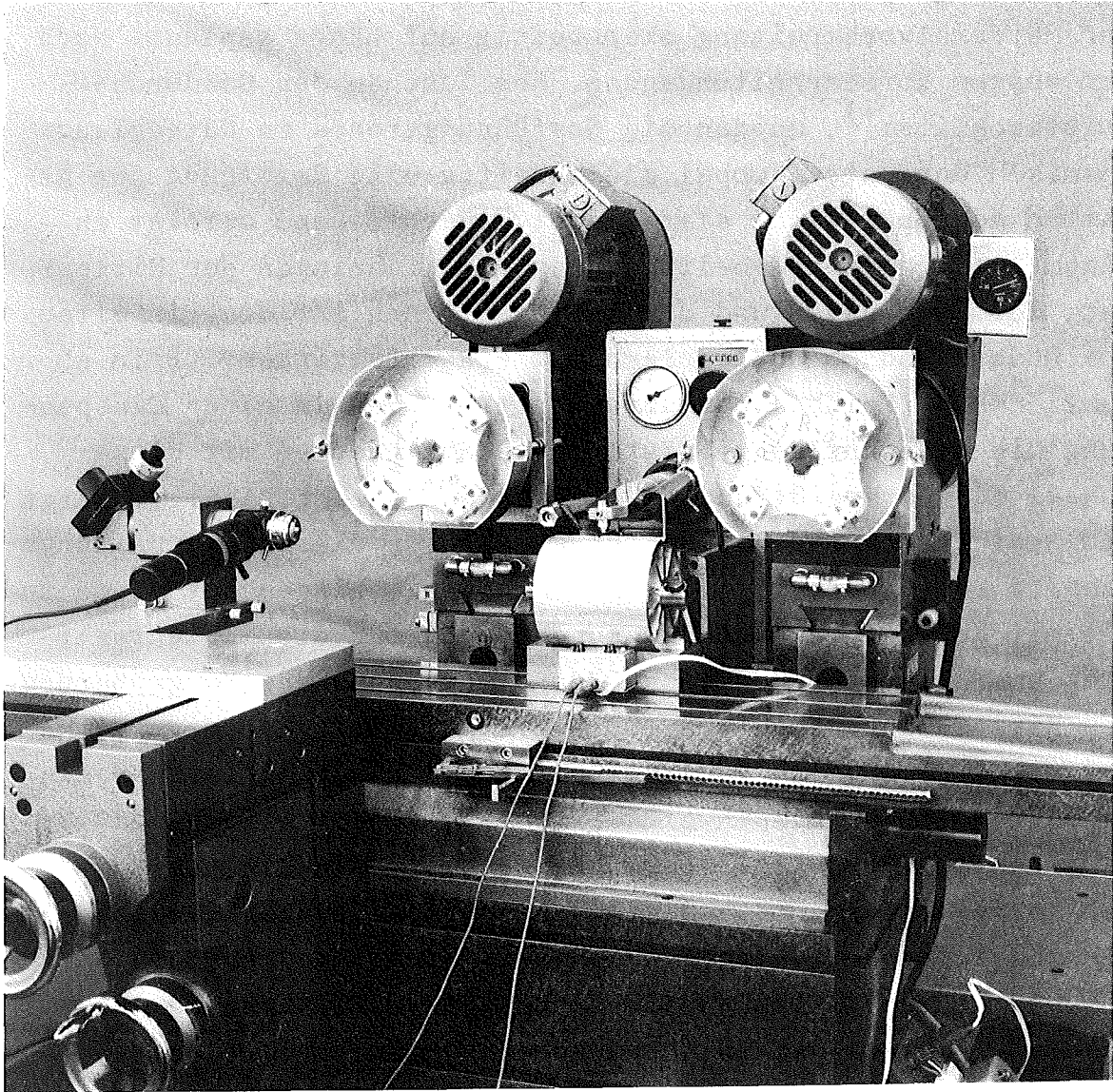
- 1 Materialvorbereitung
- 2 Vorbearbeitungsgang
- 3 Feinbearbeitungsschritt
- 4 Galvanik
- 5 Feinbearbeitungsschritt
- 6 Feinbearbeitungsschritt
- 7 Ausätzen der Matrize
- 8 optische Kontrolle

