

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

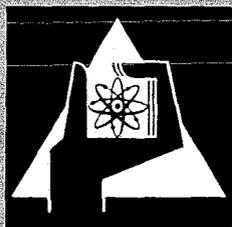
Juli 1971

KFK 1431

Institut für Kernverfahrenstechnik

Die Trennarbeitskosten der U^{235} -Anreicherung
in industriellen Trenndüsen-Kaskaden

R. Schütte



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

Juli 1971

KFK 1431

Institut für Kernverfahrenstechnik

Die Trennarbeitskosten der U²³⁵-Anreicherung
in industriellen Trenndüsen-Kaskaden

Parameterstudie zur Kostensituation
des Trenndüsenverfahrens auf der Ba-
sis der von der EURATOM-Kommission
vorgeschlagenen Finanzierungsgrund-
lagen von 1969 und 1971

von

R. Schütte

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

QUESTION 1

1.1.1. The following table shows the number of students who took part in a school sports day. The number of students who took part in each sport is given in the table below.

Sport	Number of students
Football	120
Netball	80
Table Tennis	40
Badminton	60
Table Tennis	40
Badminton	60

1.1.2. The following table shows the number of students who took part in a school sports day. The number of students who took part in each sport is given in the table below.

Sport	Number of students
Football	120
Netball	80
Table Tennis	40
Badminton	60
Table Tennis	40
Badminton	60

1.1.3. The following table shows the number of students who took part in a school sports day. The number of students who took part in each sport is given in the table below.

Sport	Number of students
Football	120
Netball	80
Table Tennis	40
Badminton	60
Table Tennis	40
Badminton	60

1.1.4. The following table shows the number of students who took part in a school sports day. The number of students who took part in each sport is given in the table below.

Sport	Number of students
Football	120
Netball	80
Table Tennis	40
Badminton	60
Table Tennis	40
Badminton	60

Zusammenfassung:

Ausgehend vom derzeitigen Stand der Leistungsdaten des Trenndüsenverfahrens und der im Rahmen der laufenden Planungsarbeiten ermittelten Kostengrundlagen für eine Demonstrationsanlage (ca. $6 \cdot 10^5$ TAE/a, ca. 400 MW) wurden unter Variation des elementaren Trenneffektes ϵ_A , des Exponenten der pauschalen Kostenfunktion und des Strompreises (4...6,5 mils/kWh) die Trennarbeitskosten für Anlagen im Bereich $8 \cdot 10^5$ bis 10^7 TAE/a ermittelt. Es werden die Gesamtinvestitionen, der jährliche Kapitalbedarf für verschiedene Zubaustrategien und die Trennarbeitskosten für zwei unterschiedliche Finanzierungsgrundlagen A und B angegeben. Der Amortisationszeitraum beträgt in beiden Fällen 20 Jahre: (A) Zinssatz 8 %; (B) Langfristiger Kapitaldienst 7 % p.a., kurzfristig 9 % p.a..

Bei einer Verbesserung der z. Zt. erreichten Trenneffekte um 15 % werden die derzeitigen Trennarbeitskosten der USAEC (32 \$/TAE) in Anlagen mittlerer Baugröße ($2.5 \cdot 10^6$ TAE/a, ca. 1000 MW) erreicht, bei einer Verbesserung um 30 % liegen die Trennarbeitskosten unter 27 \$/TAE. Der Exponent der Kostenfunktion wurde hierbei mit $k = 0,7$ zur Extrapolation über den bisher bearbeiteten Bereich der Stufendurchsätze von $3,3 \cdot 10^4$ und 10^5 m³/h hinaus angewendet. Seine Variation zwischen den Werten 0,75 (Kraftwerksbau) und 0,6 beeinflusst die Ergebnisse nicht wesentlich. Mehrere Ausführungsbeispiele zu drei Bedarfskurven sind in ihren Zeitkosten-Relationen tabellarisch und graphisch verglichen. Für die untersuchten Trenndüsenkaskaden ergeben sich bei den verschiedenen Finanzierungsgrundlagen Unterschiede der Trennarbeitskosten von etwa 1 %.

Die scheinbaren Kostenvorteile von supergroßen Anlagen wurden nicht auf ihre standortbedingten, sekundären Kostennachteile hin analysiert.

Abstract:

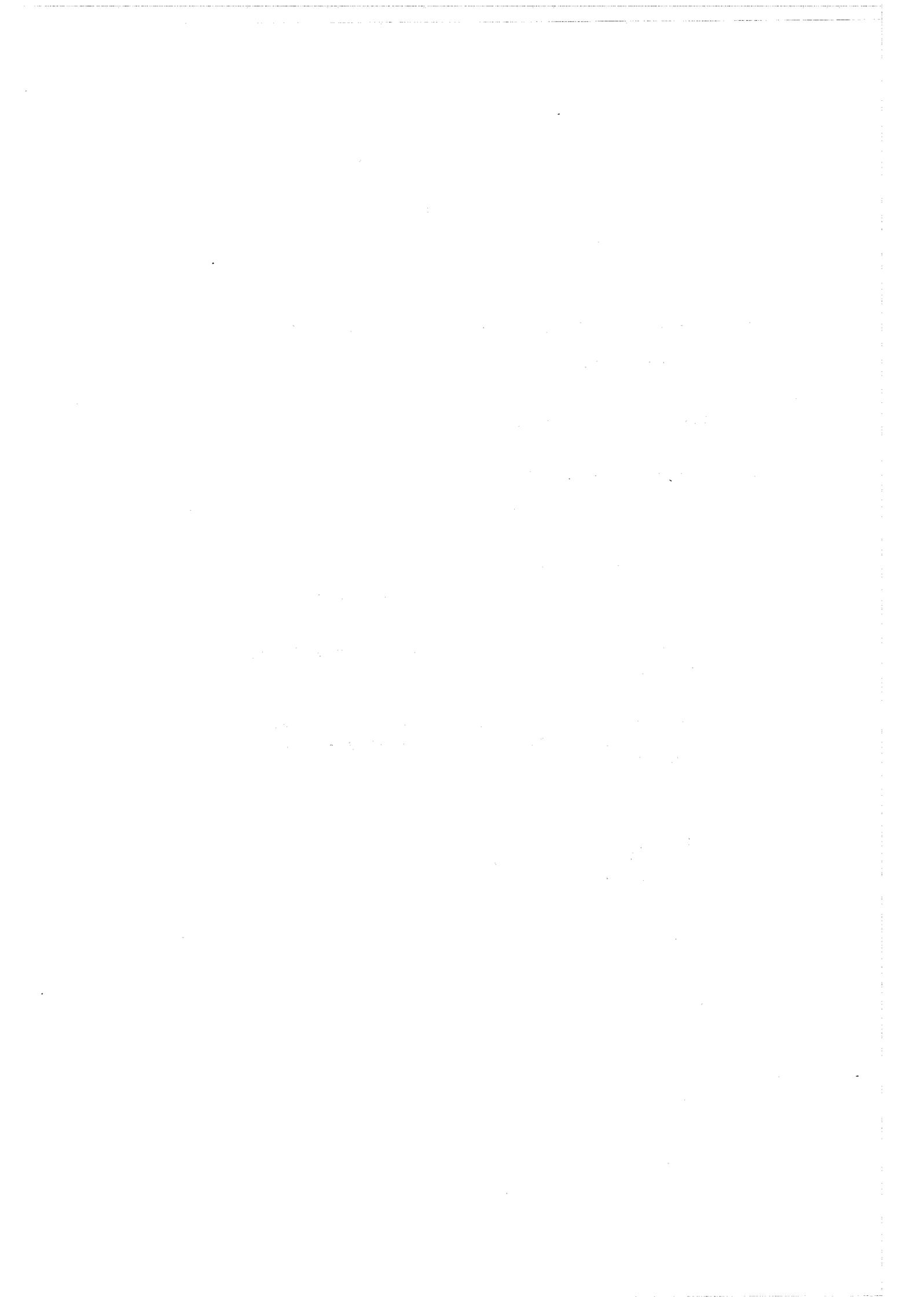
The costs of separative work from separation nozzle cascades with separative capacities ranging from 8×10^5 to 10^7 separative work units per year (SWU/a) have been calculated on the basis of actual process performances and on a cost basis which has been evaluated for a separation nozzle demonstration plant ($\sim 6 \times 10^5$ SWU/a, ~ 400 MW). The calculations include variations of the elementary separation effect of isotope separation ϵ_A , of the exponent governing the economy of scale within the cumulative cost function of a cascade, and of the price of electricity. For several strategies of increase in capacity, the separative work costs, the annual investments and the total capital requirements are indicated on two different financial bases, A and B. The period of depreciation in both cases is 20 years; (A) implies a rate of interest of 8 % p.a., (B) assumes 7 % p.a. for long term and 9 % for short term capital charges.

