

**KfK 3665
März 1984**

**Untersuchungen zum
Betriebsverhalten von
Trenndüsenkaskaden zur
Anreicherung von Uran-235 an
einer 10-stufigen Versuchsanlage**

**P. Bley, A. S. Câmara, R. Consiglio,
H. Hein, G. Linder, R. Yadoya
Institut für Kernverfahrenstechnik**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 3665

UNTERSUCHUNGEN ZUM BETRIEBSVERHALTEN VON TRENNDÜSENKASKADEN ZUR
ANREICHERUNG VON URAN-235 AN EINER 10-STUFIGEN VERSUCHSANLAGE

von

P. Bley, A.S. Câmara*, R. Consiglio* ,
H. Hein, G. Linder, R. Yadoya*

* Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear CDTN/NUCLEBRAS,
30 000 Belo Horizonte, Brasilien

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

UNTERSUCHUNGEN ZUM BETRIEBSVERHALTEN VON TRENNDÜSENKASKADEN ZUR ANREICHERUNG VON URAN-235 AN EINER 10-STUFIGEN VERSUCHSANLAGE

Zusammenfassung

Das vom Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelte Trenndüsenverfahren beruht auf der Massenabhängigkeit der Zentrifugalkraft in einem gekrümmten Strahl aus Uranhexafluorid und einem leichten Zusatzgas. Zur experimentellen Bestimmung des Betriebs- und Regelverhaltens von Trenndüsenkaskaden wurde früher eine 10-stufige Pilot-Anlage errichtet. Im Rahmen des deutsch-brasilianischen Vertrages über die wissenschaftliche Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Urananreicherung wurde diese Anlage als Schenkung in das Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) in Belo Horizonte transferiert.

Die früher mit Einzelumlenksystemen ausgerüstete Anlage wurde auf den Betrieb mit den für kommerzielle Anlagen vorgesehenen Doppelumlenksystemen umgestellt. Mit dieser Anlage wurde im CDTN ein in der Zwischenzeit entwickeltes, verbessertes Steuerungskonzept für Trenndüsenkaskaden mit Einzel- und Doppelumlenksystemen experimentell überprüft und optimiert.

Ein Vergleich des experimentellen und mit Simulationsprogrammen berechneten Betriebsverhaltens bestätigte auch für Kaskaden mit Doppelumlenksystemen die gute Simulationstreue der entwickelten Computerprogramme.

INVESTIGATIONS INTO THE OPERATING BEHAVIOR OF SEPARATION NOZZLE CASCADES FOR URANIUM-235 ENRICHMENT IN A 10-STAGE PILOT PLANT

Abstract

The separation nozzle method developed by the Karlsruhe Nuclear Research Center is based on the centrifugal force in a curved jet consisting of uranium hexafluoride and a light auxiliary gas. To determine in experiments the operating and controlling behavior of separation nozzle cascades a 10-stage pilot plant was erected some years ago. This plant was transferred to the Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) in Belo Horizonte as a donation made within the framework of the German-Brazilian Agreement on scientific cooperation in the field of uranium enrichment.

The plant previously equipped with single deflection systems was modified to operate with the double deflection system envisaged for commercial plants. A controlling concept meanwhile developed and improved for separation nozzle cascades equipped with single and double deflection systems was verified experimentally and optimized at the pilot plant of the CDTN.

A comparison of the experimental operating behavior with the operating behavior calculated by simulation programs has confirmed the faithfulness of simulation of the computer codes developed to apply to cascades with double deflection systems as well.

Einleitung und Aufgabenstellung

Zur Anreicherung des leichten Uranisotops ^{235}U wurde im Kernforschungszentrum Karlsruhe das Trenndüsenverfahren als Alternative zum Gasdiffusionsverfahren und zum Zentrifugenverfahren entwickelt /1/. Beim Trenndüsenverfahren beruht die Entmischung der Uranisotope auf der Massenabhängigkeit der Zentrifugalkraft in einer schnellen gekrümmten Strömung aus gasförmigem Uranhexafluorid und einem leichten Zusatzgas (Abb. 1). Der relativ große Stufentrennfaktor in Kombination mit einem praktisch unbeschränkten Stufendurchsatz erlaubt den Bau kommerzieller Trenndüsenanlagen mit verhältnismäßig niedrigen spezifischen Investierungskosten. Eine besonders wirtschaftliche Produktion von angereichertem Uran ist möglich, wenn billiger elektrischer Strom zur Verfügung steht.

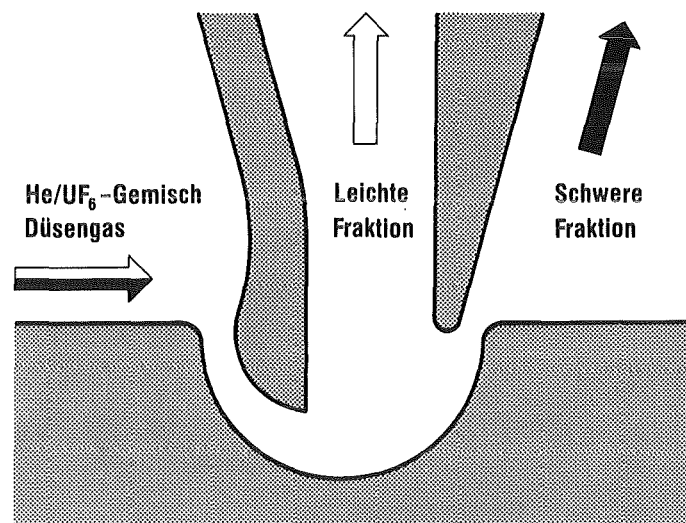


Abb. 1: Prinzip des Trenndüsenverfahrens mit Einzelumlenkdüsen

Seit 1970 beteiligt sich die STEAG Aktiengesellschaft, Essen, an der Industrialisierung dieses Anreicherungsverfahrens. Im Jahre 1975 hat Brasilien das Trenndüsenverfahren als Grundlage für die Anreicherung seiner inzwischen auf über 250 000 t geschätzten Uranvorräte gewählt. Durch gemeinsame Anstrengungen soll die Technologie des Trenndüsenverfahrens weiter entwickelt werden. Der brasilianische Partner in dieser Zusammenarbeit ist Empresas Nucleares Brasileiras, S.A. (Nuclebrás) /2/.