unten

- 1 Materialvorbereitung
- 2 Vorbearbeitungsgang
- 3 chemisches Entgraten
- 4 Vorbearbeitungsgang
- 5 Feinbearbeitungsschritt
- 6 optische Kontrolle
- 7 Montage

Auf der in Abb. 15 unten dargestellten Fertigungsstraße erfolgt die Bearbeitung der Gasführungsrohre. Die in Längen von ca. 260 mm angelieferten stranggepreßten Rohlinge werden in der Materialvorbereitung stirnseitig auf Länge geplant. Nach dem ersten Vorbearbeitungsgang, dem Tauchen der Gasdurchtrittsschlitze⁺⁾, werden die Gasführungsrohre in Natronlauge chemisch entgratet, wobei gleichzeitig eine Reinigung der gesamten Rohroberfläche stattfindet. Anschließend erfolgt in einem zweiten Vorbearbeitungsgang das Einbringen der Mittennut, der Klebenuten und der Auflageflächen für die Einheiten aus Düsen- und Abschälerblech mit einem Satzfräser. Beim abschließenden Feinbearbeitungsschritt werden in einer Einspannung die Umlenkrolle gefräst, die Justiernocken mit Ultraschall aufgeschweißt und die Nocken profiliert. Abb. 16 zeigt die Ansicht des Maschinenaufbaus, der für diesen Bearbeitungsschritt bei der Fertigung der Musterserie eingesetzt wurde und der mit geringfügigen Abänderungen auch für die Serienfertigung übernommen werden kann. Für die vorgesehene Vergrößerung der Herstellungslänge von 100 auf etwa 250 mm ist der Tischweg um ca. 200 mm zu verlängern. Außerdem muß der bisher eingesetzte Ultraschallschweißkopf so abgeändert werden, daß er parallel zur Rohrachse schwingt, da sonst ein Mitschwingen der Kammerwandungen des Gasführungsrohres das Verschweißen der Justiernockenrohlinge erschwert. Nach Reinigung und optischer Kontrolle werden die Einheiten aus Düsen- und Abschälerblech auf die Gasführungsrohrabschnitte geklebt und mehrere solcher Abschnitte durch einen Zuganker zu einem kompletten Trennelementrohr verbunden.

⁺⁾ Bei der zur Fertigung der Musterserie eingesetzten Schweißeinrichtung lag die Schwingungsrichtung quer zur Achse des Gasführungsrohres. Um in diesem Falle ein Mitschwingen der Kammerwandungen zu vermeiden, war bei der Musterserie das Tauchen der Gasdurchtrittsschlitze der letzte Arbeitgang.



A.N.3031-2307

Abb. 16 Ansicht des Maschinenaufbaus, der für die Endbearbeitung des Gasführungsrohres bei der Fertigung der Musterserie eingesetzt wurde und der mit geringfügigen Abänderungen auch für die Serienfertigung übernommen werden kann

7.2 Zeittakt der Fertigungsstraße und daraus resultierende Kapazität der Fertigungseinheit

Bei der Abschätzung des zeitlichen Aufwandes für die serienmäßige Herstellung der Trennelementabschnitte wurden Schnittgeschwindigkeiten⁷⁾ von 315 m/min für Fräser aus Schnellarbeitsstahl, von 630 m/min für Hartmetallwerkzeuge und von 2000 m/min für die Diamantbearbeitung zugrunde gelegt. Die gewählten Vorschübe⁷⁾ liegen zwischen 1,5 und 2,5 m/min für die Vorbearbeitungsgänge und bei 0,3 m/min für die Feinbearbeitungsschritte