Medium size separation nozzle plants (2.5×10^6 SWU/a, ~ 1000 MW) will equal the present USAEC standard of \$ 32 SWU if a 15 % increase in the actual separation effect can be realized. Assuming 30 % increase in the separation effect, the separative work charge in separation nozzle plants would figure below \$ 27 SWU. In these calculations, a cost exponent of 0.7 has been applied in extrapolating costs of cascade components beyond the range of flow rates (3×10^4 to 10^5 m³/h) actually realized. A variation of this exponent in the range from 0.75 (power station cost scale) to 0.6 is of no substantial influence on the results. Several examples of cascade realization synchronized to three different patterns of separative work requirements are compared on a numerical and a graphical basis with regard to their time-cost relationships. For the separation nozzle cascades under consideration so far, the differences resulting from the two different financial bases are in the order of 1 %.

As to the apparently advantageous cost figures for supersize enrichment plants, no special analysis has been made with respect to secondary cost handicaps depending on site conditions

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Die Leistungsdaten des Trenndüsenverfahrens	
1.1 Die Trenndüsenstufen	1
1.2 Die Trenndüsenkaskaden	2
1.3 Parametervariation der Leistungsdaten	3
2. Die Kostengrundlagen	
2.1 Die Anlagenkosten	4
2.2 Die Baukosten	5
2.3 Die Betriebskosten	5
2.4 Ermittlung der Trennarbeitskosten	6
3. Der Einfluß des Strompreises auf die Trennarbeitskosten	7
4. Die Investitionssummen und die mittleren Trennarbeitskosten bei verschiedenen Zubastrategien	8
Tabellen	10
Abbildungen	15
Literaturverzeichnis	20



Auf Veranlassung des Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft wurde eine Parameteruntersuchung zur Kostensituation des Trenndüsenverfahrens durchgeführt, die der besonderen "Studiengruppe des Beratenden EURATOM-Ausschusses auf dem Gebiet der Kernforschung (CCRN)" als Arbeitsunterlage bei der Bearbeitung der Fragen der langfristigen Versorgung mit angereichertem Uran zur Verfügung gestellt wurde.

Die in diesem Bericht vorgelegten Ergebnisse dürften weitgehend zutreffende Vergleiche der Kostensituation der verschiedenen Anreicherungsverfahren erlauben, es muß dennoch auf den vorläufigen Charakter der Zahlenangaben hingewiesen werden, da die exakten Kostenermittlungen durch den Industriepartner STEAG noch eine gewisse Zeit beanspruchen werden. In dem vorliegenden Bericht wurden alle verfügbaren Kostenabschätzungen mit Stand vom 1.4.1971 verwendet.

Als Vergleichsgrundlage dienen zwei in Abb. 1 wiedergegebene Varianten des zeitlichen Zubaus von jährlich $2 \cdot 10^6$ bzw. $1,2 \cdot 10^6$ TAE/a Trennarbeitskapazität innerhalb von fünf Jahren. Diese Zubauraten sind in Abb. 1 mit den derzeitigen Schätzungen für den europäischen und den deutschen Trennarbeitsbedarf der kommenden 15 Jahre verglichen.

1. Die Leistungsdaten des Trenndüsenverfahrens

1.1 Die Trenndüsenstufen

Der Entwicklungsstand des Trenndüsenverfahrens ist im Statusbericht 1971^{/1/} ausführlich dargestellt. Die dort als Planungsgrundlage für eine Demonstrationsanlage angenommenen Betriebsbedingungen und Trennleistung sind mit Prototyptrennelementen erreicht worden und werden in Kürze mit der Prototyp-Trennstufe von 10^5 m³/h Ansaugvolumen

demonstriert werden, deren mechanische Erprobung unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen zum Teil bereits abgeschlossen ist. Aus diesem Bericht ergeben sich folgende Berechnungsgrundlagen für Trenndüsen-Kaskaden beim Stand April 1971:

Verfahrensgas:	5 Mol-% UF_6 + 95 Mol-% leichtes Zusatzgas
Verfahrenstemperatur:	$T_0 = 40^\circ C$
Druck vor den Trenndüsen	$p_0 = 600$ Torr
Ansaugdruck des Verdichters	$p_M = 150$ Torr
Uran-Abschälverhältnis	$\frac{D}{U} = 0,333$
Elementarer Trenneffekt	$\epsilon_A = 0,015$

Für die Verfahrensverdichter wird ein isothermer Gesamtwirkungsgrad von 70 % und für den elektrischen Antrieb ein Wirkungsgrad von 95 % angesetzt. Für Hilfsanlagen etc. wird ein zusätzlicher Energiebedarf von 5 % der Kaskadenleistung berücksichtigt.

1.2 Die Trenndüsenkaskaden

Für den Aufbau der in diesem Teil der Studie behandelten Kaskaden wird das Blockschaltdbild der Demonstrationsanlage mit zwei Stufentypen zugrunde gelegt, die sich im Durchsatz um einen Faktor 3 unterscheiden. Eine Parallelschaltung von Stufen ist nicht vorgesehen⁺⁾ .

Als Auslegungspunkt der Trenndüsen-Kaskaden wird eine Produktkonzentration $n_p = 3$ % U^{235} und eine Abstreifkonzentration $n_w = 0,26$ % U^{235} gewählt. Diese Kaskaden sind in der Lage, gleichzeitig vier gleich große Produktströme mit den Konzentrationen $n_p = 3,3$ %, $2,6$ %, $2,4$ % und $2,2$ % zu liefern. Sie können bei Variation der Abstreifkonzentration $0,23$ % $\leq n_w \leq 0,27$ Produktströme am Kaskadenkopf im Bereich

⁺⁾ Kontrollrechnungen für einen Kaskadenaufbau mit 3 Stufentypen zeigen, daß bei der Kostenprogression von Trenndüsenanlagen die möglichen Kosteneinsparungen weniger als 5 % der Trennarbeitskosten betragen, wenn man die Entwicklungskosten für einen dritten Stufentyp unberücksichtigt läßt.