Seit 1979 ist im Bundesstaat von Rio de Janeiro in Resende eine aus 24 technischen Trennstufen bestehende sogenannte Vorlaufkaskade im Bau, die mit den in Abb. 1 gezeigten Einzelumlenkdüsen arbeiten wird. Nach Erprobung der 1985 in Betrieb gehenden Vorlaufkaskade soll dann mit einer schrittweisen Realisierung einer bei einem wesentlich höheren Einlaßdruck arbeitenden Produktionsanlage begonnen werden /3/. Zur Verminderung der erforderlichen Stufenzahl sind dabei die in Abb. 2 gezeigten Trenndüsen-systeme mit zweifacher Strahlumlenkung /4/ vorgesehen. Wie aus Abb. 2 weiter hervorgeht, wird beim Doppelumlenksystem die schwere Fraktion einer ersten Trenndüse in einer direkt angeschlossenen zweiten Trenndüse einer weiteren Trennung unterzogen, so daß insgesamt drei Fraktionen entstehen. Die mittlere Fraktion, deren Isotopenverhältnis etwa dem des in der ersten Düse eingespeisten Gases entspricht, wird innerhalb der Trennstufe auf die Ansaugseite des Verdichters zurückgeleitet.

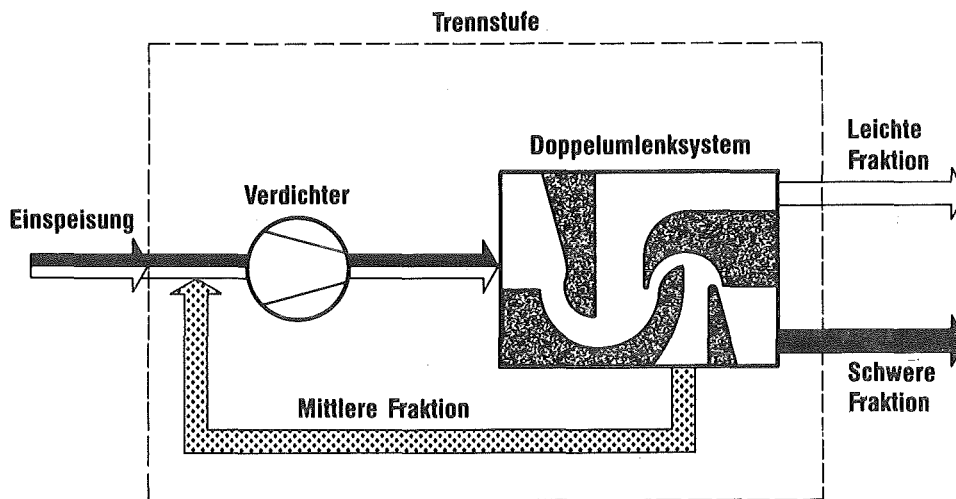


Abb. 2: Prinzip des Trenndüsenverfahrens mit Doppelumlenkdüsen

Zur Untersuchung des Betriebsverhaltens von Trenndüsenkaskaden wurde 1967 im Kernforschungszentrum Karlsruhe eine aus 10 Stufen bestehende Pilot-Anlage errichtet /5/. Um die Investierungs- und Betriebskosten klein zu halten, arbeitet sie mit wesentlich niedrigeren Drucken und Stufendurchsätzen als technische Trenndüsenanlagen. Mit dieser Pilot-Anlage, die mit den in Abb. 1 gezeigten Einfachumlenkssystemen ausgerüstet war, wurde das stabile Betriebsverhalten von Trenndüsenkaskaden auch bei aufgeprägten Störungen demonstriert. Weiterhin wurden Digitalrechner-Programme entwickelt, mit denen das stationäre wie auch das instationäre Betriebsverhalten berechnet werden können und deren Simulationsgenauigkeit für Einzelumlenkssysteme im Vergleich mit den Experimenten an der 10-stufigen Pilot-Anlage nachgewiesen werden konnte /6/.

Im Rahmen des deutsch-brasilianischen Vertrages über die wissenschaftliche Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Urananreicherung und der Einzelabmachung zwischen dem Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) und Empresas Nucleares Brasileiras, S.A. (Nuclebrás) wurde 1979 die 10-stufige Pilot-Anlage als Schenkung in das Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN, Zentrum für die Entwicklung der Nuklear-Technologie der Nuclebrás) nach Belo Horizonte transferiert.

Mit der Anlage wird im CDTN ein in der Zwischenzeit entwickeltes, verbessertes Steuerungskonzept für Trenndüsenkaskaden mit Einzel- und Doppelumlenkdüsen experimentell überprüft und optimiert. Über die bisher erzielten Ergebnisse wird im folgenden kurz berichtet.

Transfer und Umbau der Pilot-Anlage

Im Januar 1979 kamen 6 brasilianische Wissenschaftler und Techniker der Nuclebrás, die als Betreiber der Pilot-Anlage ausgewählt worden waren, für 10 Monate ins Kernforschungszentrum Karlsruhe. Während ihres Aufenthalts im Institut für Kernverfahrenstechnik wurden sie entsprechend ihrer beruflichen Ausbildung in den verschiedenen Abteilungen des IKVT ausgebildet und mit dem Betrieb und der Wartung der 10-stufigen Pilot-Anlage vertraut gemacht. Zusätzlich wurden Modernisierungs- und

Umbauarbeiten vorgenommen, um die Pilot-Anlage an das brasilianische Netz (60 Hz, 127 V) anschließen zu können. Auch wurde zur Bestimmung der UF_6 -Konzentrationen die Anlage mit weiterentwickelten Meßgeräten, den sogenannten α -Ionisationsdetektoren, ausgerüstet, die auch in der Vorlaufkaskade eingesetzt werden.

Im Oktober 1979 wurde die Pilot-Anlage unter Leitung von Herrn Dipl.-Ing. E. Priess nach Belo Horizonte transferiert und unter Mithilfe von zwei Mitarbeitern des KfK mit dem Aufbau der Pilot-Anlage im CDTN in Belo Horizonte begonnen. Die Aufbauarbeiten der Pilot-Anlage gingen sehr zügig voran und wurden im Mai 1980 beendet. Abb. 3 zeigt eine Aufnahme der Pilot-Anlage in der erweiterten und modernisierten Versuchshalle im CDTN.