Bei der auf dieser Basis durchgeführten Zeitabschätzung für den in Abschnitt 7.1 beschriebenen Fertigungsablauf weisen die beiden Vorbearbeitungsgänge am Gasführungsrohr mit etwa 2,5 Minuten pro Abschnitt die geringste Fertigungszeit auf. Die Wahl dieses Zeittaktes für die beiden Fertigungsstraßen führt zu der in Abb. 15 dargestellten kleinsten in jedem wesentlichen Arbeitsgang voll ausgelasteten Fertigungseinheit. Unter diesen Voraussetzungen werden dann für die Feinbearbeitungsschritte je 7 Maschinen benötigt. Bei der erforderlichen Verweilzeit der Matrizen im Galvanikbad von etwa 5 Stunden ergibt sich eine in der Technik übliche Badgröße von ca. 10 Quadratmetern Grundfläche und einer Tiefe von etwa einem Meter. In dieser Größenordnung liegen auch die Ätzbäder.

Die aufgezeigte Fertigungseinheit hat bei täglich 2 Schichten eine Kapazität von etwa 75.000 Trennelementabschnitten pro Jahr, was einer jährlich produzierten Trennschlitzlänge von rund 150 km entspricht.

7) F. Sass, Ch. Bouché, A. Leitner, Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau, 2. Band.

7.3 Zusammenstellung der Einzelkosten und Endkalkulation

Die Personalkosten der mechanischen Fertigung ergeben sich als Produkt aus der Fertigungszeit und dem mit DM 30,-- angenommenen Stundensatz. Die Fertigungszeit pro Rohrabschnitt folgt aus dem in Abschnitt 7.2 angegebenen Zeittakt und der aus Abb. 15 ersichtlichen mit der Zahl der Bedienungspersonen identischen Maschinenanzahl zu 1,6 Stunden, wobei für Kontroll- und Einrichtarbeiten 20% der Maschinenzeit zuge schlagen wurde. Hiermit betragen die Personalkosten der mechanischen Fertigung ca. DM 50,-- pro Rohrabschnitt.

Die Materialkosten der mechanischen Fertigung belaufen sich pro Rohrabschnitt auf etwa DM 25,--, wobei von einem Aluminium-Preis von DM 7,-- pro kg und einem Materialgemeinkostensatz von 15% ausgegangen wurde.

Die Kosten für die Galvanik und die chemische Behandlung wurden aufgrund von Industrieangeboten mit insgesamt DM 40,-- pro Rohrabschnitt eingesetzt.

Die Netto-Herstellkosten sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Personalkosten f.d. mech. Fertigung	50,-- DM
Materialkosten f.d. mech. Fertigung	25,-- DM
Galvanik	35,-- DM
chem. Behandlung	<u>5,-- DM</u>
Netto-Herstellkosten	115,-- DM

Tabelle 2 Zusammenstellung der Netto-Herstellkosten pro Trennelementabschnitt mit 2 m effektiver Schlitzlänge.

Hieraus ergeben sich unter Berücksichtigung einer den hohen Genauigkeitsforderungen entsprechenden Ausschußquote, die mit 20% eingesetzt wird, die voraussichtlichen Herstellkosten zu rund DM 140,--. Mit den industrieüblichen Zuschlagsätzen bei Selbstkostenpreisen⁺⁾ ergibt sich der Netto-Preis pro Rohrabschnitt zu ca. DM 180,--. Da die effektive Schlitzlänge eines Rohrabschnittes etwa 2 m beträgt, ist bei dem galvanoplastischen Herstellungsverfahren mit einem Serienpreis von etwa DM 90,-- pro Meter Trennschlitz zu rechnen.