$2,2 \% \leq n_p \leq 3,6 \% U^{235}$ liefern mit Trennarbeitskosten, die weniger als 1 % über denen im Auslegungspunkt liegen.

1.3 Parameter-Variation der Leistungsdaten

Für die Parametervariation der Trennleistung der Trenndüsen wird in der vorliegenden Studie, in Übereinstimmung mit der Planungsgrundlage für die Demonstrationsanlage ^{/2/,/3/}, eine Verbesserung des Elementareffektes der Isotopentrennung ϵ_A bei unveränderten Betriebsbedingungen zugrunde gelegt. Dort konnte gezeigt werden, daß sich durch veränderte Betriebsbedingungen erzielbare Vorteile im Prinzip weitgehend auch durch entsprechende Erhöhungen des Trenneffektes ϵ_A bei unveränderten Betriebsbedingungen realisieren lassen ^{/2/}.

Unter Benutzung der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Kostengrundlage zeigt Abb. 2 die Abhängigkeit der Trennarbeitskosten von der Trennarbeitsleistung der Trenndüsenkaskaden. Die beiden unteren Kurven zeigen den Kostenverlauf für ϵ_A -Werte, die eine Verbesserung um etwa 15 % bzw. 30 % gegenüber dem augenblicklichen Entwicklungsstand beinhalten.

In Anbetracht der vorliegenden Kenntnisse des Entwicklungspotentials des Trenndüseneffektes ist die Wahl eines oberen Wertes $\epsilon_A = 0,02$ als das Entwicklungsziel der nächsten Jahre zu betrachten und wird den weiteren Rechnungen zugrunde gelegt. Beispielsweise würde eine Trenndüsenkaskade mit 120 Trennstufen von $10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ und 220 Trennstufen mit $3 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ Ansaugvolumen bei diesem Wert des Trenneffektes eine Trennarbeitsleistung $\Delta U = 2,5 \cdot 10^6 \text{ TAE/a}$ und eine elektrische Anschlußleistung von 950 MW aufweisen. Die wesentlichen Leistungsdaten dieser Anlage sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

2. Die Kostengrundlagen

2.1 Die Anlagenkosten

Aus den früheren Kostenermittlungen, Kostenschätzungen und industriellen Angebotsabgaben^{/4/,/5/} läßt sich für Trenndüsenanlagen eine mit dem Ansaugvolumen \dot{V} der Stufen als Potenz verlaufende Kostenprogression mit einem Wert des Exponenten $k = 0,7$ ableiten^{/2/}. Hierin sind sämtliche Anlagenkosten auf die Trennstufen gleicher Größe kumuliert zu einer pauschalen Kostenfunktion zusammengefaßt; die Werte der Konstanten wurden unter Benutzung der zum Berichtszeitpunkt vorliegenden Kostangaben^{/1/,/6/} und intern mitgeteilten, ergänzenden Angaben von STEAG ermittelt.

$$\begin{array}{l} \text{Pauschale Anlagenkosten} \\ \text{je Stufe mit } \dot{V} [\text{m}^3/\text{h}] \end{array} \quad K = 10^5 + 288 \left(\dot{V} [\text{m}^3/\text{h}] \right)^{0.7} \quad \text{DM/Stufe} \quad (1)$$

Diese Kostenfunktion enthält sämtliche Anlagenkosten, jedoch keine Planungskosten und Engineering, keine Bauaufsicht und keine Bauzinsen. Diese Kosten wurden bisher für Stufengrößen mit $3 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ und mit $10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ ermittelt, die Kostenangaben für Stufen mit größeren Durchsätzen stellen also eine Extrapolation unter Benutzung dieser Ausgangspunkte und des Exponenten $k = 0.7$ dar. Der Einfluß dieses Exponenten auf das Ergebnis der Rechnungen ist in Abb. 3 verdeutlicht. Der obere Wert $k = 0.75$ entspricht etwa der Kostenprogression im Kraftwerksbau. Da es aufgrund der Anlagenstruktur der Trennkaskaden als sicher anzusehen ist, daß ihr Kostenverlauf demgegenüber günstiger sein wird, erscheint die Wahl eines Wertes $k = 0.7$ als konservativ und es wird der weiteren Planungsarbeit überlassen bleiben festzustellen, ob nicht ein näher an $k = 0.6$ liegender Wert angesetzt werden kann.

Abb. 3 zeigt jedoch, daß die Unsicherheit in der Kostenextrapolation insgesamt relativ gering ist.

Unter Anwendung der Kostenfunktion (1) ergeben sich für die als Beispiel gewählte Anreicherungsanlage nach Tab. 1 Anlagenkosten von 575 Mio DM, die sich gemäß Tab. 3A und 3B auf die wesentlichen Untersysteme der Anlage verteilen.

2.2 Die Baukosten

Für die Erstellung von Trenndüsenkaskaden mit Stufendurchsätzen bis zu $3 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ wird eine Gesamtbauzeit von 3 Jahren angesetzt, für Stufengrößen bis $6 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ eine Bauzeit von 4 Jahren und für größere Anlagen werden 5 Jahre Bauzeit angesetzt.

Für die Kosten des Industrie-Architekten (Planung, Engineering und Bauaufsicht) wurde ein verhältnismäßig hoher Kostensatz von 10 % der Anlagenkosten in Ansatz gebracht. Die Bauzinsen werden der zu amortisierenden Baukostensumme zugeschlagen.

2.3 Die Betriebskosten

Der Berechnung der Betriebskosten wurden zwei von der EURATOM-Kommission vorgeschlagene Finanzierungsmodelle zugrunde gelegt, die beide einen Amortationszeitraum von 20 Jahren vorsehen und sich in den Zinssätzen und den Ansätzen für die Stromkosten unterscheiden. Die Finanzierungsgrundlage A entspricht dem EURATOM Vorschlag von 1969, die Finanzierungsgrundlage B wurde im Mai 1971 bekannt gegeben. Die Kostendaten dieser Finanzierungsgrundlagen sind in Tabelle 2 zusammen mit den übrigen Kostengrundlagen der vorliegenden Studie aufgeführt.

Für Instandhaltung und Wartung wurden 2,5 % der Anlagenkosten angesetzt und als Betriebsfond ein halber Monatsumsatz an Trennarbeitskosten veranschlagt. Es wird ein UF_6 -Vorrat von einem Monatsdurchsatz als notwendiger Lagerbestand vorgesehen und das Uraninventar der Kaskade einschließlich der UF_6 -Abscheidungsanlagen sowohl nach dem Trennwert als auch hinsichtlich seines Natururanäquivalentes bewertet. Der Betriebsfond und die Inventarsummen werden wie angegeben verzinst. Für die Personalkosten wurde ein mittlerer Wert von 25.000 DM/Jahr/Person angesetzt.