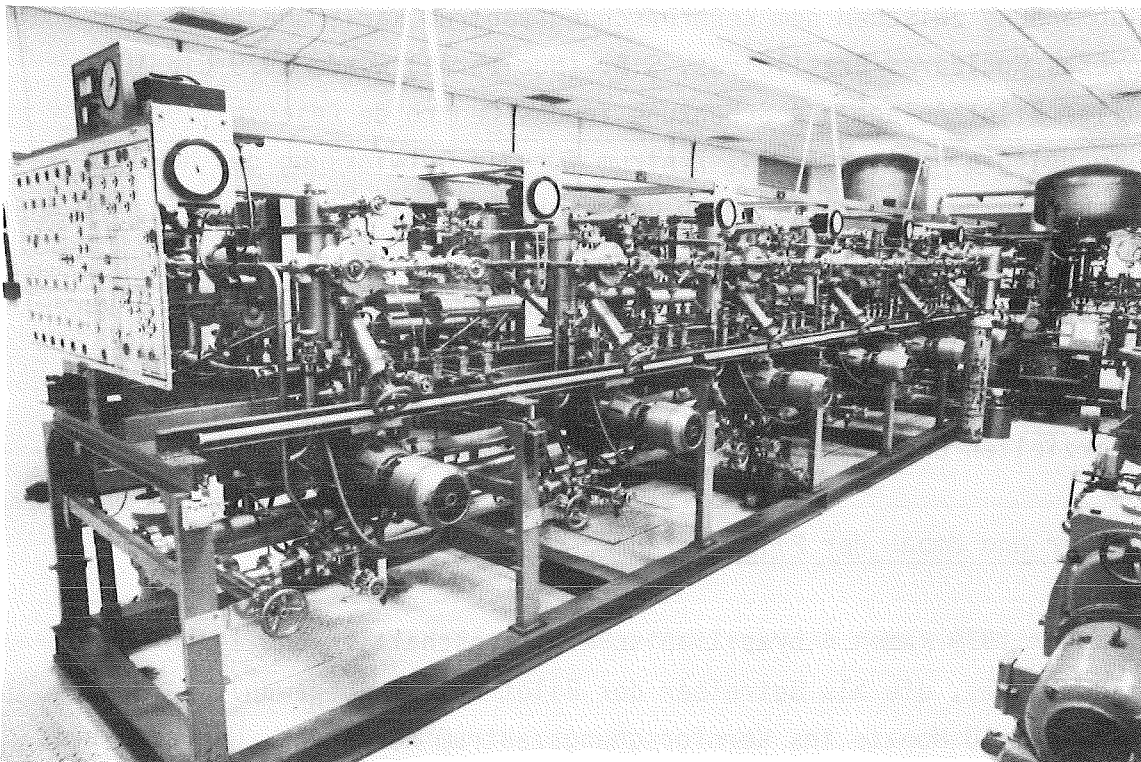


Abb. 3: Pilot-Anlage in der erweiterten und modernisierten Versuchshalle im CDTN in Belo Horizonte.

Im Juni 1980 konnte die mit Einfachumlenksystemen ausgerüstete Pilot-Anlage in den Sollbetriebspunkt eingeregelt werden.

In der Folgezeit wurde die Pilot-Anlage mit Doppelumlenksystemen ausgerüstet. Die 10 Trennelemente für die Pilot-Anlage wurden von der Firma Siemens, München, nach dem Formätzverfahren hergestellt. Bei diesem Verfahren, das speziell für die Herstellung der wesentlich kleineren technischen Trennelemente entwickelt worden war, wurde die Struktur der Doppelumlenksysteme in eine 0,1 mm starke Cu-Be-Folie geätzt und durch Stapeln von 250 Folien schlitzförmige Trennelemente erzeugt. Abb. 4 zeigt eine vergrößerte Aufnahme einer Einzelfolie mit den geätzten Feinstrukturen der Doppelumlenksysteme und den Kanälen für die Zu- und Abfuhr der verschiedenen Fraktionen. Durch diese industrielle Fertigungsmethode der Trennelemente konnte die Exemplarsteuerung der 10 Trennelemente der Pilot-Anlage sehr klein gehalten werden.

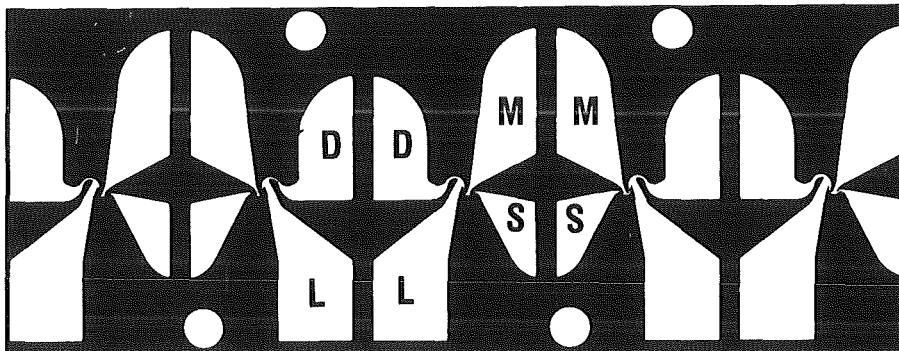


Abb. 4: Vergrößerte Aufnahme einer Einzelfolie mit den geätzten Doppelumlenksystem-Feinstrukturen und den Kanälen für die Zu- und Abfuhr der Gasströme. (D = Düsengas, L, M, S = leichte, mittlere und schwere Fraktion, Foliendicke 0,1 mm, Maßstab 1,5:1).

Die Umlenkradien der Doppelumlenksysteme betragen 0,75 mm für die erste Düse und 0,4 mm für die zweite Düse. Die Schlitzlänge pro Stufe beträgt 125 mm. Die Trenndüsen werden im Auslegungspunkt mit einem UF_6/He -Gemisch mit 4,2 Mol-% UF_6 betrieben, der Düsenvordruck beträgt im Auslegungspunkt 35 mbar, das Expansionsverhältnis 2,5.

Der Umbau der Pilot-Anlage wurde so durchgeführt, daß mit dem Wechsel der Trennelemente im wesentlichen nur ein Austausch eines Teils der Trennelementkammer und die Montage verschiedener Rohrleitungen notwendig wurde. Zur Anpassung der Meßtechnik an die geänderten Trennelemente und zur Erprobung des neuen Steuerungskonzeptes mußten an den beiden Enden der Kaskade im CDTN umfangreiche Umbauten durchgeführt werden.

Funktion der Pilot-Anlage

In Abb. 5 ist das Fließschema der mit Doppelumlenksystemen ausgerüsteten Pilot-Anlage dargestellt. Für die Pilot-Anlage wurde wegen der einfachen Schaltung ein UF_6 -Abschälverhältnis $\mathcal{N}_u = 0,5$ (symmetrische Kaskadenschaltung) gewählt. Dabei wird die leichte Fraktion in die kaskadenaufwärts gelegene und die schwere Fraktion zur kaskadenabwärts gelegenen Nachbarstufe geführt, während die mittlere Fraktion vor den Verdichter derselben Stufe zurückgeführt wird.