8. Diskussion

Die in Abschnitt 5 besprochene Musterserie wurde mit den für die Serienfertigung vorgesehenen Maschinen unter industriellen Bedingungen, d.h. ohne Korrektur der Maschineneinstellung während einer längeren Fertigungszeit, hergestellt. Deshalb können der bei der gemeinsamen Erprobung der Fertigungsmuster erzielte Elementareffekt der Trennung der Uranisotope und die daraus abgeschätzten Toleranzen als repräsentativ für den derzeitigen Entwicklungsstand des galvanoplastischen Herstellungsverfahrens angesehen werden.

Bei dieser Abschätzung hatte sich eine Fertigungstoleranz von $\pm 3 \mu\text{m}$ ergeben. Bei Berücksichtigung des in der Anmerkung auf Seite 21 erwähnten positiven Einflusses des größeren Verhältnisses von zusammenhängender Düsenschlitzlänge zu Düsenweite bei den technischen Trenndüsenystemen dürfte sich dieser

+) Selbstkostenpreis nach § 5 der Verordnung PR Nr. 30/53 über die Preise bei öffentlichen Aufträgen vom 21. Nov. 1953 (Bundesanzeiger Nr. 244 vom 18.12.1953) in der zur Zeit gültigen Fassung.

Wert auf etwa $\pm 4 \mu\text{m}$ erhöhen. Eine systematische Fehleranalyse des bisherigen Fertigungsvorganges spricht dafür, daß sich die Toleranzen bei einer Weiterentwicklung ohne wesentlichen Mehraufwand auf etwa die Hälfte herabsetzen lassen. Damit sollten sich beim technischen Trenndüsen-System praktisch 100 % des Elementareffektes des Laborelements oder etwa 96 % des geschätzten Elementareffektes eines toleranzfreien technischen Trenndüsen-Systems erreichen lassen.

Wiederholt man mit der halbierten Toleranz die in Abschnitt 3 beschriebene Optimalisierung des UF_6 -Abschälverhältnisses, so ergibt sich $\vartheta_{\text{Uopt}} \approx 0.25$. Mit diesem Wert von ϑ_{U} würde sich durch die Verminderung der Toleranz eine Herabsetzung der Trennarbeitskosten um etwa 10 % ergeben. Etwa die selbe Verminderung der Trennarbeitskosten läßt sich bei der für die Demonstrationsanlage²⁾ angenommenen Kostenstruktur erzielen, wenn man bei der um den Faktor 2 verkleinerten Toleranz die kritischen Abmessungen des Trenndüsen-Systems halbiert und das Druckniveau um den Faktor 2 heraufsetzt.

Bei Annahme der verminderten Toleranz folgt mit den Trenndaten des Laborelementes eine Trennleistung pro Meter Trenndüsen-schlitz von 0,77 Kilogramm Uran Trennarbeit pro Jahr. Bei einem Jahresausstoß der in Abschnitt 7.2 beschriebenen Fertigungseinheit von 150 Km Düsenschlitzlänge läßt sich demnach jährlich eine Trennarbeitskapazität von 115 Tonnen Uran pro Jahr installieren. Zur Ausrüstung der geplanten Trenndüsendemonstrationsanlage²⁾, die eine Trennleistung von 600 Tonnen Uran Trennarbeit pro Jahr haben soll, wäre demnach eine Fertigungszeit von 5 Jahren erforderlich. Dies entspricht etwa der Bauzeit der Anlage.

In der vorliegenden Arbeit wurde entsprechend dem in [2] dargelegten Plänen angenommen, daß bei der technischen Realisierung des Trenndüsenverfahrens Helium als leichtes Zusatzgas verwendet wird. Neuere Pläne ziehen auch die Verwendung von Wasserstoff in Erwägung⁵⁾, da sich bei einem toleranzfreien Trenndüsen-system durch die Verwendung von Wasserstoff anstelle von Helium die Trennarbeitskosten um etwa 20 % senken lassen. Da für Wasserstoff ein anderer Zusammenhang von Abschälerweite und Trenndaten gilt, muß für dieses Zusatzgas der Optimalwert des Uranabschälverhältnisses neu bestimmt werden.