2.4 Ermittlung der Trennarbeitskosten

Mit den obigen Kostengrundlagen ergeben sich für das Anlagenbeispiel nach Tabelle 1 die in den Tabellen 3A und 3B aufgeführten Baukostensummen, Betriebsmittel und Betriebskosten. Die höheren Bauzinsen für den Fall A werden durch die niedrigere Annuität soweit überkompensiert, daß die Jahresbetriebskosten bei gleichem Strompreis um etwa 1,5 % unter denen des Falles B liegen, was sich unmittelbar auf die Trennarbeitskosten auswirkt. Diese Relation zwischen den beiden Finanzierungsbasen gilt praktisch für den gesamten Bereich der untersuchten Anlagengrößen, wie die zu Vergleichszwecken in Abb. 4 eingezeichneten Kurven beim Strompreis von 5 mils/kWh zeigen.

Die Trennarbeitskosten werden aus den Betriebskosten unter Ansatz der nominellen Trennarbeitsleistung ΔU der Kaskaden (Lastfaktor 1.0) berechnet. Das gleiche gilt für die Berechnung der spez. Investitionen aus der Baukostensumme.

3. Der Einfluß des Strompreises auf die Trennarbeitskosten

Der gravierende Unterschied zwischen den beiden vorgeschlagenen Finanzierungsgrundlagen liegt in den Ansätzen für die Energiekosten. Die Auswirkungen einer Variation zwischen 4 mils/kWh und 6.5 mils/kWh auf die Trennarbeitskosten sind für die Finanzierungsbasis B aus Abb. 4 ersichtlich. Die gestrichelt eingezeichnete Kurve für die Finanzierungsbasis A demonstriert die geringfügigen Unterschiede bei gleichem Strompreis. Je nach Anlagengröße würde eine Erhöhung der Energiekosten von 5 auf 6,5 mils/kWh (+30 %) einen Anstieg der Trennarbeitskosten um 15 % bis 20 % bewirken.

Das in den Finanzierungsgrundlagen angewandte Kriterium der Anschlußleistung bzw. des Energieverbrauchs für die Festlegung der Strompreise trifft in solcher Ausschließlichkeit jedoch keineswegs das Problem der Energieversorgung von Anreicherungsanlagen, denn hier können die Gesichtspunkte der Versorgungsgarantie und der Leistungsanpassung von eben so großem Einfluß sein. Nach den zur Zeit laufenden Untersuchungen der Betriebseigenschaften von Trenndüsenkaskaden ist zu erwarten, daß Trenndüsenanlagen in ihrem Leistungsbedarf in weiten Grenzen an das Energieangebot angepaßt werden können und eine unbedingte Versorgungsgarantie in Anbetracht der kurzen Einstellzeiten nicht erforderlich ist. Insofern kann man davon ausgehen, daß bei einer gegebenen Energiekostensituation der Strompreis für Trenndüsenanlagen an der unteren Grenze der Kostenstaffelungen einzuordnen ist.

Für die weiteren Untersuchungen wird ein Strompreis von 5 mils gemäß Finanzierungsbasis A zugrunde gelegt. Abweichungen nach oben oder unten lassen sich mit Hilfe der Abb. 4 ohne weiteres berücksichtigen.

4. Die Investitionssummen und die mittleren Trennarbeitskosten bei verschiedenen Zubaustrategien

Die Abb. 2 bis 4 zeigen die merkliche Reduktion der Produktionskosten mit wachsender Anlagengröße der Trenndüsenkaskaden, wie sie für Verfahren typisch ist, deren Anlagenkapazitäten durch die Vergrößerung der Komponenten ohne Parallelschaltungen erhöht werden können. Diese Möglichkeit dürfte für Trenndüsenkaskaden im untersuchten Leistungsbereich voll ausgenutzt werden können.

In dieser Studie werden jedoch nicht die indirekten Kostensteigerungen erfaßt, die sich oberhalb einer gewissen, standortbedingten Baugröße aus der elektrischen Versorgungsleistung und dem Kühlmittelbedarf der Anlagen ergeben. Diese Einflüsse könnten beispielsweise die beim Übergang von mittleren Anlagen mit $2...3 \cdot 10^6$ TAE/a (ca. 1000 MW) zu sehr großen Anlagen (10^7 TAE/a, 3800 MW) erzielbare Erniedrigung der Trennarbeitskosten um etwa 10 % soweit verringern, daß die Tendenz zu supergroßen Anlagen nicht mehr gegeben ist. Diese Aussagen müßten für das Trenndüsenverfahren jedoch erst in einer besonderen Untersuchung quantifiziert werden.

Für die im folgenden dargestellten Ergebnisse wird die Gültigkeit der Kostenfunktion (1) mit $k = 0.7$ vorausgesetzt (vgl. Abb. 3) und die Finanzierungsgrundlage A zugrunde gelegt.

In Tabelle 4 und in Abb. 5 sind unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten für die Varianten I und II zur Deckung des Trennarbeitsbedarfs nach Abb. 1 zusammengestellt. Die Tabelle 4 enthält neben Zahl und Trennarbeitskapazität ΔU der Anlagen ihre elektrische Anschlußleistung N und die Aufschlüsselung der ab Bauentscheidung anfallenden jährlichen Investitionskosten. Dabei sind die Jahre vor planmäßig vorgesehenem Produktionsbeginn

negativ gezählt. Daneben ist als Variante III ein Beispiel für den Zubau von Trenndüsenkaskaden aufgenommen, bei dem eine deutlich niedrigere Bedarfsteigerungsquote und ein dementsprechend längerer Zubauzeitraum angesetzt wurde und die Erstellung einer "Demonstrations-Anlage" eingeschlossen wurde. Diese Zubauvariante ist in Abb. 5 in Relation zu dem erwarteten Verlauf des deutschen Trennarbeitsbedarfs gesetzt. Für eine derartige Bedarfskurve würde der Kostenvorteil supergroßer Anlagen durch Zinsverluste bei Teillastbetrieb weiterhin verringert werden.

Zusammenfassend betrachtet zeigt die vorliegende Studie, daß bereits Trenndüsenanlagen mittlerer Baugröße (ca. $2,5 \cdot 10^6$ TAE/a, ca. 1000 MW) die derzeitigen Trennarbeitskosten der USAEC erreichen werden, wenn der elementare Trenneffekt um ca. 15 % gesteigert werden kann, und daß diese Kosten deutlich unterschritten werden, wenn der Trenneffekt um ca. 30 % erhöht wird.

a) Leistungsdaten der Trennstufen

Verfahrenstemperatur	$T_o = 40^{\circ}\text{C}$	
Verfahrensgas: 5 Mol-% UF_6 + 95 Mol-% leichtes Zusatzgas		
Druck vor den Trenndstufen	$p_o = 600 \text{ Torr}$	
Elementarer Trenneffekt	$\epsilon_A = 0,02$	
Uran-Abschälverhältnis	$\alpha_U = 0,333$	
Ansaugvolumen \dot{V}	$10^5 \text{ m}^3/\text{h}$	$3 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$
der Stufenverdichter		
Antriebsleistung	1,2 MW	3,6 MW
Trennarbeitsleistung	3560 TAE/a	10685 TAE/a

b) Leistungsdaten der Kaskade im Auslegungspunkt

Produktkonzentration	$n_p = 3,0 \% \text{ U}^{235}$	
Abstreifkonzentration	$n_w = 0,26 \%$	
Anzahl großer Stufen	220	
Anzahl kleiner Stufen	120	
Kaskadenwirkungsgrad	$\eta_K = 91 \%$	
Produktstromstärke	$P = 680 \text{ to U/a}$	$(3 \% \text{ U}^{235})$
Einspeisung	$F = 4150 \text{ to U}_{\text{nat}}/\text{a}$	
Trennarbeitsleistung	$\Delta U = 2,53 \cdot 10^6 \text{ TAE/a}$	
Uraninventar der Kaskade		22 to U
Trennarbeitswert des Inventars		$2,5 \cdot 10^4 \text{ TAE}$
Natururanäquivalent des Inventars		60 to U_{nat}
Einstellzeit beim erstmaligen Anfahren		2-3 Tage
Einstellzeit nach Vollabschaltung		ca. 1 h

Tabelle 1: Leistungsdaten einer Produktionsanlage mit $2,5 \cdot 10^6 \text{ TAE/Jahr}$ Trennarbeitsleistung mit 2 Stufengrößen (10^5 und $3 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$) bei $T_o = 40^{\circ}\text{C}$, $p_o = 600 \text{ Torr}$, $\epsilon_A = 0,02$.