Da aufgrund der starken Entmischung zwischen dem UF_6 und dem leichten Zusatzgas in der Kaskade ein Aufwärtstransport an Helium entsteht, muß dieser am Kaskadenkopf entnommen und an den Fuß der Kaskade zurückgeführt werden. Zur Trennung von UF_6 und Helium wird die leichte Fraktion der obersten Stufe mit Hilfe von zwei Sonderverdichtern über zyklisch arbeitende Tieftemperaturabscheider geführt, in denen das UF_6 ausgefroren wird. Aus einem UF_6 -Vorratsbehälter wird in die oberste Stufe gerade soviel UF_6 zurückgespeist, daß sich zusammen mit einem He-Rückstrom die Stromstärke und UF_6 -Konzentration einer "schweren Fraktion", S^* , ergibt. Zur Vereinfachung der Versuchsdurchführung wird das im Tieftemperaturabscheider abgeschiedene UF_6 durch neues UF_6 aus dem Vorratsbehälter ersetzt. Dadurch wird die Isotopenzusammensetzung am Kaskadenkopf aufgeprägt und es ergibt sich eine Anreicherung des schweren Isotops am Kaskadenfuß. Diese Arbeitsweise der Versuchsanlage entspricht dem Abstreifteil einer Produktionsanlage. Am Kaskadenfuß wird die schwere Fraktion vor dieselbe Stufe zurückgeführt und bildet mit dem geregelten Heliumrückstrom die Stromstärke und UF_6 -Konzentration

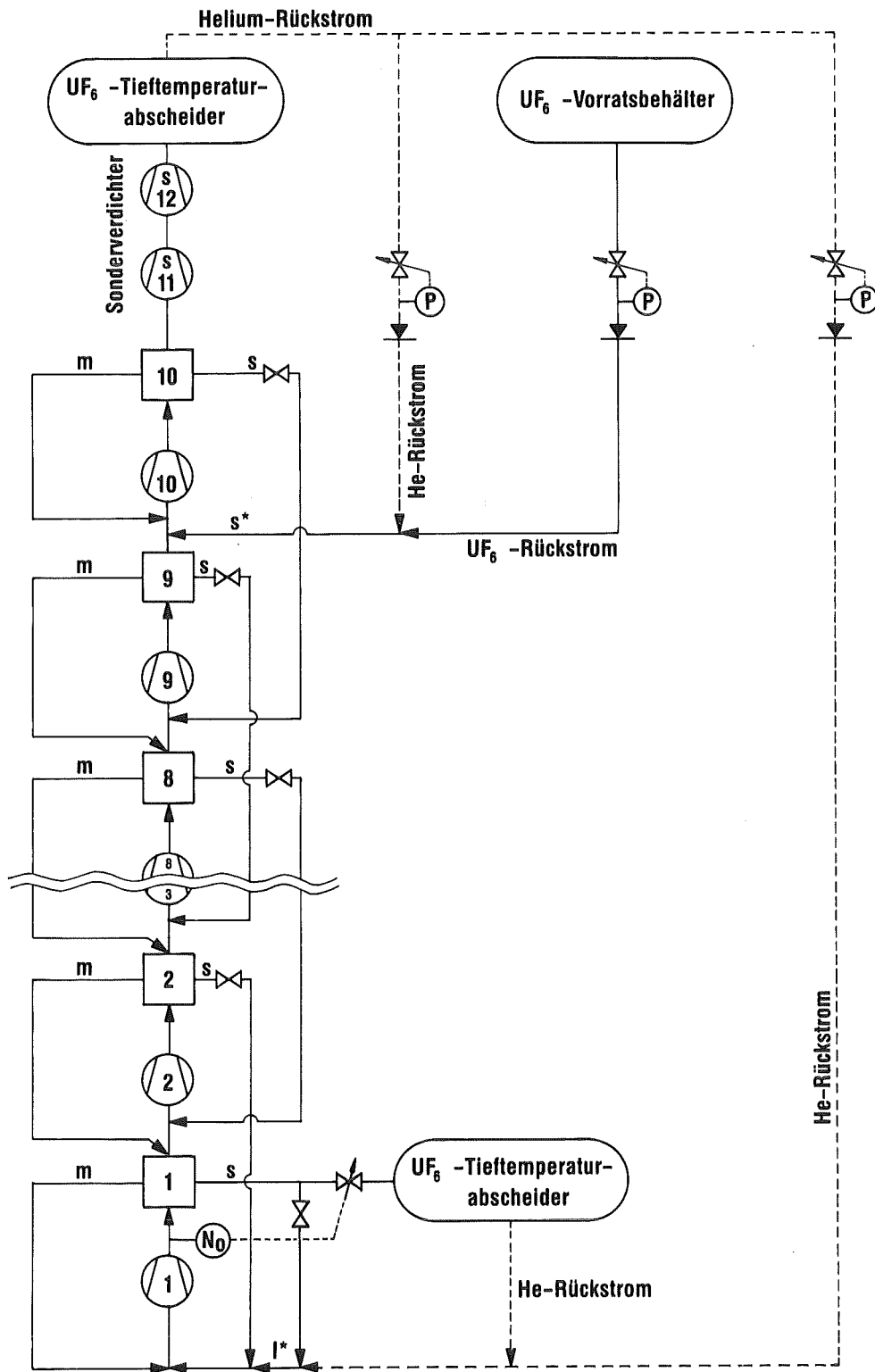


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau der 10-stufigen Pilot-Anlage mit Doppelumlenksystemen und geregelter Tails-Entnahme.

einer "leichten Fraktion", l^* . Um wie bei technischen Trenndüsenkaskaden am Kaskadenfuß einen Tails-Strom entnehmen zu können, wird ein kleiner Teil - etwa 5 bis 10 % - der schweren Fraktion ebenfalls über einen Tieftemperaturabscheider geführt, in welchem der UF_6 -Tails-Strom ausgefroren wird.

Zur Erfassung des Betriebszustandes der Pilot-Anlage ist jede Stufe mit einem Druckaufnehmer im Düsengas, in der leichten und in der schweren Fraktion ausgerüstet. Zur Messung der UF_6 -Konzentration werden wie in der Vorlaufkaskade in Resende α -Ionisationsdetektoren verwendet, die im KfK entwickelt und von der Firma Balzers, Liechtenstein, gefertigt wurden. In jeder Stufe wird die Düsengaskonzentration gemessen, an der Kopfstufe wird zusätzlich die UF_6 -Konzentration der übrigen Fraktionen bestimmt. Hierdurch ist eine ausreichende Erfassung des Betriebszustandes der Pilot-Anlage möglich.

Alle Daten der Anlage werden von einer Meßwerterfassungsanlage abgefragt und on line von einem Rechner verarbeitet und auf Datenträger abgespeichert. Diese on line arbeitende Datenerfassung gestattet auch schnell ablaufende Vorgänge in der Kaskade zu untersuchen.

Festlegung des Arbeitspunktes und des Steuerungskonzeptes

Das Betriebsverhalten von Trenndüsenkaskaden wird im wesentlichen davon beeinflusst, wie sich das UF_6 -Abschälverhältnis \mathcal{S}_u einer Trennstufe bei einer Variation des UF_6 -Inventars dieser Stufe verändert ///. Das Abschälverhältnis \mathcal{S}_u ist dabei definiert als das Verhältnis des UF_6 -Stroms in der leichten Fraktion zum Stufendurchsatz. Die Abhängigkeit des Abschälverhältnisses \mathcal{S}_u vom UF_6 -Inventar einer Stufe wird durch die sogenannte "Stufenkennlinie" beschrieben (Abb. 6). Erniedrigt sich das UF_6 -Abschälverhältnis \mathcal{S}_u mit zunehmendem UF_6 -Inventar (negative Steigung der Stufenkennlinie), so gelangt relativ mehr UF_6 in die kaskadenabwärts geführte schwere Fraktion und somit wird UF_6 -Fehlinventar von Stufe zu Stufe zum Kaskadenfuß transportiert. Bei positiver Steigung der Stufenkennlinie gelangt das UF_6 -Fehlinventar dagegen zum Kaskadenkopf.

Transport von UF_6 - Fehlinventar zum

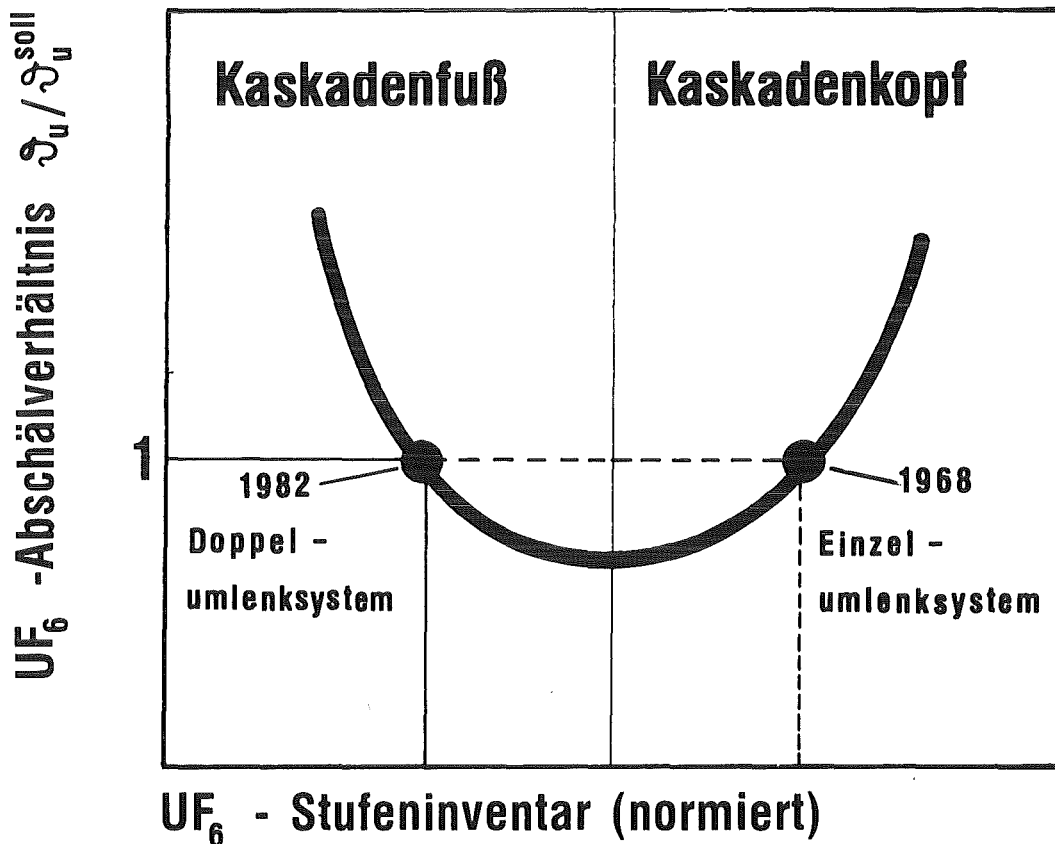


Abb. 6: Stufenkennlinie der 10-stufigen Pilot-Anlage

Bei den 1967 für die Pilot-Anlage gewählten Betriebsbedingungen stand die Minimierung der spezifischen Investierungskosten im Vordergrund des Interesses. Der unter diesem Gesichtspunkt ausgewählte Betriebspunkt lag im Bereich positiver Steigung der Stufenkennlinie. UF_6 -Fehlinventare wurden also zum Kaskadenkopf transportiert und in den dort vorhandenen UF_6 -Abscheidern abgebaut [8]. In der Zwischenzeit konnten die spezifischen Investierungskosten des Trenndüsenverfahrens soweit abgesenkt werden, daß die Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs eine größere Bedeutung erhielt. Eine Optimierung unter dieser veränderten Randbedingung führte für die in Resende im Bau befindliche Vorlaufkaskade zu einem Arbeitspunkt im Bereich negativer Steigung der Stufenkennlinie. UF_6 -Fehlinventar wird also zum Kaskadenfuß transportiert, wo es im Rahmen der Tails-Austragung abgebaut werden muß.

Bei der mit Doppelumlenkdüsen ausgerüsteten Pilot-Anlage wurde ebenfalls ein Arbeitspunkt im Bereich negativer Steigung der Stufenkennlinie gewählt. Dadurch konnte mit der Pilot-Anlage erstmals die Stabilisierung einer Trenndüsenkaskade durch geregelte Tails-Austragung experimentell erprobt werden. Hierbei wird das die Tails-Austragung regelnde Ventil über einen Servomotor und Regler so gesteuert, daß die UF_6 -Düsengaskonzentration N_0 der Fußstufe auf ihren Sollwert geregelt wird (vgl. Abb. 5).

Durchgeführte Versuche

Im Arbeitspunkt im Bereich der negativen Steigung der Stufenkennlinie ließ sich die Anlage durch Steuerung der Tails-Austragung problemlos in einem stationären Zustand halten. Abb. 7 zeigt für diesen Betriebszustand die wichtigsten Betriebsparameter in den einzelnen Stufen. Die verbliebenen geringfügigen räumlichen Schwankungen der Betriebsparameter beruhen im wesentlichen auf Unterschieden in den charakteristischen Stufendaten und sind für die Praxis ohne wesentliche Bedeutung.