<u>Finanzierungsgrundlage:</u>	A	B
Amortisationszeitraum	20 Jahre	20 Jahre
Verzinsung des Anlagenkapitals	7 % p.a.	8 % p.a.
Annuität für Anlagekapital	9,44 % p.a.	10,2 % p.a.
Verzinsung des Betriebskapitals, des Uraninventars und der Vor- räte, Bauzinsen	9 % p.a.	8 % p.a.
Stromkosten (über 500 MW)	5 mils/kWh	6,5 mils/kWh
Natururanpreis (als UF ₆)		20 \$/kg U _{nat}
Pauschale Anlagenkosten K je Trenn- stufe mit Ansaugvolumen \dot{V} [m ³ /h] (einschließlich Gebäude etc, ohne Engineering, ohne Bauzinsen)	$K = 10^5 + 288 \dot{V}^{0.7}$	[DM/Stufe]
Wartungskosten	2,5 % p.a. der Anlagenkosten	
Betriebskapital	0,5 Monatsumsatz	
Vorratshaltung	1 Monatsdurchsatz UF ₆	
Personalkosten (im Mittel)	25.000 DM/Jahr/Person	

Tabelle 2: Kostengrundlage für die Ermittlung der Trennarbeitskosten (Stand April 1971)

Anlagenkosten Produktions-Anlage $\Delta U = 2,5 \cdot 10^6$ TAE/a

Kaskade mit UF ₆ -Abscheidungen	265 Mio DM
Antriebssysteme und Energieversorgung	127 Mio DM
Kühlsystem (Flußwasser od. Kühlturm)	43 Mio DM
Meß- und Steuersystem	30 Mio DM
Gebäude mit Hilfsanlagen	110 Mio DM
	<hr/>
	575 Mio DM
Planung, Engineering, Bauaufsicht	58 Mio DM
Bauzinsen (Bauzeit 3 Jahre, 9 % p.a.)	85 Mio DM
	<hr/>
Baukosten insges.	718 Mio DM

<u>Energiebedarf:</u>	Trennstufen	905 MW
	Hilfsanlagen	45 MW
		<hr/>
		950 MW

<u>Betriebsmittel:</u>	Uraninventar	7 Mio DM
	Natururanvorrat 350toU	25 Mio DM
	Betriebskapital	10 Mio DM
		<hr/>
		42 Mio DM

Jahresbetriebskosten:

Annuität 9,44 % auf Baukostensumme	67,8 Mio DM/Jahr
Wartungskosten	14,4 Mio DM/Jahr
Personalkosten	7,5 Mio DM/Jahr
Energiekosten	152,5 Mio DM/Jahr
Zinsen für Betriebsmittel (9 % p.a.)	3,9 Mio DM/Jahr
	<hr/>
	246,1 Mio DM/Jahr

Spez. Energieverbrauch: 3290 kWh/TAE

Spez. Investitionen: 283,5 DM/TAE/a
77,4 \$/TAE/a

Trennarbeitskosten: 97,2 DM/TAE
26,5 \$/TAE

Tabelle 3A: Kostenaufschlüsselung einer Trenndüsenkaskade mit $\Delta U = 2,5 \cdot 10^6$ TAE/a gem. Tab. 1 auf der Kostenbasis (April 1971) gem. Tab. 2 ($\epsilon_A = 0,002$, 220 Stufen mit $3 \cdot 10^5$ m³/h, 120 Stufen mit 10^5 m³/h, $p_o = 600$ Torr Strompreis 5 mils/kWh; 1 \$ = 3,66 DM)

Finanzierungsbasis A

Anlagenkosten Produktions-Anlage $\Delta U = 2,5 \cdot 10^6$ TAE/a

Kaskade mit UF_6 -Abscheidungen	265 Mio DM
Antriebssysteme und Energieversorgung	127 Mio DM
Kühlsystem (Flußwasser od. Kühlturm)	43 Mio DM
Meß- und Steuersystem	30 Mio DM
Gebäude mit Hilfsanlagen	110 Mio DM
	<hr/>
	575 Mio DM
Planung, Engineering, Bauaufsicht	58 Mio DM
Bauzinsen (Bauzeit 3 Jahre, 8 % p.a.)	76 Mio DM
	<hr/>
	709 Mio DM

<u>Energiebedarf:</u> Trennstufen	905 MW
Hilfsanlagen	45 MW
<u>Betriebsmittel:</u> Uraninventar	7 Mio DM
Natururanvorrat 350 to U	25 Mio DM
Betriebskapital	10 Mio DM
	<hr/>
	42 Mio DM

Jahresbetriebskosten:

Annuität 10,2 % auf Baukostensumme	72,2 Mio DM/Jahr
Wartungskosten	14,4 Mio DM/Jahr
Personalkosten	7,5 Mio DM/Jahr
Energiekosten	152,5 Mio DM/Jahr
Zinsen für Betriebsmittel (8 % p.a.)	3,4 Mio DM/Jahr
	<hr/>
	250,1 Mio DM/Jahr

Spez. Energieverbrauch: 3290 kWh/TAE

Spez. Investitionen: 279,9 DM/TAE/a
76,5 $\%$ /TAE/a

Trennarbeitskosten: 97,7 DM/TAE
27,0 $\%$ /TAE

Tabelle 3B: Kostenaufschlüsselung einer Trenndüsenkaskade mit $\Delta U = 2,5 \cdot 10^6$ TAE/a gem. Tab. 1 auf der Kostenbasis (April 1971) gem. Tab. 2 ($\epsilon_A = 0,02$, 220 Stufen mit $3 \cdot 10^5$ m³/h, 120 Stufen mit 10^5 m³/h, $p_0 = 600$ Torr, Strompreis 5 mils/kWh; 1 $\%$ = 3,66 DM)