Weitere Untersuchungen zeigten, daß sich lokale Störungen und Regelingriffe bei der mit Doppelumlenkdüsen ausgerüsteten Anlage erwartungsgemäß auf weniger Stufen auswirken als bei der mit Einzelumlenkdüsen ausgerüsteten Anlage. Als Beispiel für das dynamische Antwortverhalten der Kaskade mit geregelter Tails-Austragung ist in Abb. 8 der zeitliche Verlauf der Düsengaskonzentration N_0 in den einzelnen Kaskadenstufen nach einer Erniedrigung des Kompressionsverhältnisses^{*)} des Verdichters Nr. 4 um 25 % dargestellt. Aus der Abb. 8 ist zu entnehmen, daß zunächst eine Störung zum Fuß der Kaskade läuft und daß die Fußstufe kurzfristig stärker gestört wird als die übrigen Kaskadenstufen. Aufgrund

*) Die Erniedrigung des Kompressionsverhältnisses erfolgte durch eine Erhöhung des Bypass-Stromes von der Hochdruck- auf die Niederdruckseite des Verdichters. Mit diesem Bypass-Strom, der über ein Ventil geregelt wird, können die Kompressionsverhältnisse der Verdichter auf ihre Sollwerte einjustiert werden.

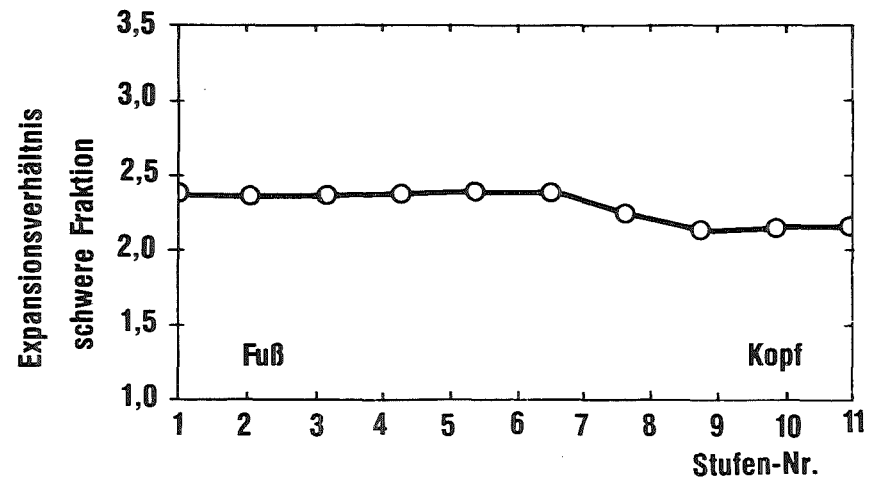
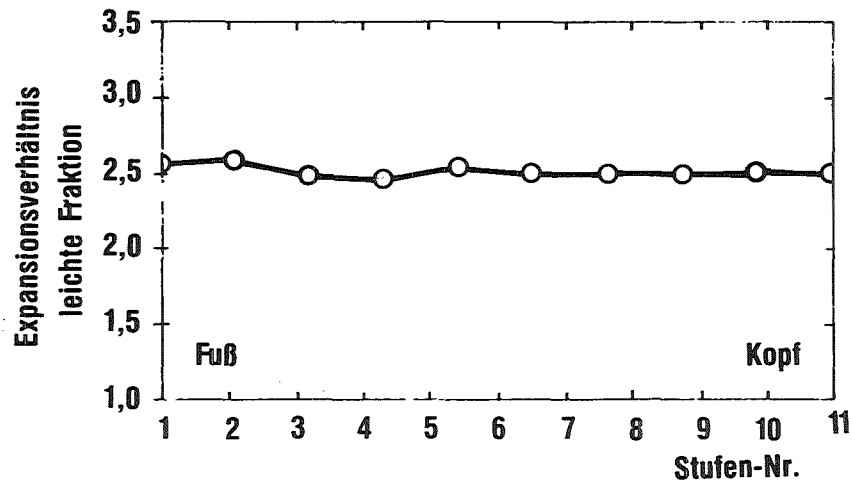
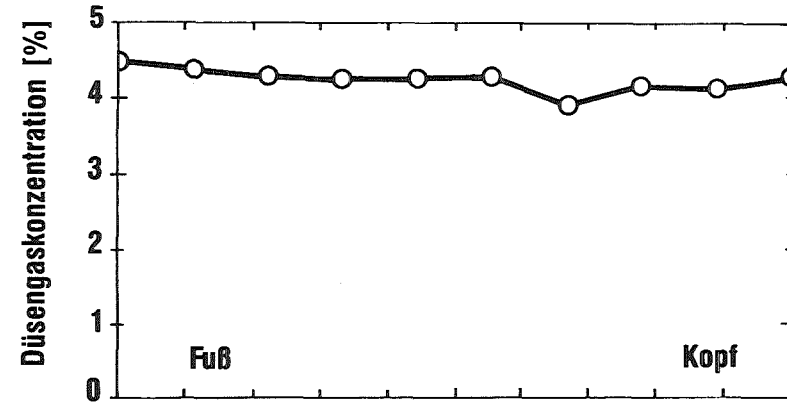
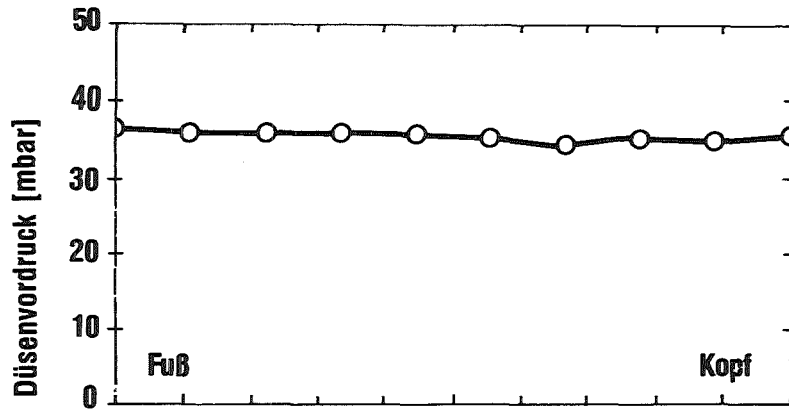


Abb. 7: Einregelungszustand der mit Doppelumlenksystemen ausgerüsteten Pilot-Anlage mit Tails-Entnahme.

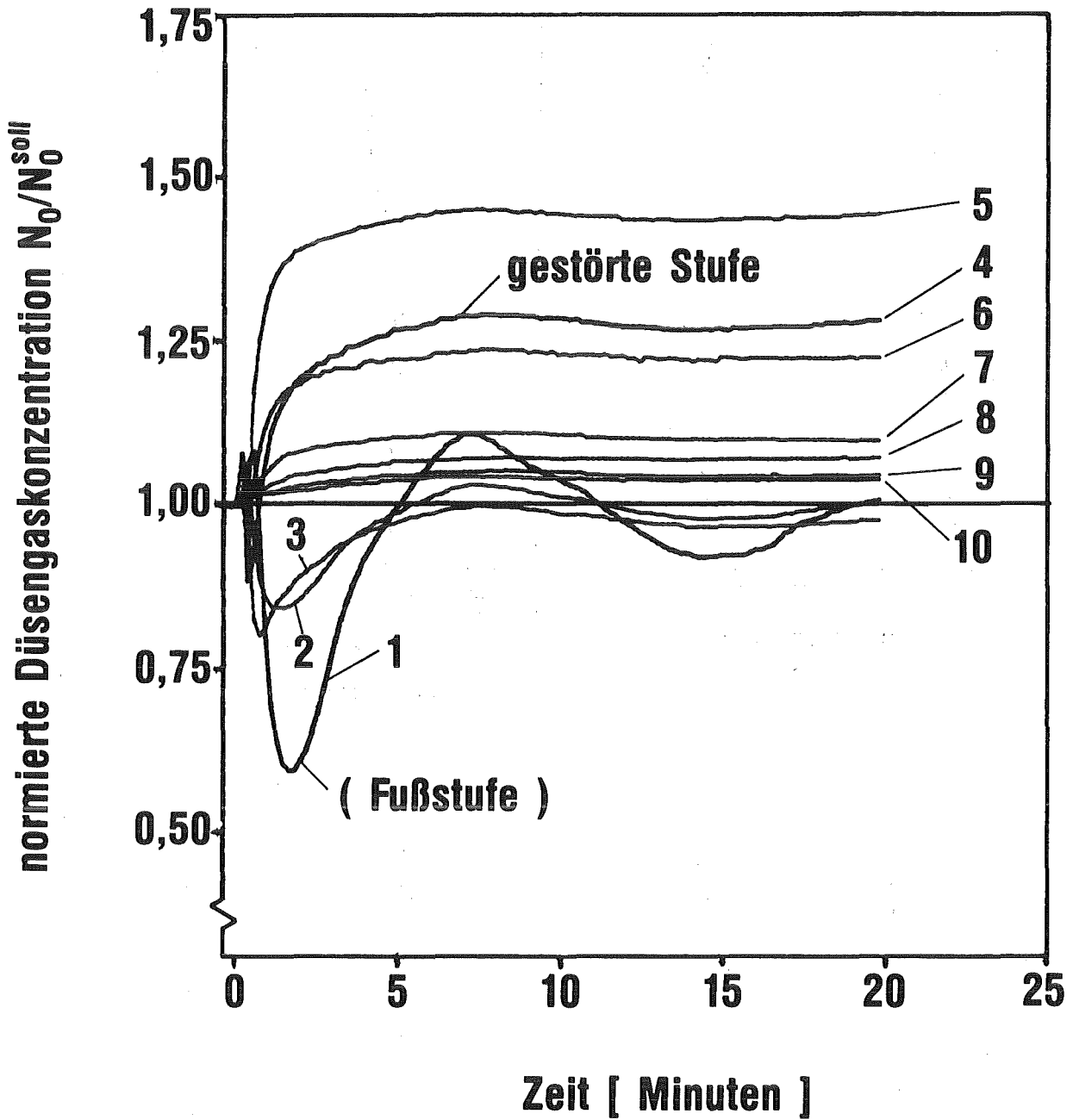


Abb. 8: Experimentell ermitteltes Antwortverhalten der Pilot-Anlage bei Festwertregelung der Düsengaskonzentration der Fußstufe durch die Tails-Entnahme nach einer sprunghaften Erniedrigung des Kompressionsverhältnisses des Verdichters Nr. 4 um 25 %. Für die 10 Stufen ist der zeitliche Verlauf der Düsengaskonzentration N_0 dargestellt.

der Festwertregelung der Düsengaskonzentration der Fußstufe mittels der Tails-Austragung kehrt die Fußstufe jedoch rasch wieder in den Sollbetriebszustand zurück. Im stationären Kaskadenzustand weichen im wesentlichen nur die Stufen vom Sollbetriebspunkt ab, die in unmittelbarer Nähe der ursprünglich gestörten Stufe Nr. 4 liegen, die Störung bleibt also lokal begrenzt.

Als weiteres Beispiel zeigt Abb. 9 den Betriebszustand der Kaskade nach einer Vergrößerung der freien Querschnittsfläche des Rückstauventils von Stufe Nr. 3. Aufgetragen sind für die 10 Stufen die sich stationär einstellenden Abweichungen für den Düsenvordruck p_0 , die Düsengaskonzentration N_0 , das an den Trenndüsen anliegende Expansionsverhältnis p_0/p_1 und den Rückstaufaktor p_5/p_1 . Neben den experimentell bestimmten Meßpunkten sind die mit einem Simulationsprogramm berechneten Abweichungen aufgetragen. Man erkennt die im Rahmen der Meßgenauigkeit liegende Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulationsrechnung sowie die lokal beschränkte Auswirkung dieser Störung. Im Vergleich zu Kaskaden mit Einzelumlenksystemen ergeben sich die größten Abweichungen der Betriebsbedingungen in der Stufe, in welcher das Rückstauventil verstellt wurde /8/. Die Berechnung des Betriebsverhaltens der Pilot-Anlage erfolgte mit einem digitalen Rechenprogramm, welches das instationäre Zeitverhalten der Pilot-Anlage beschreibt. Zur Erstellung dieses Rechenprogramms /6/, das die Kennlinienfelder der Komponenten (Trennelemente, Verdichter, Ventilkennlinien etc.) benötigt, mußten zunächst die Kennlinienfelder der neuen Doppelumlenksysteme experimentell ermittelt werden.

Ausblick

Die Pilot-Anlage soll in Zukunft hauptsächlich für die weitere Überprüfung der Simulationstreue von Computerprogrammen zur Berechnung des Betriebsverhaltens technischer Trenndüsenanlagen eingesetzt werden. Dabei lassen sich neue oder verbesserte Regel- und Überwachungskonzepte sowie Vorschläge zur Verbesserung der Trennleistung einer Kaskade mit verhältnismäßig geringem Aufwand vorerproben.