Finanzierungsgrundlage B

Variante	Ia			Ic			IIa			IIb			III					
	ΔU (TAE/a)	N (MW)	Invest. (MioDM)	ΔU (TAE/a)	N (MW)	Invest. (MioDM)	ΔU (TAE/a)	N (MW)	Invest. (MioDM)	ΔU (TAE/a)	N (MW)	Invest. (MioDM)	ΔU (TAE/a)	N (MW)	Invest. (MioDM)			
Anlage 1	10^7	3800	2000	$2,5 \cdot 10^6$	950	760	$6 \cdot 10^6$	2280	1400	$3 \cdot 10^6$	1140	860	$8,5 \cdot 10^5$	320	360			
Anlage 2				$2,5 \cdot 10^6$	950	760				$3 \cdot 10^6$	1140	860	$2,6 \cdot 10^6$	990	780			
Anlage 3				$5 \cdot 10^6$	1900	1250							$2,6 \cdot 10^6$	990	780			
Zeitpunkt	Produktion		Investitionen		Produktion		Investitionen		Produktion		Investitionen		Produktion		Investitionen			
Jahr	(TAE/a)		(MioDM/a)		(TAE/a)		(MioDM/a)		(TAE/a)		(MioDM/a)		(TAE/a)		(MioDM/a)			
-4			100				125											
-3			400				375		100			50			140			
-2			350				600		400			300			100			
-1			350				600		300			250			140			
1			400		$2 \cdot 10^6$		400		400		$1,2 \cdot 10^6$	400		$8,5 \cdot 10^5$	280			
2	$4 \cdot 10^6$		400		$4 \cdot 10^6$		300		$2,4 \cdot 10^6$		$3,0 \cdot 10^6$	350		$8,5 \cdot 10^5$	200			
3	$8 \cdot 10^6$		-		$5 \cdot 10^6$		250		$4,8 \cdot 10^6$		$3,0 \cdot 10^6$	270		$8,5 \cdot 10^5$	280			
4	$8 \cdot 10^6$		-		$9 \cdot 10^6$		120		$4,8 \cdot 10^6$		$4,8 \cdot 10^6$	100		$3,45 \cdot 10^6$	280			
5	10^7		-		10^7				$6,0 \cdot 10^6$		$6,0 \cdot 10^6$			$3,45 \cdot 10^6$	200			
6														$3,45 \cdot 10^6$	260			
7														$6,05 \cdot 10^6$	40			
Insgesamt	$3 \cdot 10^7$ TAE 2000			$3 \cdot 10^7$ TAE 2770			$1,8 \cdot 10^7$ TAE 1400			$1,8 \cdot 10^7$ TAE 1720			$1,9 \cdot 10^7$ TAE 1920 MioDM					
Spez. Investitionen:	200 DM/TAE/a (54,6)			277	(75,7)			233	(63,7)			287	(78,4)			317	(87 ¢/TAE/a)	
Trennarbeitskosten:																		
Finanzgrundlage: (A)	85 DM/TAE (23,2)			93,3	(25,5)			88,9	(24,3)			95,2	(26,0)			100	(27,4 ¢/TAE)	
Finanzgrundlage: (B)	86 DM/TAE (23,5)			94,8	(25,9)			90	(24,6)			96,7	(26,3)			102	(27,9 ¢/TAE)	

Tabelle 4: Zusammenstellung der jährlichen Trennarbeitskosten, der jährlichen Investitionssummen, und der Trennarbeitskosten für verschiedene Varianten des Zubaus von Trenndüsen-Kaskaden. (Strompreis 5 mils/kWh; 1 ¢ = 3,66 DM)

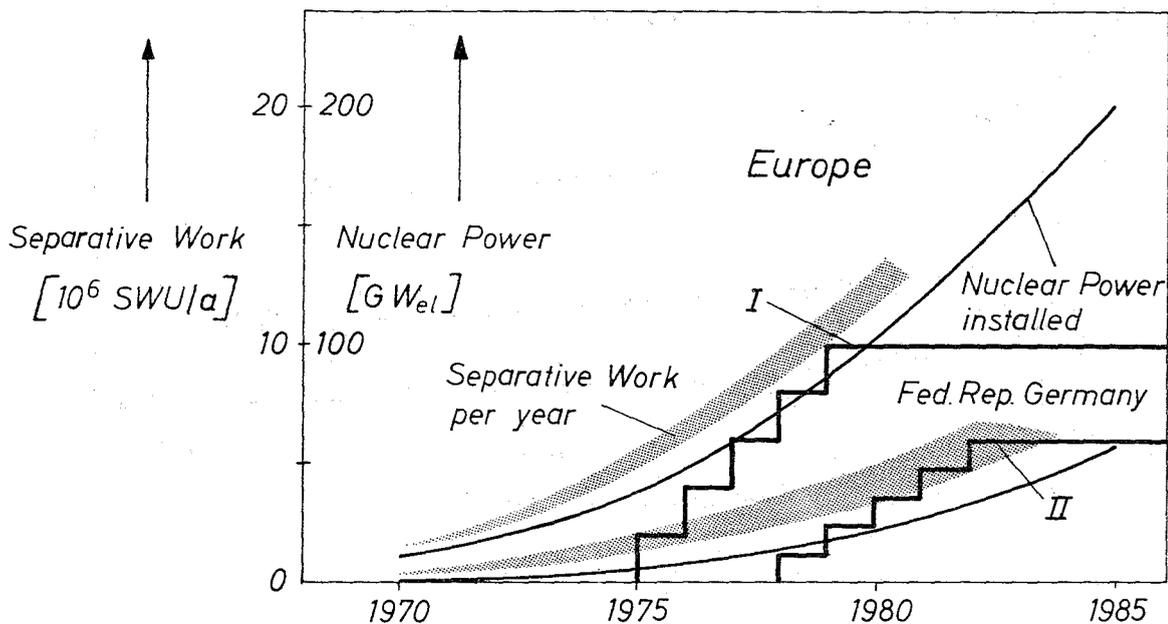


Abb. 1: Der für den Vergleich der verschiedenen U^{235} -Anreicherungs-Verfahren geforderte Zeitverlauf der jährlichen Trennarbeitserzeugung.
Variante I: Zuwachs $2 \cdot 10^6$ TAE/a jährlich über 5 Jahre.
Variante II: Zuwachs $1,2 \cdot 10^6$ TAE/a jährlich über 5 Jahre.
Zum Vergleich sind die Schätzungen für den europäischen und den deutschen Bedarf an Kernenergie-Erzeugung und Trennarbeitsleistung angegeben
(Nach: "Industrielle Aspekte des Atomaren Brennstoffkreislaufs in Europa", 4. Foratom Kongress, Stockholm (1970)).

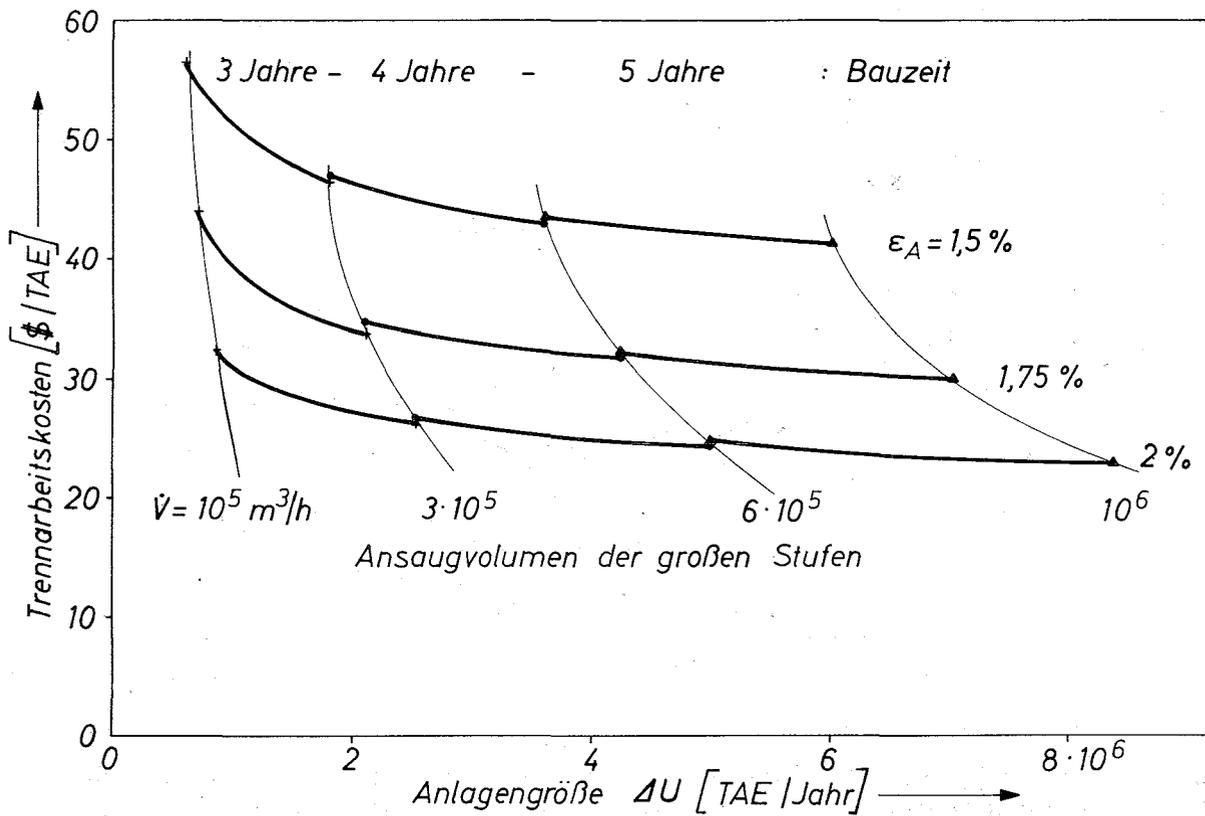


Abb. 2: Die Abhängigkeit der Trennarbeitskosten von Trenndüsenkaskaden vom elementaren Trenneffekt ϵ_A . Kaskaden mit 2 Stufentypen, die kleineren Stufen haben ein Drittel des Durchsatzes der großen Stufen.

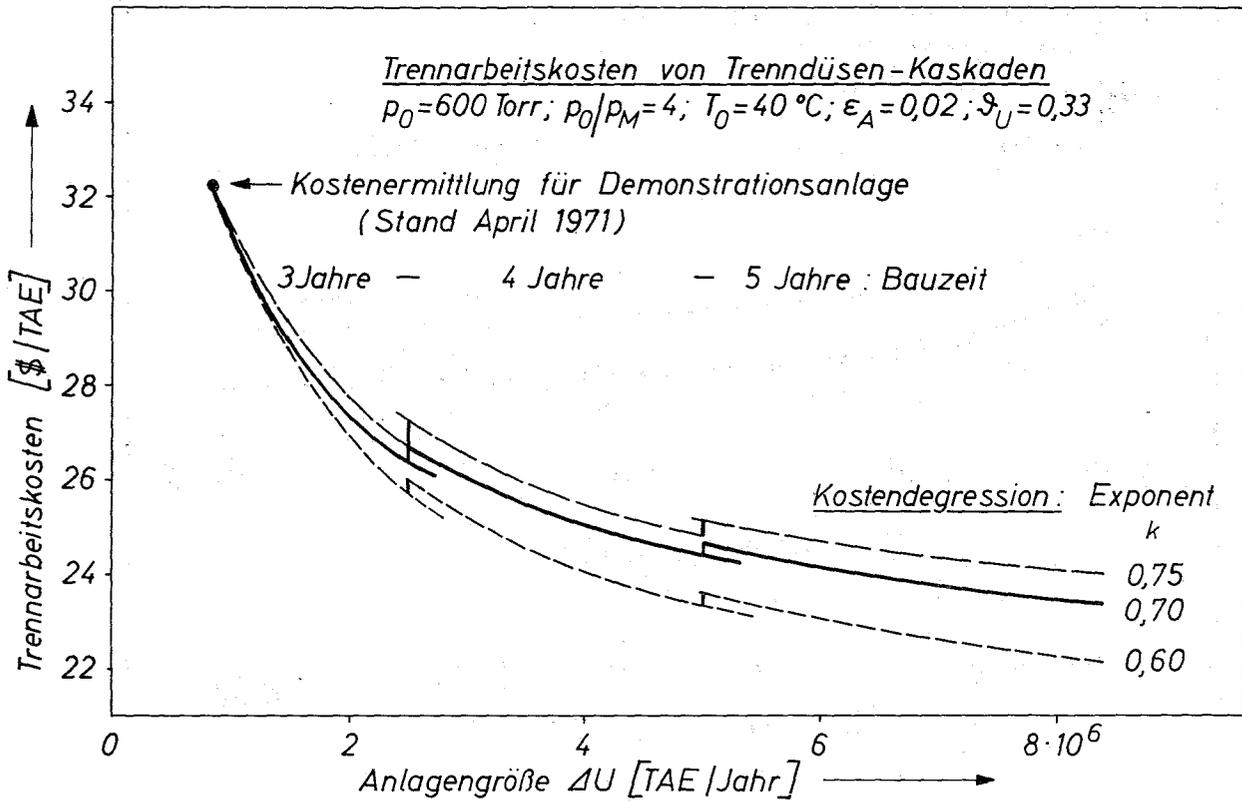


Abb. 3: Abhängigkeit der Trennarbeitskosten von Trenndüsen-Kaskaden vom Exponenten der Kostenfunktion $K_{\text{Anlage}} = \sum S_i (F + C \cdot \dot{V}_i^k)$.
 S_i Anzahl der Stufen mit dem Ansaugvolumen \dot{V}_i .