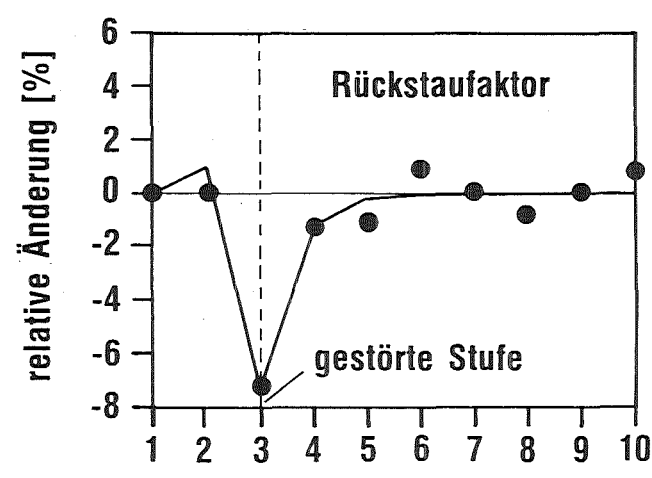
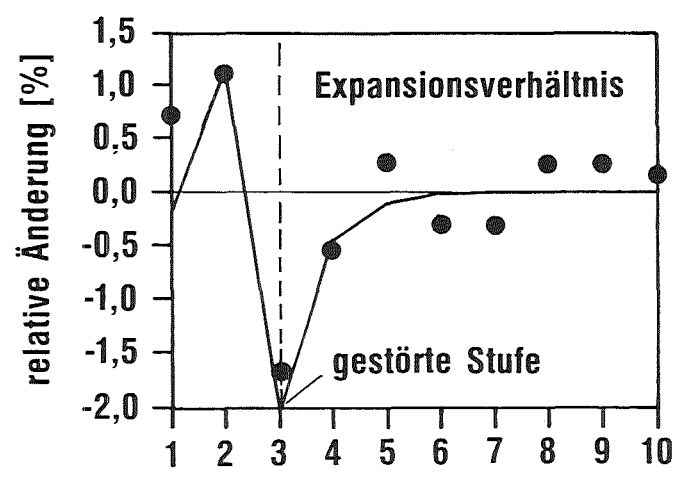
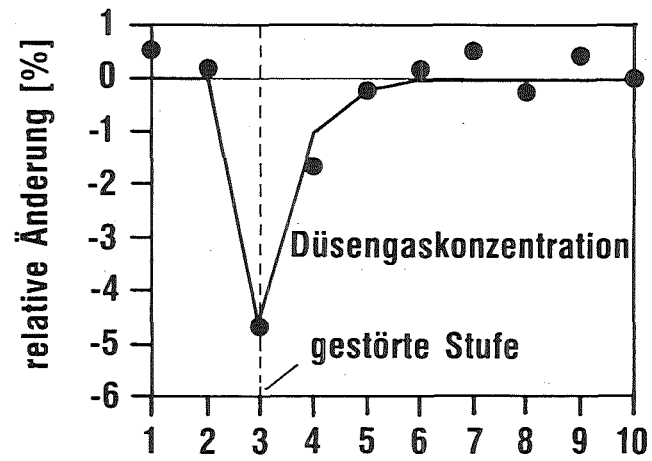
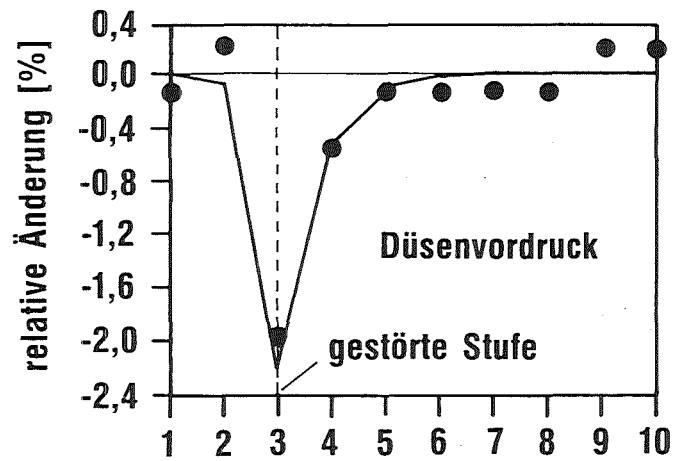


Abb. 9: Stationärer Betriebszustand der Pilot-Anlage nach Vergrößerung der freien Querschnittsfläche des Rückstauventils Nr. 3 um 30 %. Aufgetragen sind die relativen Änderungen des Düsenvordrucks p_0 , des Expansionsverhältnisses p_0/p_1 , der Düsengaskonzentration N_0 und des Rückstaufaktors $R = p_s/p_1$. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen sind durch die Kurvenzüge wiedergegeben.

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr. E. W. Becker und Herrn Dr. Virgilio Andrade für das fördernde Interesse an diesen Untersuchungen sowie Herrn J. Dröge für die Unterstützung beim Wiederaufbau der Pilot-Anlage und Herrn M. Ziemke für die Hilfe bei der Aufstellung der numerischen Rechenprogramme.

Literaturverzeichnis

- /1/ E. W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte and D. Seidel:
"Separation of the Isotopes of Uranium by the Separation Nozzle
Process", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 6, 507 (1967);
see also, E. W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte
and D. Seidel: "Physics and Technology of Separation Nozzle Process",
*Proc. Europ. Nucl. Conf. Nuclear Energy Maturity, Paris, Invited
Sessions*, p. 172, Pergamon Press, Ltd., Oxford (1975);
see also, E. W. Becker: "Separation Nozzle", in S. Villani (Ed.,)
Uranium Enrichment, Topics in Applied Physics, Vol. 35, 245-268,
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1979.
- /2/ 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, 105-114 (1981).
- /3/ E. W. Becker, W. Bier, P. Bley, W. Ehrfeld, K. Schubert, D. Seidel:
"Developing double deflection systems for advanced nozzle enrich-
ment", *Nuclear Engineering International*, Vol. 28, No. 348, 33
(Nov. 1983).
- /4/ E. W. Becker, W. Bier, P. Bley, U. Ehrfeld, W. Ehrfeld, G. Eisenbeiß,
F. J. Rosenbaum und E. Schmid: "Die physikalischen Grundlagen der
Uran-235-Anreicherung nach dem Trenndüsenverfahren: IV. Trenndüsen-
system mit zweifacher Strahlumlenkung und trifraktionärer Gasabsau-
gung", *Z. f. Naturforschung* 32, 401 (1977).
- /5/ E. W. Becker, G. Frey, R. Schütte und D. Seidel: "Entmischung der
Uranisotope in einer zehnstufigen Trenndüsenversuchsanlage",
Atomwirtschaft 13, 359 (1968).

- /6/ W. Fritz, P. Hoch, G. Linder, R. Schäfer, R. Schütte: "Experimentelle Untersuchungen und Digitalrechner-Simulation des instationären Betriebsverhaltens von Trenndüsenkaskaden für die ^{235}U -Anreicherung", Chemie-Ingenieur-Technik 45, 590 (1973).
- /7/ W. Ehrfeld, W. Fritz: "Analysis of Cooperative Behavior of Rarefied Flow and Continuum Flow Components in Separation Nozzle Cascades", Rarefied Gas Dynamics, 12th International Symposium, edited by S. Fischer, Progress in Astronautics and Aeronautics, 74, Vol. 1, 642 (1980).
- /8/ R. Schütte, H. Steinhaus: "Methodik der Störungsdiagnose in Trenndüsenkaskaden zur U-235-Anreicherung", KfK-Bericht 2685 (Sept. 1978).