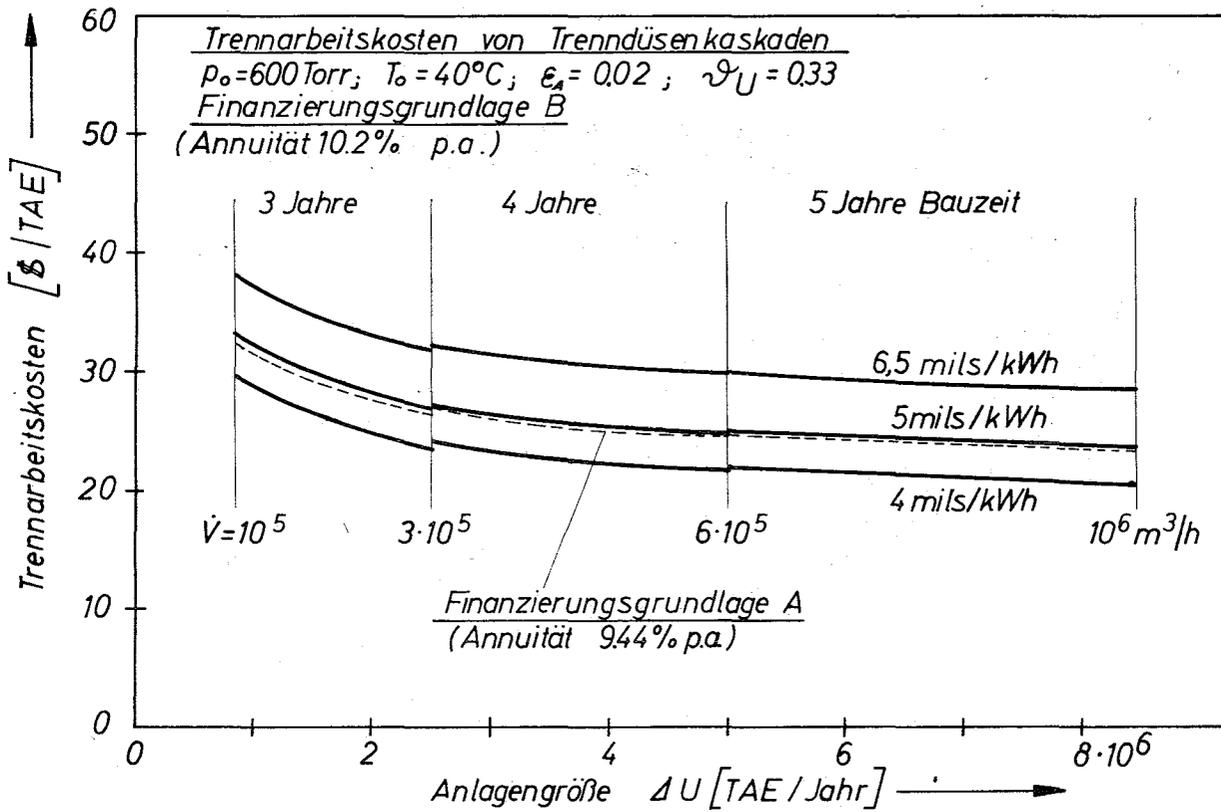


Abb. 4: Die Trennarbeitskosten von Trenndüsenkaskaden in Abhängigkeit von Strompreis und von der Anlagengröße ΔU .

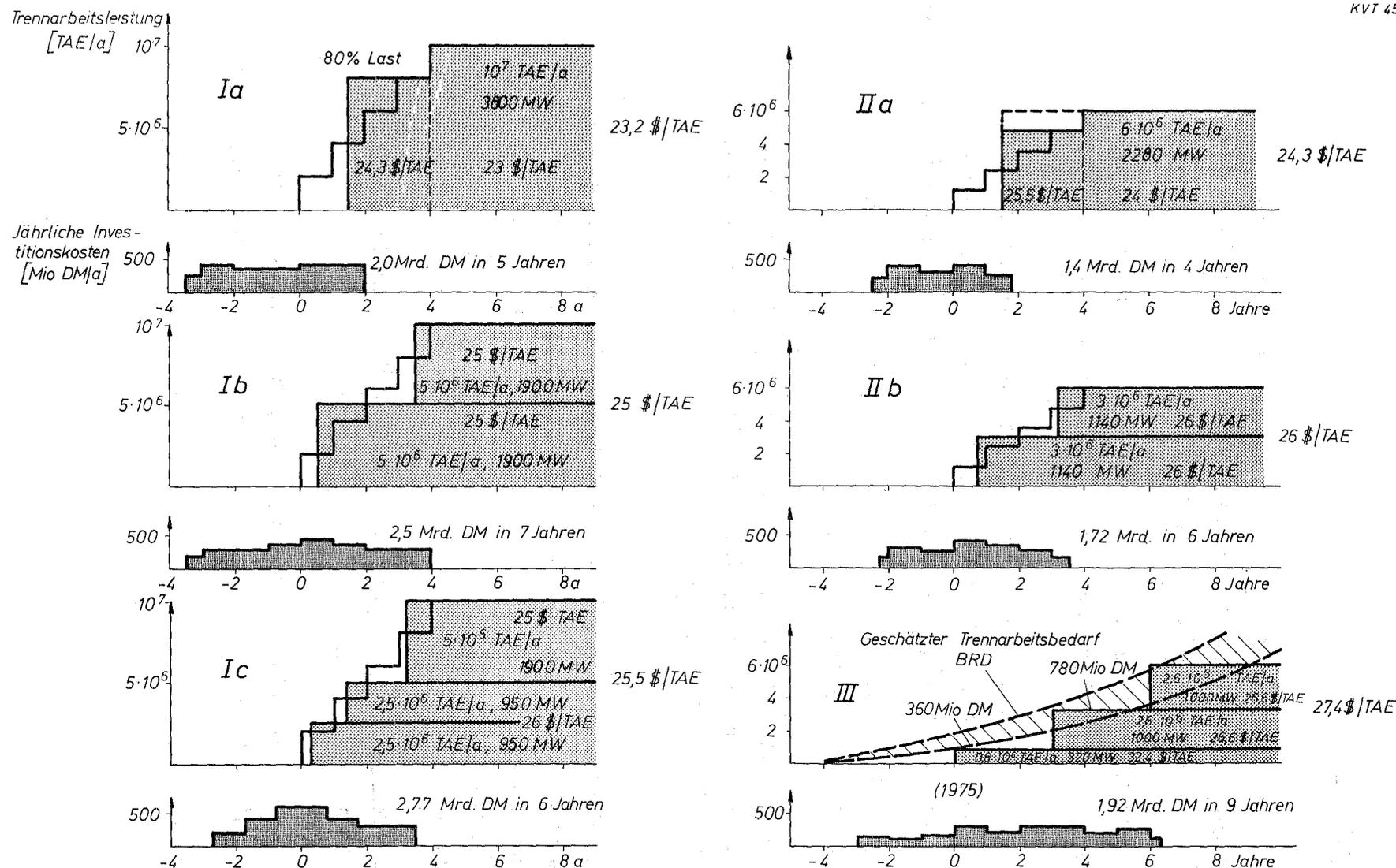


Abb. 5: Zeit/Kosten-Relationen für verschiedene Varianten des Zubaus von Trenndüsenkaskaden. Finanzierungsgrundlage A: 20 Jahre Amortisation 7 % p.a.; Bauzinsen etc. 9 % p.a.; Strompreis 5 mils/kWh. (Kosten 1971; 1 \$ = 3,66 DM).

Literatur:

Eine zusammenfassende Darstellung des Trenndüsenverfahrens mit einer Aufstellung der früheren Veröffentlichungen findet sich in

E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel;
Angew. Chemie Internat. Edit. 6, 507 (1967)

- /1/ Projekt Trenndüsenverfahren: Interner Statusbericht des Instituts für Kernverfahrenstechnik 1971, Ges. für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe (1971) (Unveröffentlicht)
- /2/ E.W. Becker, W. Bier, G. Frey, R. Schütte; Z. Atomwirtschaft 14, 249 (1969)
- /3/ R. Schütte: Planungsgrundlage für die Projektierung einer Demonstrationsanlage des Trenndüsenverfahrens. (1970) (Unveröffentlicht).
- /4/ E.W. Becker, W. Bier, R. Schütte, Principles and Economic Aspects of the Separation Nozzle Process. Symposium on the "Problems Bearing on the Isotope Separation of Uranium", Turin (1968); KFK-Bericht 853 (1968)
- /5/ E.W. Becker: The Separation Nozzle Process for Uranium Enrichment, KFK-Bericht 1002 (1969)
- /6/ Projekt Trenndüsenverfahren: Interner Statusbericht der STEAG AG 1971, STEAG AG, Essen (1971) (Unveröffentlicht)